



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas
Biblioteca "Alfredo L. Palacios"



Metodología de evaluación de proyectos monotecnológicos: rentabilidad de la inversión, governanzas y sustentabilidad de largo plazo

García Fronti, Javier

2011

Cita APA:

García Fronti, J. (2011). Metodología de evaluación de proyectos monotecnológicos, rentabilidad de la inversión, governanzas y sustentabilidad de largo plazo.

Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales de la Biblioteca Central "Alfredo L. Palacios". Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

Fuente: Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Económicas - Universidad de Buenos Aires

1500/1207



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES



FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS

SECRETARÍA

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE
PROYECTOS NANOTECNOLÓGICOS**
**Rentabilidad de la inversión, gobernanza y
sustentabilidad de largo plazo**

AGOSTO 2011

Doctorando: Javier García Fronti

Directora: Dra. María Teresa Casparri

Javier García Fronti
1500/1207
Tesis

SECRETARÍA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS
CALLE DE TRUJANO, 1500 PALACIOS

Índice

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1 DE LA PRÁCTICA NANOTECNOCIENTÍFICA AL MERCADO	13
INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 LA PRÁCTICA	14
1.1.1 <i>Diferentes visiones nanotecnológicas</i>	16
1.1.2 <i>Un marco teórico ecléctico</i>	21
1.1.3 <i>Relatos del pasado y expectativas del futuro</i>	26
1.1.4 <i>La práctica tecno-científica</i>	33
1.2 EL MERCADO.....	40
1.2.1 <i>El diseño de mercados</i>	41
1.2.2 <i>Los mercados como un proceso de co-constitución</i>	46
1.3 LA DINÁMICA INDUSTRIAL	53
1.3.1 <i>Dinámica industrial de la nanotecnología</i>	54
1.3.2 <i>La industria de la Nanomedicina</i>	55
1.3.3 <i>La co-constitución del mercado de nanoportadores</i>	60
1.3.4 <i>Creación, gestión y financiamiento de una nueva empresa</i>	69
CONCLUSIÓN	75
2 GOBERNANZA DE LAS INNOVACIONES NANOTECNOLÓGICAS.....	78
INTRODUCCIÓN.....	78
2.1 RIESGO COMO UN PROCESO CO-CONSTITUIDO	81
2.1.1 <i>La sociedad del Riesgo</i>	83
2.1.2 <i>La crisis como iniciadora de un proceso reflexivo</i>	85
2.2 PRÁCTICA NANOTECNOLÓGICA Y RIESGOS CO-CONSTITUIDOS	88
2.2.1 <i>Riesgos para el ser humano y para el medio ambiente</i>	92
2.2.2 <i>Algunas cuestiones</i>	94
2.2.3 <i>La industria aseguradora y el riesgo nanotecnológico</i>	98
2.2.4 <i>Evaluación de riesgos asociados con el proceso de producción de cinco nanomateriales</i> 99	
2.3 GOBERNANZA NANOTECNOLÓGICA.....	104
2.3.1 <i>La gestión política como fuente de riesgo</i>	107
2.3.2 <i>Dos modelos de innovación: NBIC vs. CTEKS</i>	110
2.3.3 <i>Desde la regulación Bio a la Nano</i>	113
2.3.4 <i>La evaluación del riesgo</i>	116
2.4 MECANISMOS CAUSALES Y GOBERNANZA MULTINIVEL TECNOCIENTÍFICO	118
2.4.1 <i>Asociación estadística y causalidad</i>	119
2.4.2 <i>Las estructuras institucionales</i>	121
2.4.3 <i>Gobernanza multinivel tecnocientífico</i>	123
CONCLUSIÓN.....	125
3 VALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN	129
INTRODUCCIÓN.....	129
3.1 VALUACIÓN DE INVERSIONES EN CONTEXTOS INCIERTOS	131
3.1.1 <i>Opciones reales</i>	131

3.1.2	<i>Inversión óptima en contextos inciertos</i>	133
3.1.3	<i>La valuación de inversiones irreversibles</i>	138
3.1.4	<i>Modelo básico de valuación de inversiones bajo incertidumbre</i>	144
3.2	EL CÁLCULO ESTOCÁSTICO Y LA VALUACIÓN DE OPCIONES REALES.....	150
3.2.1	<i>Valuación de una opción binaria</i>	150
3.2.2	<i>Valuación de una opción de compra europea: La fórmula de Black y Scholes</i>	152
3.2.3	<i>Valuación de una opción de venta bermuda utilizando simulación de Montecarlo</i>	157
3.3	MODELOS DE VALUACIÓN DE INVERSIONES CON APRENDIZAJE.....	162
3.3.1	<i>Modelo básico con aprendizaje</i>	162
3.3.2	<i>Modelo de valuación con dos fuentes de incertidumbre</i>	166
	CONCLUSIÓN.....	170
4	VALUACIÓN DE PROYECTOS NANOTECNOLÓGICOS	172
	INTRODUCCIÓN.....	172
4.1	VALUACIÓN DE ACTIVOS TECNOLÓGICOS.....	174
4.1.1	<i>Metodologías tradicionales</i>	175
4.1.2	<i>Limitaciones</i>	177
4.1.3	<i>Valuación utilizando opciones reales de proyectos tecnológicos</i>	177
4.2	VALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	178
4.2.1	<i>Modelo de Schwartz para la industria farmacéutica</i>	180
4.2.2	<i>Valuación de inversiones conjuntas en el mercado de nanomedicina</i>	184
4.3	MODELIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA POLÍTICA GUBERNAMENTAL NANO.....	187
4.3.1	<i>Modelización y cuantificación del principio precautorio</i>	188
4.3.2	<i>Diseño de Incentivos gubernamentales</i>	193
4.4	MODELO INTEGRADO	197
4.4.1	<i>Etapas de I+D</i>	197
4.4.2	<i>Instalación para la producción a escala comercial</i>	200
4.4.3	<i>Comercialización: Ciclo de vida del producto</i>	201
4.4.4	<i>Precio de monopolio esperado</i>	207
4.4.5	<i>Algoritmo iterativo de solución del modelo</i>	208
4.4.6	<i>Impacto de los subsidios gubernamentales</i>	210
	CONCLUSIÓN.....	211
	CONCLUSIÓN	214
	REFERENCIAS	218
A.	APÉNDICE MATEMÁTICO	237
A.1.	RELACIÓN DE PARÁMETROS PARA QUE $S(t)$ SEA MARTINGALA.....	237
A.2.	FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE τ_u	238
A.3.	CÁLCULO DE $E\left(I_{\{\tau_u \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_u}\right)$	240
A.4.	VALUACIÓN DE UN CALL EUROPEO	246
A.5.	ALGORITMO NUMÉRICO DE SOLUCIÓN DE UNA OPCIÓN AMERICANA DE VENTA	250
A.6.	SOLUCIÓN BAJO INCERTIDUMBRE TÉCNICA ($\gamma = 0$).....	251
A.7.	SOLUCIÓN BAJO INCERTIDUMBRE EN EL COSTO DE LOS INPUTS.....	251

Agradecimientos

Mi agradecimiento a mi directora de tesis doctoral, María Teresa Casparri, por su permanente apoyo y asesoramiento en las distintas etapas del proceso de investigación.

Mi agradecimiento a Andoni Ibarra por nuestros diálogos en torno a la gobernanza nanotecnológica.

Mi agradecimiento a los miembros del centro Nanogune (País Vasco) y del proyecto POTENCIAR (Argentina) por las entrevistas e intercambios sobre nanotecnología, las que motivaron el presente trabajo.

Mi agradecimiento a Miguel Fusco, Verónica García Fronti, Inés García Fronti, Pablo Herrera y Analía Meo por sus comentarios.

Mi agradecimiento especial a Analía por su amor y apoyo, sin el cual esta travesía personal y profesional no hubiera sido posible.

Resumen

La nanociencia es el estudio de fenómenos a escala nanométrica, en donde los materiales tienen propiedades diferentes a las que se presentan en la física clásica. La escala en la que se trabaja, determina que los investigadores inevitablemente diseñan nuevos nanomateriales al mismo momento que estudian sus propiedades. En otras palabras, es una práctica de laboratorio innovadora donde la ciencia y la técnica se integran, dando lugar al concepto de Nanotecnociencia. Este campo disciplinar complejo configura un mercado que produce nanomateriales, lo cual genera nuevos y desconocidos riesgos tanto en términos de la salud humana como del medio ambiente.

En los últimos años, el crecimiento sostenido del mercado nanotecnocientífico está generando nuevos desafíos y necesidades en el ámbito empresarial y en el de las políticas públicas. Frente a estos nuevos retos, y sabiendo que las inversiones tienen una gran importancia en la promoción del crecimiento económico, es necesario desarrollar herramientas que permitan evaluar inversiones en este contexto, tanto desde el punto de vista de los inversores privados, como desde los gobiernos.

Esta tesis examina en primer lugar cómo la práctica nanotecnocientífica, su dinámica industrial y la sociedad interactúan, conformando un mercado donde se constituyen nuevos riesgos y beneficios. En segundo lugar, analiza los diferentes marcos regulatorios existentes y sus límites, proponiendo una extensión del enfoque ingenieril tradicional al contemplar intereses sociales y ambientales. Esto permite proponer algunos lineamientos orientados hacia una nanogobernanza sustentable económica y socialmente.

A la luz del análisis crítico de la práctica nanotecnocientífica, de su mercado y de sus riesgos, esta tesis desarrolla un modelo (basado en la metodología de opciones reales) de valuación de proyectos de inversión nano. En el mismo se incorporan tanto aspectos económicos y financieros como sus riesgos asociados. Además, se identifican los incentivos estatales que podrían utilizarse para promover una nanogobernanza sustentable en el largo plazo.

Introducción

La real academia de ingenieros de Reino Unido define, por un lado, a la nanociencia “como el estudio de fenómenos y manipulación de materiales a escala atómica, molecular y macromolecular, donde las propiedades son significativamente diferentes a las que se presentan a gran escala” y, por el otro, a la nanotecnología como “el diseño, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas mediante el control del tamaño y forma, a escala nanométrica” (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004 p.5). La nanociencia y la nanotecnología se integran en el trabajo diario dentro de los laboratorios, dando lugar a una práctica conjunta denominada Nanotecnociencia (Nordmann 2006).

El término Nanotecnociencia da cuenta un modo de investigación diferente al científico tradicional utilizado en física y química (Galison, 2006), demandando intercambio y comunicación entre diferentes prácticas científicas y tecnológicas (Galison, 1997) y buscando explicaciones mediante un uso ecléctico de varias teorías cerradas¹. En este nuevo campo convergen diversas disciplinas e instituciones (públicas y privadas) dando lugar a una nueva práctica.

Esta práctica nanotecnocientífica que está en pleno proceso formación, se co-constituye con su correspondiente mercado, entendiendo este último cómo un mecanismo de coordinación en el cual los agentes² maximizan sus intereses mediante cálculos económicos y donde se resuelven conflictos mediante la fijación de precios (Callon, 1999b; Guesnerie, 2006).

En este mercado se realizan inversiones que requieren ser valuadas. Estas tienen tres características que no permiten utilizar técnicas tradicionales de valuación. En primer lugar, las inversiones son, en su mayoría irreversibles (total o parcialmente), y sus costos de capital, hundidos. En segundo lugar, existe

¹ El físico Werner Heisenberg (1971) introdujo el concepto de "teorías cerradas" En particular, se refirió a cuatro: la mecánica newtoniana, la teoría de Maxwell, la termodinámica y estadística mecánica, y la mecánica cuántica no relativista.

² Estos agentes forman una red de relaciones y conexiones sociales que para cierta literatura son dadas (Granovetter, 1985).

incertidumbre sobre el futuro retorno de la inversión; los precios futuros de los activos son impredecibles, por lo que los flujos de beneficio futuros son inciertos. En tercer lugar, los inversores tienen, muchas veces, la opción de esperar para obtener una mejor información sobre los precios futuros (Dixit, AK y Pindyck, 1994).

Este mercado de productos nano, ya ha colocado nanoproduitos³ en nuestra sociedad, lo cual ha sido acompañado por el despliegue de distintas estrategias para evaluar los niveles de toxicidad⁴ para el ser humano (Cui et al., 2005; Lam et al., 2004) y para el medio ambiente (Colvin, 2003). Distintos estudios argumentan que la introducción de nanopartículas a la producción de bienes de consumo masivo conlleva serios riesgos para la salud. Por ejemplo, existen fuertes similitudes entre la problemática de inhalación de las fibras de amianto (asbestos) en los lugares de trabajo del pasado y la posible inhalación de los nanotubos de carbono que aparecen hoy en día en diversos objetos de consumo⁵ (Shvedova et al., 2003). Con respecto al medioambiente, por ejemplo, algunas nanopartículas (como cobre o plata) han demostrado ser dañinas para la vida acuática⁶.

Las organizaciones (tales como universidades y empresas) que son productoras de estos nanomateriales son las responsables directas de la existencia de riesgos producidos por su actividad. Desde el punto de vista de salud pública, es de suma importancia entender cómo gestionan estas organizaciones los riesgos que generan. Internamente, estas organizaciones describen los riesgos que encuentran en el proceso de fabricación y los gestionan utilizando metodologías ingenieriles reguladas por el estado (Medley y Walsh, 2007). Luego, y para cubrir los riesgos que no pueden ser minimizados, recurren al pago de una prima a una

³ Hacia finales del año 2007, el inventario de productos de consumo que incluían nanotecnología, contaba con 580 (Project on Emerging Nanotechnologies, 2008).

⁴ Como una forma de comenzar un proceso sistemático de necesidades de investigación sobre los riesgos en el ambiente, en los EE.UU., la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha publicado recientemente un libro blanco (US Environmental Protection Agency, 2007).

⁵ Otro ejemplo que alerta sobre la toxicidad de estos productos es un estudio realizado a ratones, en el cual se les inyectó nanopartículas de cobre y los animales bajo estudio desarrollaron lesiones graves de riñones e hígado (Chen et al., 2006).

⁶ Las partículas podrían ser absorbidas rápidamente por las plantas y el suelo, o ser transportadas en grandes distancias a través del aire o estar suspendidas en el agua. Estos estudios nos ponen en una situación de alerta frente a los posibles riesgos involucrados.

aseguradora que identifica, analiza, evalúa, y diversifica el riesgo restante (Lloyd, 2007). Sin embargo, esta práctica de gestión de riesgos ingenieril y actuarial no es sustentable socialmente, pues no contempla aspectos humanos y ambientales⁷.

Ante estos nuevos riesgos⁸, solo parcialmente gestionados por las organizaciones que producen nanopartículas, las políticas de estado cobran fundamental importancia para proteger a la sociedad y para impulsar un mercado sustentable. A nivel internacional, existen dos doctrinas antagónicas sobre como regular tecnologías. Por un lado, la Norteamericana (similar a la Japonesa) propone que se comience con una auto-regulación leve de las mismas empresas, que luego el gobierno monitorea y va complementando en la medida que lo considera necesario. Por el contrario, el programa europeo *Converging Technologies for the European knowledge society* (CTEKS) pone el énfasis de la política de estado tecnológica en el principio precautorio (Echeverría, 2005; Klinke et al., 2006). Frente a un proyecto de riesgos sociales inciertos, se prefiere esperar la correcta evaluación antes de autorizar su realización.

Esta tesis elabora un modelo de valuación de proyectos de inversión nanotecnológicos que contempla su dinámica científica, su dinámica industrial y su regulación. Para ello, primeramente, analiza cómo la práctica tecnocientífica, su dinámica industrial y la sociedad interactúan, conformando un mercado donde se constituyen nuevos riesgos y beneficios. En segundo lugar, se examina el papel del marco regulatorio en la constitución del mercado nanotecnocientífico, extendiendo el enfoque tradicional de equilibrio económico e incorporando los intereses sociales y ambientales, lo que permitirá proponer una nanogobernanza sustentable económica y socialmente. En tercer lugar, se analiza críticamente la literatura sobre valuación de inversiones, argumentando que la metodología de opciones reales es la más adecuada para contemplar incertidumbre y decisiones estratégicas. En cuarto lugar, y a partir del contexto analizado, se construye un modelo que supera las limitaciones más importantes de las herramientas de

⁷ Es más, desde un punto estrictamente técnico también son insuficientes, pues no es posible evaluar con precisión la probabilidad y la gravedad de los riesgos involucrados en nuevas tecnologías (Swiss Re, 2005).

⁸ Esta tesis sigue la perspectiva “sociedad del riesgo” (Beck, 1992; 1999) (Adam y van Loon, 2000) para presentar la constitución del riesgo y sus efectos sobre los diversos ámbitos sociales.

valuación de proyectos de inversión tradicionales⁹ y refleja la complejidad de los aspectos económicos y sociales implicados en proyectos de inversión nano. Para dar cuenta del rol gubernamental, este modelo operacionaliza el principio precautorio e incorpora la posibilidad de manejar diferentes tipos de incentivos por parte del gobierno.

El presente trabajo realiza tanto con aportes teóricos como metodológicos. En primer lugar, la comprensión del marco teórico ecléctico utilizado en la nanotecnociencia replantea la mutua interacción entre la representación y la intervención de las prácticas científicas. En segundo lugar, al analizar la dinámica industrial del mercado y su interacción con la práctica científica, se avanza en la formulación de una teoría de formación de mercados donde las relaciones de conocimiento y comerciales se co-constituyen con nuevos riesgos generados. Desde el punto de vista metodológico y de los protocolos profesionales de valuación de proyectos, se propone el desarrollo de un modelo de valuación de inversiones que contemple la incertidumbre y la estrategia involucrada. En particular, se propone una metodología que incluya aspectos sociales y ambientales en coordinación con políticas gubernamentales de regulación.

La presente tesis doctoral se estructura en cuatro capítulos. El primero presenta a la práctica nanotecnocientífica como un proceso de constitución y su relación de co-constitución con el mercado. Primeramente se presenta la práctica tecnocientífica, mostrando diferentes visiones y proponiendo la teoría del actor-red como mejor forma de entender las interacciones y su constitución. A continuación, se describe la problemática del diseño de mercado, en tanto un proceso de co-constitución. Por último, se presenta la dinámica industrial nanotecnológica y, en particular, la de la nanomedicina. Este capítulo analiza el proceso de constitución de este mercado nano, dando cuenta de la aparición de los agentes económicos y de su interacción con la práctica tecnocientífica utilizando la teoría del actor-red (*Actor-Network Theory*, ANT) (Latour, 1987). Este enfoque permite combinar una observación de las interacciones a nivel micro con una preocupación teórica sobre la organización de la sociedad,

⁹ Los más conocidos son el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el período de repago.

permitiendo el análisis del funcionamiento del discurso científico y el impacto de su práctica en la esfera pública (Seguin, 1996; 2001). Dentro de las múltiples aplicaciones de la nanotecnología, esta tesis centra su atención en la nanomedicina. La misma, incluye el desarrollo de nuevos procedimientos para diagnosticar y curar enfermedades (Paradise et al., 2008). Por ejemplo, se están produciendo comercialmente nuevas drogas, dispositivos de diagnóstico e implantes utilizando técnicas nano.

El segundo capítulo identifica los riesgos asociados y analiza, críticamente, la regulación de los mismos, introduciendo el concepto de gobernanza sostenible. Para ello primeramente se presenta el concepto de riesgo en general y los vinculados a las innovaciones tecnológicas en particular. Luego se describen los riesgos nanotecnológicos para el ser humano y para el medio ambiente; se plantea algunas cuestiones éticas que se derivan, y se detalla una evaluación de riesgos concreta realizada sobre cinco nanomateriales. A continuación, se introduce el concepto de gobernanza, enfatizando que la gestión política es también una fuente de riesgo y se describen los modelos de regulación norteamericano y europeo. El capítulo concluye con la presentación del concepto de gobernanza multinivel tecnocientífico y su relevancia para la industria de la nanomedicina. Para ello, se analiza críticamente el rol de los mecanismos causales en el diseño de políticas públicas de regulación de sectores tecnocientíficos que comercian globalmente.

Esta tesis argumenta que para una gobernanza sustentable en el largo plazo y de características globales, es necesario ir más allá de gobierno y la empresa privada. Es imperioso que las organizaciones intergubernamentales, organizaciones no gubernamentales, los estados democráticos, las empresas y la sociedad civil se involucren en el proceso. La participación activa de los ciudadanos se convierte en un ingrediente clave, ya que son los que votan a los políticos, son consumidores y actúan a través de organizaciones no gubernamentales. Esta nueva simbiosis entre la política, los negocios y la sociedad civil permitirá una nueva gobernanza que contribuya a construir una sociedad justa, sostenible y

participativa, logrando una interrelación simbiótica entre los gobernantes, la sociedad civil y las empresas¹⁰.

En el tercer capítulo se propone recorrer la literatura de valuación de inversiones en contextos inciertos, estratégicos e irreversibles, proponiendo la metodología de opciones reales como la más eficiente para la valuación de proyectos de inversión nanotecnológicos. Para ello primeramente se analiza el problema de la valuación de inversiones en contextos de incertidumbre, introduciendo el concepto de opción real y proponiendo un modelo básico. Luego se describen diversos cálculos estocásticos necesarios para el modelo a proponer en el capítulo siguiente. Por último, se presentan dos modelos de valuación de inversiones donde hay aprendizaje, fundamentales para entender la inversión en I+D.

En particular, y dentro de las metodologías de valuación de proyectos en I+D, esta tesis brinda herramientas para valorar activos nanotecnológicos, tales como patentes, procesos, conocimientos técnicos¹¹ y proyectos de inversión en nanomedicina. Estos proyectos requieren varios años para producir el bien comercializable, siendo necesario contar, entonces, con etapas de desarrollo. En general, la primera etapa del proyecto es la de investigación, en la que se requieren capitales que serán costos hundidos del proyecto. Luego, se evalúa si se continúa con la siguiente fase de desarrollo del producto (Paxson, 2003) (Newton, DP, Paxson y Widdicks, 1996) (Newton, D y Pearson, 1994).

Finalmente, el último capítulo de la tesis desarrolla un modelo integrado de valuación de inversiones en el mercado nanotecnológico que contempla las distintas etapas de investigación y desarrollo, la incertidumbre del mercado debido a la tecnología y la política de regulación. Primeramente, analiza la problemática de la valuación de activos tecnológicos, repasando las técnicas tradicionales, pero con especial énfasis en la metodología de opciones reales.

¹⁰ Claramente, el desastre de Fukuyima lleva a repensar todos los riesgos que conllevan las tecnologías innovadoras. Si bien, lo primero que surge es un pánico colectivo frente a cualquier utilización de tecnología y una sobrevaloración del principio precautorio, luego de un tiempo, es importante realizar un proceso reflexivo que permita proponer y articular protocolos y regulaciones sobre los usos de la tecnología.

¹¹ Un activo intangible tecnológico se define como un recurso que no tiene una forma de realización física y cuya explotación industrial y económica otorga un beneficio futuro a su dueño (Lev, 2001)

Luego, se estudia la valuación de proyectos en investigación y desarrollo analizando el Modelo de Schwartz para la industria farmacéutica y un modelo de inversión conjunta en el mercado de nanomedicina. Asimismo, se modeliza y cuantifica el principio precautorio y se describen los diferentes modelos de incentivos gubernamentales. Finalmente, integrando todo lo expuesto, se elabora un modelo de evaluación de proyectos en el mercado nanotecnológico de inversiones que da cuenta de sus características tecnológicas, comerciales y analiza el rol gubernamental.

1 De la práctica nanotecnocientífica al mercado

Introducción

Han sido los historiadores, filósofos y sociólogos de la ciencia como Peter Galison (1988), Andrew Pickering (1993), Ian Hacking (2006), Allan Franklin (1986), H. M. Collins (1974), entre otros, los que se han dedicado a analizar la práctica científica, principalmente centrados en la física del siglo XX. A los fines del presente trabajo, se entiende la práctica como un ámbito complejo en el que se incluyen agentes humanos y no humanos (sociales y materiales), donde se desarrolla una determinada actividad científica (Callon, 1986, 1999a; Latour, 1987, 1996, 2005; Latour y Woolgar, 1986).

Como se ha mencionado en la introducción de la tesis, este capítulo centra su atención en la práctica que hemos denominado nanotecnocientífica (Nordmann 2006). La referencia a tecnociencia remite a un modo de investigación diferente al científico tradicional que se observa en los laboratorios nano. Se trata de una forma ingenieril de hacer ciencia, extendiendo marcos teóricos existentes hacia uno ecléctico. Es importante notar, que no se remite, solamente, a un problema de tamaño de materiales y a su relación con los especialistas que trabajan con ellos. Sino también a la interacción social entre todos involucrados, definiendo una práctica en proceso de construcción por la permanente interacción de los actores involucrados.

Esta práctica nanotecnocientífica interactúa con la sociedad, dando lugar a la aparición del mercado nano que, con sus actores, define cómo y a qué precios se venderán los productos a los usuarios. Si bien contar con un mercado tiene indudables ventajas (que los hacen insustituibles en un contexto occidental capitalista): sus agentes autónomos innovan, permiten la coordinación y facilitan contratos entre partes que no surgirían en un contexto planificado centralmente (Callon, 2009). También conllevan graves problemas y riesgos en su construcción y funcionamiento: no están diseñados para lograr el bien público y producen externalidades negativas sobre grupos humanos que no son tenidos en cuenta.

En particular, el mercado nano surge de una dinámica industrial asociada que comparte características con las de otras áreas innovadoras como, por ejemplo, la biotecnología y la microelectrónica. En los mismo juegan un rol importante los académicos, generando nuevas empresas (o registrando patentes), y el gobierno, en su rol de financiador de la investigación y el desarrollo innovador. A diferencia de la biotecnología, que claramente tiene un uso en un área específica, es muy común que patentes nano sean utilizadas en diferentes industrias¹². Asimismo, en el sector nano hay una gran cantidad de innovadores¹³ que registran patentes y plantean nuevas oportunidades no planeadas y, muchas veces, no esperadas.

A los fines de presentar la práctica, su mercado y en particular el contexto de nanomedicina, el presente capítulo se estructura en tres secciones. La primera presenta la práctica tecnocientífica, mostrando diferentes visiones y proponiendo la teoría del actor-red como mejor forma de entender las interacciones y su constitución. La segunda, describe la problemática del diseño de mercado, en tanto un proceso de co-constitución. Por último, la tercera subsección presenta la dinámica industrial nanotecnológica. Asimismo, y como este trabajo se focaliza en los proyectos de nanomedicina (aplicaciones médicas de lo nano) y su valuación, en la última parte de este capítulo se presenta esta rama específica de la nanotecnociencia.

1.1 La práctica

¿Qué es nanociencia y qué es nanotecnología? Para empezar a caminar posibles respuestas, en esta subsección se transcribirán, analizarán y contrastarán diferentes visiones: la gubernamental, la científica, la de la empresa privada y la del tercer sector.

¹² La dinámica, notoriamente, cuenta con altas expectativas de trascender la innovación industrial propia, transformando a otras (Bozeman, Larédo y Mangematin, 2007).

¹³ En contraste con la industria microelectrónica que tiene una planificación centralizada desde las grandes compañías (por ejemplo, INTEL)

En cuanto a lo disciplinar, es Alfred Nordmann (2006) quien describe ciertas características de la investigación “nano” y propone el uso del concepto “Nanotecnociencia”, donde el término “tecnociencia” significa un modo de investigación diferente al científico tradicional. Peter Galison (2006), señala que los investigadores “nano” persiguen el objetivo de construir, no de demostrar existencia. Se trata de una forma ingenieril de hacer ciencia, extendiendo marcos teóricos existentes hacia uno ecléctico. Es importante remarcar que, como los investigadores provienen de diferentes formaciones básicas, habitualmente difieren en qué teorías utilizan, pero todos coinciden en qué instrumentos y qué programas de computación utilizan. Estos artefactos se transforman en los referentes comunes en la comunidad y adquieren una importancia extrema.

A la hora de imaginar el futuro de una nueva tecnología, siempre es importante evaluar la forma en que se describen los logros pasados de otras. En el contexto particular de la aparición de la nanotecnología, Chris Tournay (2006) postula que el relato del pasado es fundamental a la hora de imaginar el futuro de la nanotecnología. Esto se conjuga con las expectativas futuras para definir el campo (Selin, 2007). Claramente, se ponen de manifiesto las maneras en que los distintos actores pretenden utilizar la historia y las expectativas para colonizar el futuro y legitimar sus intereses presentes. Desde un punto de vista de la teoría económica, las expectativas sobre el curso futuro de la innovación tecnológica son uno de los factores más relevantes a tener en cuenta por el empresario a la hora de elegir si adopta una nueva tecnología. Esas decisiones empresarias agregadas y su relación dialéctica con las políticas públicas, sostienen estas expectativas futuras y las reproducen. Sin dudas, no hay posibilidad de sostener en el tiempo expectativas futuras que no estén sincronizadas con la empresa, al menos en el mundo occidental capitalista que nos concierne. Notoriamente, el análisis de la dinámica de las expectativas es un elemento clave en la comprensión científica y en el cambio tecnológico.

Para un entendimiento acabado de la práctica nanotecnocientífica, es necesaria la caracterización social que la acompaña. La relación entre los actores involucrados le infunde significado, legisla su existencia y la materializa. Las tecnologías no son sólo herramientas que se utilizan o aplicaciones de la ciencia, sino que más

bien se definen a través de argumentos y contra argumentos que, en algún momento futuro, se estabilizan en un plano social y se materializan sus estructuras (Latour y Woolgar, 1986) (Bijker y Law, 1992). Y, más importante aún, se deberían estar estudiando los efectos sociales, cualquiera que sea su forma material, si queremos dar respuesta a las preguntas “macro” sobre la estructura, poder y organización. El análisis sociológico necesita incorporar a la materia como un actor, para entender en forma acabada la reproducción (Law, 1992). La reputación de un investigador o instituto, su inclusión en los planes de estudio, en las citas científicas o técnicas, artículos, o el éxito con la recaudación de fondos, podrían servir para apoyar una idea. En este sentido, lo tecnocientífico es siempre social y se vincula a las cuestiones de legitimidad y de construcción de credibilidad en las comunidades.

Para analizar la práctica nanotecnocientífica, esta sección enumera, primeramente, diferentes visiones sobre el concepto; luego, se propone un marco teórico ecléctico para dar soporte a la investigación en el campo nano. Continúa planteando relatos del pasado que permiten construir el mito nanotecnológico y sus expectativas de futuro. Finalmente, en la última parte, se plantea el enfoque de la teoría de actor-red (ANT) sobre la práctica tecnocientífica.

1.1.1 Diferentes visiones nanotecnológicas

Para comenzar a responder a la pregunta con la que iniciamos esta sección: ¿qué es nanociencia y qué es nanotecnología?, se transcriben, analizan y contrastan las definiciones que expresaron, en los últimos años, actores claves del campo: La National Nanotechnology Initiative de EEUU (Roco, 2004), la oficina de patentes de EEUU (Lee et al., 2006), la FDA de EEUU (Kimbrell, 2006), el Gobierno Británico (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004), la organización ecologista Greenpace (Huw Arnall, 2003), la visión que tienen los científicos (Tahan, 2007) y el sector privado empresarial y asegurador (Swiss Re, 2005) (Lloyd, 2007).

1.1.1.1 Visión gubernamental

M.C. Roco (2007) presenta la visión de EEUU en un trabajo donde se describe la génesis de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI), su situación actual y su probable evolución en el largo plazo (2000-2020). La NNI es un compromiso a largo plazo de investigación y desarrollo (I + D) en EEUU, que se inició en el año 2001 (actualmente, coordina 25 agencias independientes). El total de inversión en I + D en los años fiscales 2001-2005 fue de más de 4.000 millones de dólares.

Desde el comienzo, se persiguió la formación de una comunidad académica interdisciplinaria en nanotecnología con una fuerte llegada al mercado. Según el autor mencionado, es importante aunar contribuciones de diversas disciplinas. Asimismo, para que el largo plazo sea sustentable, es esencial la planificación y el establecimiento de prioridades en la gestión pública. En ese sentido, propone un fuerte financiamiento público y privado para el futuro, y nos ofrece la promesa de aumentar la eficiencia en las industrias tradicionales y llevar radicalmente nuevas aplicaciones a través de las tecnologías emergentes. En este documento, Roco referencia la definición de la NNI que establece que la Nanotecnología “es la habilidad para entender, controlar y manipular la materia a nivel de átomos individuales y moléculas, así como a nivel "supramolecular" involucrando grupos de moléculas (en el rango de alrededor de 0,1 a 100 nm), con el fin de crear materiales, dispositivos y sistemas con nuevas propiedades y funciones debido a su pequeña estructura.” (2007 p. 3-1). Esta definición implica una plataforma unificadora entre la ciencia y la ingeniería a nanoescala. En resumen, el enfoque es tecnológico y con un fuerte financiamiento para que la empresa norteamericana en el futuro, pueda establecerse como líder y ser un motor fundamental en la nueva economía¹⁴.

La agencia federal de alimentos de EEUU (FDA) ha expresado su opinión sobre la aparición de productos nanotecnológicos en el mercado de consumo masivo, pero sin regular todavía. Cientos de nano-productos ya están ampliamente disponibles y son especialmente frecuentes en los productos de cuidado personal.

¹⁴ Complementando la visión norteamericana, Lee *et al.* (2006) hacen un análisis del estado actual de las patentes nanotecnológicas: si bien las actuales son, básicamente, materiales pasivos, se espera un futuro promisorio. Asimismo,

La FDA tiene autoridad reguladora sobre muchos de estos productos, sin embargo, hasta el momento, no ha adoptado medidas que contemplen las diferentes propiedades y riesgos asociados a los nanomateriales. G.A. Kimbrell (2006) evalúa la postura actual de la FDA con respecto a la reglamentación de los productos de consumo masivo que incluyan nanomateriales. El autor alienta a la FDA a modificar sus reglamentos para hacer frente a los nuevos riesgos humanos y ambientales, que los productos que contienen nanomateriales pudieran producir.

Por su parte, el gobierno Británico define nanociencia “como el estudio de fenómenos y manipulación de materiales a escala atómica, molecular y macromolecular, donde las propiedades son significativamente diferentes a las que se presentan a gran escala” (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004). Asimismo, en el mismo informe define a las nanotecnologías como “el diseño, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistema mediante el control del tamaño y forma a escala nanométrica”.

1.1.1.2 Visión desde la academia

Desde el ambiente académico, algunos científicos e ingenieros prefieren plantear que, en la actualidad, la nanotecnología se limita, solamente, a la fabricación de nanomateriales; cualquier otro futuro posible es por ahora, meramente, una posibilidad. Sólo tal vez, la nanotecnología del futuro incluirá la manipulación átomo por átomo, o molécula por molécula, y la posibilidad de construir dispositivos activos (Tahan, 2007).

Claramente, los productos nanotecnológicos que se encuentran en el mercado hoy, son mayoritariamente nanomateriales pasivos en objetos de consumo (Project on Emerging Nanotechnologies, 2008). A pesar de esta visión restrictiva, es notable la cantidad de investigadores que trabajan en el nuevo campo, piden financiamiento a los políticos bajo las promesas nanotecnológicas y publican en las numerosas revistas científicas¹⁵.

¹⁵ Leydesdorff y Zhou (2007) describen la evolución de la Nanotecnología como una disciplina, analizando las publicaciones en las revistas científicas. Utilizando el Índice de citas del 2003, 2004 y 2005, los autores sugieren que el nivel de citas habla a las claras de una disciplina establecida y de una comunidad académica sólida.

Para muchos científicos que trabajan en el área de materiales, la nanotecnología es una evolución natural de la tecnología, pero que al llegar a nivel nano, muchas propiedades cambian de forma radical. Por ejemplo, partiendo de la microelectrónica, si realizamos circuitos cada vez más pequeños, se llega a un límite crítico donde los materiales se comportan de manera muy diferente: un hilo de 1 mm de espesor es conductor y sigue la ley de Ohm, pero cuando se reduce a un nanómetro, la ley de Ohm no es válida. En esos espesores, la naturaleza se empieza a comportar de manera cuántica, siendo necesario un replanteo de toda nuestra teoría, y dando lugar a la teoría ecléctica mencionada por Nordhaus. Por lo tanto, para estos científicos no se debería hablar de nanotecnología si no hay efectos cuánticos asociados.

Las aplicaciones biomédicas son vastas y dan lugar a lo que se denomina: nanomedicina. Los científicos la consideran una disciplina nueva, pues se relaciona con el acceso a la célula (los componentes del interior de la célula tienen dimensiones nanométricas). Si podemos acceder al interior y manipular el contenido con algún dispositivo inteligente, estamos frente a lo que llamaríamos bionanotecnología. Según este punto de vista, la nanociencia, en la medicina, es tal, en tanto exista la posibilidad de acceder al interior celular y operar en él.

1.1.1.3 Visión del tercer sector

Greenpace plantea que el nuevo campo multi-disciplinario propuesto por la nanotecnología y el creciente flujo de dinero público, abre la posibilidad de una nueva carrera armamentista entre los gobiernos (Arnall, 2003). El tercer sector advierte sobre el uso de la nanotecnología, como una etiqueta para una variedad de disciplinas científicas con el fin de obtener dinero de los presupuestos gubernamentales.

1.1.1.4 Visión desde el sector asegurador

Ahora, se prestará atención a un último actor, clave desde el punto de vista del mercado: las aseguradoras de riesgo. Estas empresas persiguen un fin de lucro en un sistema de mercado, pero a diferencia de otras empresas que buscan invertir en negocios riesgosos (tal vez nanotecnológicos), su negocio es cobrar primas en

forma anticipada para cubrir a sus clientes por futuras contingencias. El valor de esas primas debería representar la probabilidad de la contingencia multiplicada por la intensidad. Claramente, el surgimiento de la nanotecnología es una oportunidad de grandes negocios, pero el cálculo de esas primas es incierto en un contexto de novedad y escasa regulación; esta incertidumbre sobre los beneficios o pérdidas futuras preocupa al sector, pues solamente sufrirá las pérdidas y no, sus beneficios. Esta problemática interesó a las aseguradoras líderes a nivel mundial y han realizado informes en los que expresan su posición (Swiss Re, 2005) (Lloyd, 2007).

La industria reconoce los grandes beneficios potenciales, sin embargo, alerta que no debe permitirse comercializar estos productos antes de evaluar adecuadamente los riesgos asociados. Esto lo hace velando por su propia salud financiera, evitando que no se produzcan quebrantos secuenciales por una agregación sistémica de la pérdida por negocios nanotecnológicos. Asimismo, se alerta sobre el mecanismo utilizado por algunos países de dejar que los productos salgan al mercado masivo y "esperar y ver" los riesgos, siendo una forma muy peligrosa de determinar los riesgos asociados. En resumen, la opinión de este último actor, las aseguradoras, es la de mantener el ritmo rápido del desarrollo del campo, promover la formación de redes de académicos que trabajen en este ámbito y enfatizar que en la actualidad existe un vacío de regulación. La falta de reglamentación nunca es útil para los aseguradores responsables y, en este sentido, la industria de seguros debe ejercer presión por medio de lobbies para exigir una mayor transparencia y eficacia. Esto permitiría proteger la solvencia de largo plazo de la industria. (Lloyd, 2007).

Los informes de las aseguradoras enfatizan que los productos que involucran desarrollos nano ya están en el mercado y se utilizan en productos de consumo masivo. Su toxicidad es desconocida y se pueden dispersar fácilmente. Por esta razón, la industria de seguros se propone vigilar esta situación, para evitar la quiebra de las aseguradoras (Lloyd, 2007). Según las investigaciones al día de hoy, no está claro si las nanopartículas pueden causar efectos crónicos de salud, llevando a la industria a contraer deudas millonarias a futuro por efectos ocasionados hoy.

1.1.2 Un marco teórico ecléctico

Como se ha mencionado anteriormente, es Alfred Nordmann (2006) quien propone el uso del concepto "Nanotecnociencia". Es el mismo autor quien recuerda que a fines de 1940, el físico Werner Heisenberg (1971) introdujo el concepto de "teorías cerradas." En particular, se refirió a cuatro: la mecánica newtoniana, la teoría de Maxwell, la termodinámica y estadística mecánica, y la mecánica cuántica no relativista. Estas teorías son consideradas cerradas debido a que su desarrollo histórico ha llegado a su fin, constituyendo cada una, un dominio herméticamente cerrado y siendo siempre válidas.¹⁶ Heisenberg, asimismo, enuncia que sus dominios son acotados y no incluyen ninguna proposición cierta sobre el mundo empírico. Evaluar en qué medida los fenómenos experimentales pueden ser explicados por la teoría es una cuestión de calibración, afinación, de ajuste mutuo entre fenómeno y teoría.

Surge entonces la cuestión de donde se sitúa la nanotecnociencia. Por otro lado, los investigadores en nanotecnociencia no tienen como objetivo acomodar la teoría a la realidad para explicar esta última. En este sentido, se toman los fenómenos "nano" como un mundo complejo situado entre la teoría clásica y la cuántica (Roukes, 2001). Asimismo, no existen teorías especialmente adaptadas para tener en cuenta la particular complejidad del mundo a nanoescala, ni que expliquen la relación entre la estructura de un determinado material y sus propiedades. En lugar de utilizar teorías cerradas, el investigador busca una explicación parcial mediante un uso ecléctico de varias teorías, forzándolas, más allá de su ámbito de aplicación.

Nuevamente, Alfred Nordmann (2004) ofrece un claro ejemplo donde, para medir la corriente a través de un complejo orgánico-inorgánico, el investigador elige, indistintamente, entre reconstruir la medida en forma cuántico-química o de

¹⁶ Alisa Bokulich (2006) examina en detalle las similitudes y diferencias entre la noción de Teoría cerrada de Werner Heisenberg y el concepto de paradigma de Thomas Kuhn. Si bien Heisenberg y Kuhn comparten una concepción holística de las teorías y la noción de inconmensurabilidad, sus opiniones divergen, fundamentalmente, en lo que respecta a la cuestión del realismo científico. Alisa Bokulich indica que, contrariamente a la opinión popular, Heisenberg no es un instrumentista, sino más bien un pluralista real.

forma clásica. De esta manera, los investigadores utilizan teorías e instrumentos que no fueron hechos para trabajar en esta escala. El investigador se enfrenta a un cosmos donde las propiedades clásicas, como el color y la conductividad, surgen al aumentar el tamaño desde los niveles cuánticos; y donde fenómenos, como la conductividad cuántica, emerge al reducir la escala hasta llegar al régimen cuántico.

En otras palabras, el núcleo mismo de las teorías se fuerza para dar cuenta de una estructura causal detrás de los fenómenos observados a escala nano. Un caso interesante que ilustra lo anterior, es la necesidad de construir modelos de simulación que integren varias teorías para predecir el comportamiento de un sistema de escala nano. Eric Winsberg (2006) ilustra este comportamiento emergente describiendo el uso de modelos computacionales en los estudios en esta escala. El autor analiza cómo el uso de modelos de simulación lleva a contradecir algunas tradiciones filosóficas acerca de la relaciones entre las teorías y sus modelos, dejando una puerta abierta para la utilización de la nanotecnociencia como un disparador de nuevos debates en la filosofía de la ciencia¹⁷.

La nanotecnociencia considera el mundo como complejo, caracterizado por las leyes de la química y por actividad biológica y aspira a construir materiales "vivos" en lugar de dispositivos pasivos. Un buen ejemplo de ello es el término "superficie selectiva", que atribuye a la agencia algo que sigue siendo pasivo: las células pueden adherirse a una determinada superficie en forma diferencial, pero la selección la realiza el ingeniero que elige la superficie a fin de lograr alguna funcionalidad. Lo mismo cabe decir de conceptos tales como "materiales inteligentes", "movimiento autónomo". Todos estos términos tienen un significado concreto y, al mismo tiempo, se refieren a algo visionario (Nordmann, 2006).

Resumiendo, no hay ningún marco teórico para lograr, en el mundo real, controlar los fenómenos de escala nano en nuestro beneficio. Sólo se puede

¹⁷ Los algoritmos descriptivos de una dinámica se separan de la explicación causal y ofrecen un posible mecanismo de explicación *ad hoc*. Un ejemplo claro de lo anterior es el artículo "Conductance of a Molecular Junction", publicado en la revista *Science* en 1997 (Reed et al., 1997).

extender el marco existente hacia uno ecléctico para explicar un comportamiento dentro del laboratorio. Pero ese trabajo, muy posiblemente, no será lo bastante robusto como para servir como base para la producción masiva de componentes nanotecnológicos. Todo parece posible, pues nuestro conocimiento actual no lo invalida. Es evidente que el mero hecho de que algo no esté en contradicción con las leyes conocidas, no es suficiente para establecer que es posible técnicamente lograr que funcione a nivel masivo y fuera del laboratorio (Nordmann, 2006).

1.1.2.1 El poder de las imágenes

Si, como se dijo anteriormente, el ámbito de investigación fuerza eclécticamente teorías ajenas para construir explicaciones, ¿cómo puede el investigador estar o no satisfecho con su entendimiento de un determinado fenómeno? Para Heisenberg y cualquier filósofo de la ciencia que tenga orientación hacia la física teórica, esta cuestión se reduce al poder predictivo de la ciencia cuantitativa; los valores numéricos que predice la teoría se comparan con los valores obtenidos en la medición y se verifica que se encuentren razonablemente cercanos. Esto no es posible en las investigaciones a escala nano.

Esta imposibilidad lleva a postular el criterio de “semejanza” (*likeness*). Se evalúa visualmente la semejanza entre la imagen de una simulación del modelo y otra imagen que representa la medición. Esta situación nos aleja del paradigma cuantitativo y nos propone un mecanismo cualitativo de evaluación. Lo que compara el investigador son dos representaciones, la simulación del modelo y la lectura del laboratorio. Desde ya, que esta metodología tiene muchos problemas, siendo el principal, la subjetividad del investigador al comparar imágenes. Según Alfred Nordmann (2006), la mayor parte de la investigación en nanociencia y nanotecnología, en este sentido, es cualitativa, y su éxito epistemológico (“*epistemic success*”) se basa en la idea de “semejanza” de imágenes¹⁸.

Como los investigadores provienen de diferentes formaciones básicas, habitualmente difieren en qué teorías utilizan, pero todos coinciden en qué

¹⁸ De hecho, el investigador observa dos monitores: uno ofrece una interpretación visual de los datos que fueron obtenidos a través de una serie de mediciones, mientras que el otro, presenta una simulación dinámica del proceso que podría haber sido la observación realizada con un software de simulación visual. En base a esas dos imágenes, se extraen conclusiones sobre los procesos de causalidad probable.

instrumentos y qué programas de computadora utilizan. Estos artefactos se transforman en los referentes comunes en la comunidad y adquieren una importancia extrema. A este respecto, es especialmente interesante el trabajo realizado por Jochen Hennig (2006) sobre la historia del microscopio “scanning probe”, como así también, el de Ann Johnson (2006), que estudia el papel que ocupan los ingenieros de software en este proceso.

Asimismo, las imágenes del nanocosmo son cada día más populares. Al pasar de comparaciones cuantitativas de valores numéricos a la construcción del concepto de semejanza cualitativa por imágenes, se sustituye una realidad por otra desde lo simbólico. En este sentido, el poder de las imágenes ha convertido a la nanotecnociencia en lo que es (Nordmann, 2006). Historiadores del arte y teóricos como William Mitchell (2005) o Hans Belting (1994), en particular, han puesto de relieve la diferencia entre los signos convencionales, que sólo persiguen la representación de otra cosa, y las fotografías o imágenes que encarnan visiones y deseos.

Este vuelco a lo cualitativo, a la hora de contrastar el modelo con la realidad, ha sido desafiado por filósofos de la física como a Otavio Bueno (Bueno, 2004) y a Pieter Vermaas. (2006). De esta forma, el poder de las imágenes plantea algunos de los problemas más graves para las nanociencias y las nanotecnologías; las imágenes en los medios producen su propia realidad que, muchas veces, contradice la intención del científico que la produjo. Nordmann (2006) recuerda como ejemplo, la famosa imagen a escala nano producida por Don Eigler y Erhard Schweizer (1990). Por primera vez en la historia, los seres humanos manipularon los átomos a voluntad y dieron una imagen al mundo que fue leída como la prueba de concepto de las increíbles posibilidades de la nueva tecnología. Esto no era, precisamente, lo que Eigler y Schweizer quisieron decir; su imagen es testimonio de la dificultad y de los límites tecnológicos para el control de átomos individuales (Eigler, D, 1999). Pero el poder de la imagen difundida en los medios, superó cualquiera de sus testimonios en contrario.

Así también, los investigadores apelan a representaciones visuales del transporte de electrones, sin la necesidad de preguntar por su existencia. Peter Galison

(2006) lo define como “indiferencia ontológica”. En este sentido, los científicos invocan, en forma casi automática, a imágenes de transporte de electrones, sin sentir la necesidad de demostrar su existencia: piensan los electrones pasando a través de una molécula como si fuera un objeto material¹⁹.

Esta indiferencia conlleva un desinterés por las cuestiones de representación y un interés por la sustitución de la realidad en el laboratorio donde se testean los prototipos tecnológicos (Nordmann, 2006). Así, Rom Harré (2003) contrasta los instrumentos científicos que sirven como prueba para evaluar causalidad, con los dispositivos (incluyendo simulaciones) que producen fenómenos. Utilizando instrumentos, se obtienen medidas que pueden remontarse en la cadena causal a algún estado físico, propiedades o proceso; no ocurre lo mismo, cuando se utiliza una imagen de una simulación para compararla con la imagen que produce un dispositivo de lectura. En resumen, se persigue construir cosas, no demostrar la existencia.

1.1.2.2 Hacia una disciplina

En la subsección anterior, se presentó a la Nanotecnociencia en términos de cuestiones disciplinares (un complejo campo parcialmente explicado, mediante la extensión de teorías cerradas), metodológicas (la comparación por semejanza de imágenes, no de números) y ontológica (Indiferencia).

A partir de la mecánica cuántica, hidrodinámica, etc., aparecen las teorías que sirven de guía a nanoescala. Si bien éstas son las ciencias básicas, como planteamos anteriormente, no pueden postularse como cuerpo teórico de la nanociencia. En términos de un paradigma teórico, muchos investigadores esperan que se construya una teoría general de la relación entre estructura y propiedades a nivel molecular.

El dominio de interés para la nanotecnociencia comprende a todo aquello que se encuentra en la zona fronteriza entre el mundo cuántico y la física clásica. Se extienden marginalmente teorías para enfrentar los desafíos que presenta el mundo a escala nano. Esta forma de trabajo “marginal” también se ve reflejada en

¹⁹ Alfred Nordmann (2004) describe un ejemplo de lo anterior, al mencionar un estudio de caso en electrónica molecular.

la forma que se evalúan los riesgos toxicológicos asociados a las nanotecnologías (nanotoxicología). Además, se extienden procedimientos de evaluación de riesgos químicos a la escala nano, debido a la falta de metodologías propias. Obviamente, el investigador realiza modificaciones *ad hoc* a los métodos para que se adecuen al nuevo ámbito, pero no hay certeza de estar evaluando los riesgos en forma correcta, poniendo en peligro vidas humanas y al medio ambiente.

Queda por explorar qué tipo de conocimiento produce este uso ecléctico, para poder dar cuenta de los experimentos nanotecnológicos. En este sentido, es pertinente interrogarse acerca del tipo de conocimiento objetivo que se expresa o se comunica en las revistas científicas del área. A diferencia del conocimiento epistémico tradicional, la nanotecnología produce conocimiento de habilidades prácticas. A su propia manera, estas capacidades adquiridas son objetivas y públicas. No podemos juzgar su verdad o falsedad, sino por la robustez de lo adquirido como capacidad técnica (Nordmann, 2006).

1.1.3 Relatos del pasado y expectativas del futuro

A la hora de imaginar el futuro de una nueva tecnología, siempre es importante evaluar la forma en que se describen los logros que en el pasado otras tecnologías han construido. En el contexto particular de la aparición de la nanotecnología, Chris Tourney (2006) postula que el relato del pasado es fundamental a la hora de imaginar el futuro de la nanotecnología, teniendo en cuenta que algunos rasgos de ese pasado continuarían en un futuro posible. Este autor selecciona la teoría de los mitos de Malinowski (1954) para detectar cuáles podrían ser los relatos o historias útiles a la hora de construir el relato de la nanotecnología. La teoría de Malinowski plantea la existencia de una relación entre las condiciones sociales del presente y los relatos de las historias del pasado. En este sentido, sostiene que una de las razones por la que la gente relata mitos, es debido a la necesidad de justificar ciertas condiciones del presente. Para Tourney, la nanotecnología podría generar las condiciones necesarias para el relato del mito, de la misma forma que lo ha hecho la recombinación de ADN.

Los puntos a considerar del desarrollo de Malinowski que Tourney sostiene como necesarios para su hipótesis son, por un lado, que el relato del mito surge en

circunstancias tensas, particularmente, cuando un grupo debe justificarse sobre otro, cuando su experiencia de la historia se modifica o cuando aparecen eventos que disturban. Por otro lado, el relato del mito no necesita respuestas del pasado, pero sí se revelan como convicciones acerca de lo ocurrido antes del presente. Además, refleja las condiciones y problemas en el presente. Finalmente, el resultado del relato del mito es justificar, legitimar o racionalizar las circunstancias que rodean a la gente. De esta forma, podría ser un ejercicio como para llegar a un arreglo de las tensiones actuales. Muchas de las relaciones que involucra la nanotecnología, asemejaría las condiciones que genera el relato del mito en la teoría de Malinowski, en la medida que coexisten varios relatos narrados (en el mismo sentido que los Trobriander narran su mito).

Tourney organiza a las diferentes posturas en relación a la nanotecnología en cuatro categorías. La primera es la postura en extremo nanofílica, cercana a la ciencia ficción, de la cual, Eric Drexler es uno de sus principales exponentes. La segunda, es optimista en cuanto a los beneficios, pero menos fantasiosa. Fue en este sentido, que la administración Clinton favoreció varios proyectos, pensando en los beneficios para la salud y en la mejora de los estándares de la población. A la tercera postura, la denomina como de escepticismo mesurado. Se oponen y ridiculizan a la postura en extremo nanofílica, haciendo hincapié en las consecuencias que podría ocasionar tanto en la ciencia como en la sociedad. La cuarta y última postura es la extrema hipérbole nanofóbica. Su postura es tan exagerada como la nanofílica. Esta visión realiza una analogía de la nanotecnología con la historia de Frankenstein, en la cual toda predicción se presume como peligrosa y arrogante. Asimismo, hay quienes preanuncian el fin de la humanidad (Joy, 2000).

Como dijimos anteriormente, Tourney selecciona un caso tecnológico semejante: la recombinación de ADN de 1970 (donde se cumplirían las condiciones de Malinowski). Este caso demostraría diferentes condiciones, que permitirían anticipar algunos efectos en las reacciones públicas en relación a la nueva tecnología. Además, consideramos que la selección de este caso, fortalece el concepto de proceso dinámico de construcción del campo nanotecnológico a partir de la interacción de los diferentes actores involucrados. Inicialmente, la

recombinación de ADN trajo aparejada una considerable hipérbole tecnofilia. Sus consecuencias serían nuevos beneficios de magnitudes desconocidas: productos farmacéuticos más efectivos, comprensión de las causas del cáncer, abundantes cosechas de alimentos, hasta nuevas soluciones para los problemas de energía (Grobstein, 1977)

La posición de Tourney es que la historia de la recombinación de ADN va a ser relevante para la nanotecnología cuando estén presentes las siguientes tres condiciones. La primera, es cuando la hipérbole tecnofilia inspire su reacción opuesta denominada hipérbole tecnofobia. En el caso histórico mencionado, fue el momento en el que las predicciones positivas acerca de la recombinación del ADN asustaron a mucha gente pensando que un grupo de elite desconocido para el público, podría controlar un extraordinario poder a través de un método capaz de manipular la vida. Es válido argumentar, que esta situación podría estar pasando actualmente en relación a la nanotecnología. La segunda, alude a las condiciones de Malinowski: la nanotecnología pareciera afectar a diferentes personas en diferentes modos y podría incrementar la diferencia de poder o riqueza. Algunos grupos podrían controlar la investigación y el desarrollo, mientras que otros se sentirían más poderosos. Asimismo, generaría un cambio histórico profundo y los ciudadanos podrían no entender la situación en la que se encuentran. De este modo, las tres condiciones de las condiciones del relato del mito de Malinowski podrían desplegarse. Finalmente, la tercera condición es la que Tourney denomina “desdén por la salud y la seguridad del público”. Este tercer elemento todavía no estaría establecido, y el autor sugiere la necesidad de anticiparse a la reacción pública, indagando acerca de los riesgos que los científicos e ingenieros podrían crear, de qué manera asumirían la responsabilidad por esos riesgos, cómo los mitigarían, etc.

De esta forma, la lección más importante es que esa hipérbole y las condiciones de Malinowski han intensificado los valores, las esperanzas y los miedos que podrían ser anticipados en la reacción pública hacia la nanotecnología en un futuro cercano. Si no se enfatiza en la salud y seguridad pública, la reacción seguramente será de miedo y rechazo hacia la nanotecnología. Luego, las historias que la gente relate de la nanotecnología cobrarían la forma del relato del

mito al estilo de Malinowski. En este sentido, esta dramática narrativa de la buena o mala existencia será, por lo menos, cruel tanto hacia la nanotecnología, como hacia los que la crearon (Tourney 2006).

Asimismo, las representaciones narrativas compiten con otras, para lograr la credibilidad y la autenticidad histórica. Es decir, se relatan diferentes historias del pasado, y según cuál sea el futuro posible, se seleccionan las principales lecciones que deben ser pensadas. Entonces, para construir el relato de la nanotecnología, los científicos e ingenieros que trabajan en estas investigaciones pueden contribuir con historias de mucho valor, que seguramente, disputarán con las historias de otros. Es válido pensar que esos otros relatos, también poderosos, pueden provenir de ciudadanos participantes, que quizás tengan otros valores y otras lecciones.

Luego de analizar las narrativas del pasado, nos concentraremos en las expectativas sobre el futuro. Cynthia Selin (2007) explora cómo las expectativas nanotecnológicas de los diferentes actores involucrados operan para definir el campo, como así también qué problemas son los legítimos, poniendo de manifiesto las maneras en que los distintos actores pretenden utilizarlas para “colonizar” el futuro y legitimar sus intereses presentes. La pelea entre los actores gira alrededor de la pregunta acerca de qué es nanotecnología y, fundamentalmente, qué debe ser. El punto de partida de la autora es simplificar este multientramado de actores agrupándolos en dos: los llamados “visionarios” y los “científicos”.

En este nuevo desarrollo del campo disciplinar, convergen diversas disciplinas, diferentes instituciones, como así también financiamientos, políticas económicas y sociales, culturales y los medios masivos de comunicación. Asimismo, es importante mencionar que estas expectativas sobre la nanotecnología siguen una dinámica que busca evidenciar beneficios futuros que permitan construir un nuevo orden mundial. Los más apasionados, hasta mencionan un mundo donde esta tecnología nos libraría de los problemas de salud y limpiaría nuestro mundo de todo tipo de polución presente. Cynthia Selin (2007) refiere a un concepto de expectativa como similar a motivación y a intención.

Desde un punto de vista de la teoría económica, el profesor de la universidad de Stanford Nathan Rosenberg (1976) asegura que las expectativas sobre el curso futuro de la innovación tecnológica es uno de los factores más relevantes a tener en cuenta por el empresario a la hora de elegir si adopta una nueva tecnología. Esas decisiones empresarias agregadas y su relación dialéctica con las políticas públicas sostienen estas expectativas futuras y las reproducen. Sin dudas, no hay posibilidad de sostener en el tiempo expectativas futuras que no estén sincronizadas con la empresa, al menos, en el mundo occidental capitalista que nos concierne.

Desde el punto de vista sociológico, es muy interesante el aporte que se realiza a la problemática en el número especial de la revista *Technology Analysis and Strategic Management* donde los editores invitaron a un grupo de sociólogos a discutir sobre el rol de las expectativas en el delineamiento del cambio tecnocientífico (Borup et al., 2006). Para ellos, las expectativas y las visiones futuras son importantes para la sociedad en su conjunto, más allá de las opiniones de los científicos e ingenieros directamente involucrados en la tecnociencia en cuestión. Dichas expectativas desempeñan un papel central en la asignación de recursos públicos nacionales, definiendo el futuro de la sociedad en su conjunto (Van Lente y Rip, 1998) (van Lente, 1993). Por estas y otras razones, el análisis de la dinámica de las expectativas es un elemento clave en la comprensión científica y en el cambio tecnológico.

El futuro imaginado de la nanotecnología es una promesa de pequeñas máquinas programables capaces de curar todos los males y de limpiar el medio ambiente de la polución, que nosotros mismos hemos causado. Es un futuro creado para seducir, ofreciendo soluciones mágicas a problemas que nuestra sociedad no quiere enfrentar por el camino más arduo (i.e. cambio de dieta y ejercicio físico para mejorar nuestra salud y un serio programa de reducción de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera).

Asimismo, ese futuro conlleva miedos, irracionalmente exagerados. Michel Crichton (2002) sitúa su novela "Prey" en un laboratorio nanotecnológico en el desierto de Nevada. Debido a un experimento fuera de control, una nube de nano-

robots se ha escapado. Esta nube es autónoma, se autoreproduce y aprende. Se presenta como un ser vivo que se expande sin límite. Esta predicción futurista se ha dado en llamar “grey goo”. Si bien el lenguaje pseudocientífico está siempre presente en el discurso, la comunidad científica contrapone teorías y experiencias, postulando la bajísima probabilidad de que esto ocurra. No es necesario imaginar enemigos irreales para encontrar seres que se autoreproducen y que amenazan a diario la sobrevivencia: virus, bacterias y, el más dañino, los seres humanos (Tahan, 2007).

El libro de K. Eric Drexler “*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*” (1986), visiblemente describe increíbles beneficios futuros en conjunto con escalofriantes riesgos previamente impensados. El autor plantea que la nanotecnología tiene un control exhaustivo de la materia a nivel molecular, y sostiene como algo cierto en el futuro cercano, la posibilidad de diseñar moléculas a voluntad (Drexler, 1992). Además, prevé máquinas moleculares programadas por nanocomputadoras para llevar a cabo tareas específicas. Así también, se imagina la manipulación de átomos individuales para obtener formas determinadas. Estos dispositivos no serían simples máquinas, incluirían una componente orgánica. Dependiendo de la misión programada al diseñarla, el organismo podría romper enlaces a nivel molecular para construir nuevas formas.

En un reciente trabajo K. Eric Drexler (2004) remarca que la revolucionaria visión de Feynman hizo de la nanotecnología una moda y puso en marcha una carrera a nivel global por dominarla. Sin embargo, la comunidad científica, luego de valerse de esta visión futurística para lograr financiamiento, y temiendo que la preocupación pública con respecto a sus peligros pudiera interferir con dichos fondos, ha tratado de reducir las expectativas de corto plazo generadas por la nanotecnología, para excluir lo problemático de la visión de Feynman.

En el apéndice del trabajo mencionado, Drexler ofrece definiciones para dar su opinión sobre cuatro conceptos que habitualmente se confunden: nanoreplicador, nanobot, ensamblador y fabricación molecular. Tal como se utiliza aquí, un ensamblador es un mecanismo para orientar reacciones químicas. Un nanobot genérico, entonces, puede ser un ensamblador o algún otro tipo de mecanismo

robótico a nanoescala. La fabricación molecular es un proceso de construcción átomo por átomo. Por último, un nanoreplicator es una compleja y especializada especie de nanomáquina que permite la autoreplicación de los nanobots. En la visión de Drexler, estos mecanismos descriptos previamente, son la solución a la contaminación, a la escasez de recursos alimentarios, y a la desigualdad económica. De acuerdo con muchos autores, K. Eric Drexler personifica la corriente que llamaríamos “visionarios” nanotecnológicos (Stix, 2001) (Selin, 2007). Sin dudas, ha sido una figura clave para este nuevo paradigma tecnológico y ha dominado el discurso oficial durante todos los años 90.

Actualmente, los resultados concretos en nanotecnología son modestos y se reducen a la producción de nanopartículas. Sin embargo, existen posibles riesgos a evaluar, que no deben ser minimizados, asumiendo que nuestro conocimiento sobre materiales en estudio hasta el nivel micro, se aplica a la escala nanométrica. En consecuencia, el aumento de la superficie de contacto entre los materiales y el medio ambiente o los seres humanos, aumenta su poder reactivo. Por un lado, permite que las nanopartículas de plata sean, a igual peso, más efectivas que sus hermanas mayores en tareas de esterilización (REF). Análogamente, ese mayor poder reactivo puede tener mayor nivel de toxicidad para el ser humano (Cui et al., 2005) (Lam et al., 2004) (Shvedova et al., 2003) o para el medio ambiente (Colvin, 2003). Estos estudios constituyen una nueva literatura que recibe el nombre de nanotoxicología (*nanotoxicity*).

Si bien estos nanomateriales son la prehistoria de lo esperado por los visionarios, igualmente, han producido un impacto increíble a lo largo del último decenio. El Instituto Inglés de Física editó una nueva revista llamada *Nanotechnology* en 1991. Ese mismo año, por su parte, los departamentos de desarrollo corporativos comenzaron los anuncios de desarrollos nanotecnológicos. Por ejemplo, el vicepresidente de IBM, J.A. Armstrong, ese año presentó su plan de inversiones nanotecnológicas, comparando la futura revolución con la “micro” de los ‘70.

Las promesas de beneficios futuros de la nanotecnología tardan en llegar y muchos empiezan a sospechar que, tal vez, tarden demasiado o nunca lleguen.

Esta situación, claramente, se ha transformado, en los últimos años, en un problema para el financiamiento de la actividad.

1.1.4 La práctica tecno-científica

Una tecnología no se define solamente como un problema disciplinar; para un entendimiento acabado, es necesaria la caracterización social que la acompaña.

De acuerdo a la teoría del actor-red (ANT), la relación entre los actores involucrados le infunde significado, legisla su existencia y la materializa. Las tecnologías no son sólo herramientas que se utilizan o aplicaciones de la ciencia, sino que más bien se definen a través de argumentos y contra argumentos que, en algún momento futuro, se estabilizan en un plano social y se materializan sus estructuras (Latour y Woolgar, 1986) (Bijker y Law, 1992).

Cuando se busca describir a las tecnologías y las consecuencias de su aparición, es necesario considerar una multitud de factores derivados de la heterogeneidad de los actores. En este campo, interactúan no sólo los científicos con sus artefactos, sino también los gobiernos (y sus leyes), las universidades y los centros de investigación, el mercado empresario, los medios de comunicación públicos. Asimismo, no sólo interactúan actores humanos, sino que también elementos materiales y discursos escritos (inscripciones) que imponen su naturaleza, y se resisten. Por consiguiente, la red de actores está constituida por diversos elementos: discursos, materiales y humanos. La tecnología, en un sentido completo, es la culminación de la competencia entre lo material y discursos entre dichos actores (Latour, 1987).

Si bien el materialismo relacional de este enfoque es distintivo, tiene puntos en común con otras perspectivas sociológicas. El hecho de vincular el materialismo y las relaciones sociales se ha realizado tanto en el marxismo, como en muchas perspectivas feministas (Law, 1992); aunque en estas perspectivas, la relación entre estos dos elementos no se plantea de la misma forma continua como lo hace ANT. El enfoque es, pues, una teoría de la agencia, una teoría del conocimiento y una teoría de las máquinas. Y, más importante aún, se debería estar estudiando los efectos sociales, cualquiera que sea su forma material, si queremos dar

respuesta a las preguntas “macro” sobre la estructura, poder y organización. El análisis sociológico necesita incorporar a la materia como un actor, para entender en forma acabada la reproducción (Law, 1992).

Según Latour (1987), “...estudiamos la ciencia en acción y la ciencia o la tecnología no acabada; para hacerlo, ...o bien llegamos antes de que los hechos y las máquinas sean convertidas en una caja negra (blackboxed) o analizamos las controversias cuando esas cajas son reabiertas.”²⁰ (Introducción). La imagen sugiere tomar una proposición técnica e imaginarla entre comillas y en la boca de un orador. Luego, poner a todos ellos en una situación específica, en algún lugar del tiempo y del espacio, rodeado por máquinas y colegas. Se observa la controversia que se desarrolla fijando la atención en qué elementos nuevos aparecen con el objeto de convencer o seducir a sus colegas. Luego, se ve cómo la gente que ha sido captada deja de discutir, la imagen propuesta empieza a desaparecer, dando lugar a un cuadro donde sólo aparece la nueva frase técnica inscrita en un libro texto similar al inicial.

Siguiendo a Latour, se puede hablar de un “hecho”, solamente, cuando se estabilizó colectivamente a partir de controversias, y los nuevos documentos técnicos al respecto no sólo dejan de criticar la idea, sino que empiezan a confirmarla. En la medida que las controversias aumentan la literatura, se convierte en técnica. Esta controversia se realiza con una retórica que incluye amigos para soportar el argumento propio, referencias a textos antiguos y la búsqueda de ser citado a futuro (Latour, 1987).

Ahora bien, cabe preguntarse cómo se logra que una determinada idea sea aceptada. Latour dirá que se puede responder a través de “traducción”. Denomina traducción a un proceso mediante el cual los actores se definen y constituyen el uno por el otro, o bien, a la forma en que los actores atraen a otros agentes a posiciones favorables para los primeros (Callon, 1999a). De esta manera, supone un medio o un material en la que se inscribe, siendo la inscripción una medida de

²⁰ “We study science in action and not ready made science or technology; to do so, we either arrive before the facts and machines are blackboxed or we follow the controversies that reopen them.” (Latour, 1987, Introduction).

su éxito. Por ejemplo, una vez que otros tienen una particular representación del futuro, se ha producido la traducción (Latour, 1987).

Bruno Latour (1987) analiza la construcción argumentativa, como un proceso destinado a establecer legitimidad. Se refiere a los procesos de traducción original, como a la interpretación dada con la esperanza de atraer el interés de los demás. El éxito de una traducción implica inscribir a otras personas para sus intereses. Latour esbozó varias estrategias para traducir los intereses (Latour, 1987 p.108-9), y denominó aliados no sólo a los recursos que únicamente incluyen cifras y ecuaciones, sino también a otras asociaciones que representen a autoridades tanto de orden científico, social o político. La reputación de un investigador o instituto, su inclusión en los planes de estudio, en las citas científicas o técnicas, artículos, o el éxito con la recaudación de fondos, podrían servir para apoyar una idea. En este sentido, lo tecnocientífico es siempre social y se vincula a las cuestiones de legitimidad y de construcción de credibilidad en las comunidades.

1.1.4.1 La ciencia en la sociedad

En esta subsección, se contrasta la teoría propuesta por Bruno Latour con la de Bloor, defensor de una explicación social del conocimiento científico, y uno de los más importantes exponentes de la “*Sociology of scientific knowledge*” (SSK).

Si bien Latour comparte la importancia de lo social, se separa de la explicación puramente social del conocimiento científico de SSK, para sostener una visión ontológica del trabajo realizado por la actividad científica. Asimismo, le interesa el rol social de la ciencia, siendo su objeto de estudio, entonces, la ciencia en la sociedad.

Eve Seguin (2000) argumenta que, a pesar del ataque masivo a la teoría de Latour hecho por David Bloor (1999), el debate no se basa en un desacuerdo, sino en una incompreensión fundamental por parte de Bloor con respecto a cuál es el “campo” en cuestión. De hecho, la dificultad en aceptar el trabajo de Latour tiene que ver con el hecho de ser abordado desde el punto de vista de SSK. Bloor (1999) sugiere que los dos enfoques están destinados a explicar el mismo fenómeno de

diferentes maneras y son contradictorios. Para Bloor, Latour trata de desarrollar una alternativa a SSK para el estudio de la ciencia como conocimiento.

Si bien se reconoce el logro de SSK de secularizar el conocimiento científico, Latour plantea que el análisis de la ciencia en términos de creencias tiene un valor limitado, ya que ignora el carácter distintivo de la “ciencia como práctica”. Los seguidores de SSK no abordan esta cuestión porque su objetivo es eliminar la brecha que la epistemología establece entre la ciencia y las creencias ‘irracionales’. La ciencia difiere profundamente de otras cosmologías. La diferencia entre la ciencia y otras formas de “conocimientos” se encuentra en la actividad del laboratorio. Esto significa que la ciencia no debe ser considerada como una colección de creencias. Se trata de un conjunto de procedimientos que se activan en una realidad, mostrando, claramente, que ya no estamos en el estudio de la ciencia como conocimiento²¹. Contrariamente, SSK busca arrojar luz sobre los intereses sociales que condicionan la formación del conocimiento científico, su objeto puede ser llamado “la sociedad en la ciencia”.

Sin embargo, ambos enfoques tienen algo muy importante en común, comparten un micro-enfoque, marcado por una preferencia de conocer detalladamente “estudios de caso”; si bien, SSK se inscribe en la tradición que examina las condiciones de posibilidad de la tarea científica (e.g. Marxismo, feminismo), donde la única función que la ciencia puede ejercer es la de reproducir los intereses sociales dominantes y el orden existente. Asimismo, introduce como novedad, un análisis cuidadoso de los micro-mecanismos que explican el contenido de los conocimientos científicos (Seguin, E, 2000).

Resumiendo, el enfoque de Latour es original por cuanto combina una observación de la práctica científica a nivel micro, con una preocupación teórica sobre la organización de la sociedad. Asimismo, su enfoque abre nuevas posibilidades para el estudio de la función política de la ciencia. En particular, para el análisis del funcionamiento del discurso científico y el impacto de su práctica en la esfera pública (Seguin, E, 1996; 2001).

²¹ Latour teoriza sobre la función social ejercida por la ciencia, su objeto de estudio es “la ciencia en la sociedad”. Callon y Latour son taxativos al decir que a ellos “nunca les ha interesado dar una explicación social de nada, sin embargo quieren explicar la sociedad, la cual está compuesta principalmente por hechos y artefactos” (Callon y Latour, 1992 p.348).

Por último es importante destacar que lo presentado tiene claras implicancias políticas. Latour, en su libro *“Politics of Nature: How to Bring the Sciences into Democracy”* (2004), aporta un nuevo enfoque a las discusiones ontológicas sobre la "naturaleza". Este autor propone un cambio radical en las actuales concepciones de la "ecología política". Advierte que si separamos lo humano de lo no humano, los intereses sociales de la naturaleza y la política de la ecología, ponemos en peligro los cimientos de la democracia. La naturaleza no está para ser conquistada, pero tampoco para ser protegida como un objeto pasivo. Por el contrario, nuestras concepciones de “hechos naturales” y “realidad” deben ser reexaminadas para dar cabida a una política ecológica más amplia. Latour comparte con la tecnocracia un fuerte interés en dar cuenta de la centralidad de la ciencia en la sociedad contemporánea, y afirma: “...simplemente busca que la filosofía de la ciencia no haga solamente la mitad del trabajo de la filosofía política en las sombras.” (2004 p.84). El libro mencionado teoriza sobre el papel de la ciencia en forma de un tratado de filosofía política, argumentando que nuestra vida pública está compartimentada en dos: la política y la ciencia. La primera, se ocupa de los valores y la sociedad; la segunda, se refiere a hechos y a la naturaleza (y es oficialmente apolítica). Este autor presenta a esta organización como defectuosa y postula que la ciencia es un régimen absolutista por el cual el “orden natural” es construido por científicos a puertas cerradas. Para Latour, esta lucha exige una transformación republicana y el estudio de la ciencia es una forma de entender la sociedad en su conjunto.

1.1.4.2 Caracterización dinámica de la práctica científica: Régimen de búsqueda

El progreso científico de los últimos años ha sido impulsado por tres áreas: ciencias de la vida, de la información y de los materiales (entre las cuales está la nanotecnología). Debido al gran impacto de estas nuevas disciplinas, es importante preguntarse si son sustancialmente diferentes de las consolidadas (o tradicionales) con respecto a su práctica científica y a su emergente dinámica industrial. El análisis en detalle permite anticipar consecuencias para la formulación de políticas y en tal sentido, para la sociedad. Andrea Bonaccorsi (2008) desarrolla la noción de *régimen de búsqueda* como una caracterización de

la dinámica de la ciencia. Se proponen tres dimensiones a analizar: la tasa de crecimiento, el grado de diversidad interna y la naturaleza de la complementariedad. En su trabajo, sostiene que las nuevas ciencias siguen un patrón diferente de las ciencias establecidas.

Las nuevas disciplinas amplían la búsqueda de la explicación causal a fenómenos nuevos y más complejos. Analizan sistemas mucho más complejos²² que los sistemas físicos o químicos, por lo que requieren descripciones más “largas” y generan teorías de validez local (no grandes teorías unificadas). Si bien sigue siendo la aspiración reduccionista la que impulsa la búsqueda de explicaciones causales en la ciencia de materiales, su complejidad es creciente. Lo cual produce algunas explicaciones unificadas, al mismo tiempo que produce una cantidad creciente de subteorías especializadas.²³

Para explicar la dinámica de estos sistemas complejos nano, se necesita información sobre los elementos constitutivos, pero también conocer la arquitectura sobre la cual aquéllos se articulan (Kline, 1995). Los materiales a escala nano son sistemas complejos que presentan una jerarquía de dimensiones espaciales con fuertes interacciones entre los distintos niveles. El estudio de los sistemas complejos no reduce el número de teorías. En el nivel local, coexisten subteorías que compiten por explicar el comportamiento de los nanomateriales, siendo todas plenamente coherente con una teoría general sobre los elementos constitutivos. Los nanotecnocientíficos comparten una teoría fundamental común a nivel de elementos constitutivos, pero difieren en las explicaciones causales de aplicación local a cada jerarquía (espacial o temporal) del sistema complejo.

Si bien la complejidad de la nanotecnociencia imposibilita entender nuevas estructuras directamente desde propiedades macroscópicas, se puede descomponer y agregar información de la arquitectura. De esta forma, los

²² Si bien complejidad es un concepto controversial, este trabajo asume complejidad cuando existe un gran número de variables y formas de retroalimentación (Kline, 1995), cuando se presenta con un gran número de niveles jerárquicos interdependientes (Simon, 1981) o cuando las condiciones iniciales modifican la propia dinámica del proceso, (c) la dinámica de sistemas complejos depende de la inicial condiciones (Ruelle, 1993).

²³ Esta dinámica afecta las nuevas prácticas científicas y su política asociada. Si bien se presenta contraintuitiva, es útil remitirse a la literatura sobre el problema de los límites al conocimiento científico y la imposibilidad de explicación (Casti y Karlqvist, 1996) (Barrow, 1999)

materiales pueden ser diseñados; se observa y se manipula el material al mismo tiempo. Se utiliza una metodología reduccionista, cuya dinámica rompe los límites entre lo natural y lo artificial.

La evidencia presentada por Andrea Bonaccorsi (2008), utilizando métrica de publicaciones científicas²⁴, habla de una nanotecnociencia que crece rápidamente, en diferentes direcciones y hace uso de nuevas formas de complementariedad. Los estudios específicos confirman que el patrón de crecimiento en la primera década ha sido exponencial con una tasa constante de crecimiento del orden del 14% este orden de magnitud (Darby y Zucker, 2003). Claramente, la nanotecnociencia es un “régimen de búsqueda divergente”, un modelo dinámico donde las conclusiones de un proyecto dan origen a nuevas hipótesis que se constituyen, luego, en nuevos programas de investigación. Asimismo, propone una visión interesante sobre el tipo de complementariedad que se observa en nanotecnociencia.

Gran parte de los inventores (patentes) son también autores de artículos científicos, y una gran parte de los fundadores de nuevas empresas son también inventores o autores. El autor encuentra evidencia de un sistema de conocimientos altamente interconectado en el que los logros científicos se traducen en resultados patentables, formación rápida de empresas donde los científicos tienen un rol preponderante. Durante los últimos 15 años, la nanotecnología ha crecido por encima del crecimiento de la ciencia y de la tecnología en general (con cifras sorprendentes para los artículos: 14% contra un promedio de 2%) y es una disciplina divergente (utilizando como indicador la tasa anual de aparición de nuevas palabras clave).

Resumiendo, si bien la nanotecnología tiene antecedentes disciplinarios en la física y en la química, su dinámica es diferente. En primer lugar, los nuevos campos de investigación dentro de la nanotecnociencia crecen en forma exponencial con el tiempo, se observa una aceleración en las tasas de crecimiento después de la entrada. En segundo lugar, los campos siguen una dinámica

²⁴ Según el autor, el único objeto de observación es el resultado producido por los científicos en la literatura. Se centra en algunas propiedades estadísticas de las palabras nuevas: la tasa de crecimiento después de la primera entrada, el efecto de la composición (relación entre las palabras nuevas y viejas en las disciplinas) y el índice de concentración.

divergente de búsqueda donde nuevas hipótesis se generan a partir de los paradigmas establecidos. En tercer lugar, surgen nuevas formas de complementariedad, tales como procesos de desarrollo de la competencia sin integración, nuevas formas de utilización de infraestructura existente y la cooperación institucional entre los distintos tipos de actores.

1.2 El mercado

La práctica nanotecnocientífica presentada en la sección anterior interactúa con la sociedad, lo cual comienza a dar forma a un mercado donde se comercializan los nanoproductos. El objetivo de esta sección es describir la constitución de ese mercado. Para ello primeramente analizaremos el concepto de mercado y su diseño, para luego aplicarlo al contexto nano.

Como punto de partida, es importante notar que ciertos defensores a ultranza del mercado, sostienen que éste permite la iniciativa privada, regula la escasez de recursos y logra, mediante innovaciones, satisfacer las necesidades de la sociedad en el largo plazo. Si bien estas ventajas del mercado están en discusión, el planteo tradicional no aborda la cuestión fundamental: si los mercados se presentan como solución, ¿qué tipos de mercados se deben diseñar y cuál es su organización socio-técnica? (Callon, 2009). Los mercados tienen indudables ventajas que los hacen insustituibles en un contexto occidental capitalista: sus agentes autónomos innovan, permiten la coordinación de agentes y facilita contratos entre partes que no surgirían en un contexto planificado centralmente. Ahora bien, los mercados tienen claros límites: no están diseñados para lograr el bien público y producen externalidades negativas sobre grupos humanos que no son tenidos en cuenta (Callon, 2009).

Por tanto, es necesario volver a considerar las cuestiones básicas sobre los mercados y cómo podemos garantizar que funcionen correctamente (Callon, 2009). Para ello, es primordial prestar especial atención al rol de los experimentos realizados en el mundo real, los cuales despiertan una controversia que abre un debate superador del enfoque meramente económico, incluyendo aspectos políticos, regulatorios y sociales. Lo anterior, permite asegurar entonces que el diseño es un proceso de mutua interacción, el proyecto necesita ser validado por

la experimentación y ésta, actúa sobre el primero (Roth, 2008). Ahora bien, estos mercados cuentan con agentes económicos que interactúan en ellos para lograr la constitución del mismo. Este trabajo interpreta a estos agentes como híbridos colectivos de cálculo y a los mercados, como acuerdos socio-técnicos. Asimismo, se analiza cómo, las diferencias en la capacidad de realizar cálculo de cada uno de ellos, definen claramente asimetrías de poder en el mercado.

La propuesta de esta tesis es focalizar en mercados reales, dejando de lado los abstractos, reconociendo el creciente papel de los experimentos en la concepción de los mercados, destacando el rol fundamental que las tecnologías tienen en la constitución de los mercados económicos y el papel, evidentemente, performativo de las teorías económicas (Barry y Slater, 2002). Esta interacción entre la tecnociencia y los mercados produce lo que Marilyn Strathern (2000) denomina, la proliferación de nuevas identidades, creando, constantemente, nuevas incertidumbres acerca de la constitución de lo colectivo. Estas nuevas identidades que emergen exigen un nuevo abordaje. Se requieren nuevos procedimientos, nuevas instituciones que permitan entender la relación entre mercado y democracia (Callon, Lascoumes y Barthe, 2001).

Esta sección, primeramente, analizará el diseño de mercados y el rol de los experimentos económicos y luego, lo describirá como un proceso de co-constitución entre colectivos híbridos que tienen capacidad de cálculo.

1.2.1 El diseño de mercados

Los economistas han adquirido una experiencia considerable en el diseño de mercados concretos en los últimos años (Roth, 2008). Estas experiencias de diseño enseñan que las operaciones y las instituciones son más importantes que lo anteriormente se suponía. Por lo que se ha ido reemplazando la tarea tradicional del análisis estilizado de los mercados por el desafío de diseñar los mismos. Esto exige un análisis detallado que involucra diversos actores: empresarios, políticos, reguladores, abogados matemáticos, etc. Wilson (1992) presenta un amplio

panorama de la literatura sobre diseño de subastas²⁵, donde se destacan los trabajos teóricos de Myerson (1981)) y Bulow y Roberts (1989). En particular, los mercados de energía eléctrica han sido un buen ejemplo de la importancia del diseño en un contexto donde lo económico se encuentra inexorablemente vinculado con lo político y lo regulatorio (Wilson, 2002).

A nivel técnico, muchos de estos nuevos mercados presentan el problema de tratar con productos complementarios, no sustitutos. Además, el diseño frecuentemente requiere rapidez; en algunos casos transcurre tan sólo un año entre que se requiere y se implementa (Roth, 2002). Para el diseño de un nuevo mercado se puede aprender mucho de la historia de los mercados relacionados. En la década de 1990, la teoría de juegos comenzó a tomar un papel muy importante en el diseño de mercado, dando lugar a una nueva disciplina que Alvin Roth (2002) propuso denominar “*design economics*”. Si bien la teoría de juegos proporciona un contexto desde el cual abordar el diseño, es fundamental incorporarle la necesidad de detalle requerido por los mercados concretos. El diseño del mercado exige un enfoque ingenieril que complemente la teoría de juegos con experimentos y la resolución de modelos computacionales (Roth, 2002).

1.2.1.1 El rol de los experimentos económicos en el diseño de los mercados

Jean-Baptiste Say (1841) fue uno de los primeros autores en afirmar que la economía es una ciencia experimental y debería dedicarse a la observación y a la recolección de los hechos a fin de señalar las regularidades causales. Sin embargo, dejó claramente a la economía fuera del laboratorio, reservado para las ciencias naturales. La economía recién entra en los laboratorios a principios de la década de los sesenta (Smith, 1962). Desde su creación, la economía experimental ha tenido que justificar su validez fuera del laboratorio (Guala, 2002). Es importante notar que al definir las condiciones para la validez externa de un experimento económico, Vernon Smith (1989) establece que el laboratorio experimental debe ser real, contar con personas reales, bienes reales y dinero real.

²⁵ La literatura económica sobre diseño de mercados se remonta al artículo de Vickery (Vickery, 1961) sobre subastas.

Una segunda característica de la economía experimental es su capacidad manipuladora. Esto lleva a un tercer aspecto importante de la economía experimental: su objeto. Según Vernon Smith, los experimentos son un medio para contrastar teorías económicas; su objeto son las teorías, no el comportamiento humano (Muniesa y Callon, 2007a). El entorno experimental pretende imitar las teorías económicas, no la actividad económica concreta (Smith, 1994). El contexto es, por consiguiente, un "sistema micro-económico" controlado y estable donde los agentes económicos (caracterizados con funciones de utilidad) interactúan. El conocimiento así producido es legítimo en la medida en que permite contrastar hipótesis derivadas de las teorías económicas en cuestión²⁶. Muchas veces el objetivo de un experimento es convertir una teoría compleja en un conjunto explícito de reglas y comportamientos. Este vuelco hacia lo explícito ya estaba presente en los primeros experimentos de (Chamberlin, 1948). Los experimentos pueden llevarse a cabo en las aulas, dentro de sistemas informáticos, o en un mercado real (Muniesa y Callon, 2007a).

En resumen, los experimentos económicos tienen un impacto performativo sobre los mercados; los investigadores describen un objeto producido por ellos mismos. Esto es claro cuando se trabaja dentro de un laboratorio. Para los experimentos que utilizan un mercado real como su campo de testeo (por ejemplo, cuando se permite utilizar una medicina en un área controlada determinada), el carácter performativo es aún más claro²⁷ (Muniesa y Callon, 2007a). En los mercados financieros, muchas veces se experimenta con nuevos productos (por ejemplo, derivados exóticos) (MacKenzie y Millo, 2003). Es más, muchas veces las economías nacionales pueden convertirse en un experimento para probar una doctrina económica (Ghannadian y Goswami, 2004). Cada vez más, los experimentos económicos son un elemento fundamental en el proceso de construcción de mercados. Y, sobre todo, en el caso de los experimentos a escala real; la controversia abre la posibilidad de ampliar el debate superando el enfoque meramente económico e incluir aspectos políticos, regulatorios y sociales.

²⁶ La generalización de los resultados experimentales se complica debido al localismo de los experimentos en cuestión, pero no es un impedimento (Burlando y Guala, 2005).

²⁷ El caso del control post-comercialización de los efectos de drogas farmacéuticas es un ejemplo concreto (Daemmrich, 2004).

1.2.1.2 La co-constitución del mercado

El diseño de mercados es un proceso de mutua interacción; el proyecto necesita ser validado por la experimentación y ésta, actúa sobre el primero (Roth, 2008). Ahora bien, estos experimentos pueden ser *in vitro* o *in vivo*, coexistiendo en un proceso de permanente intercambio. Para esto, deben existir redes que organicen y faciliten las relaciones entre ellos de manera de permitir el avance de los conocimientos teóricos sobre los mercados, por un lado, y los dispositivos materiales e institucionales, por el otro. Estos experimentos se han ido estableciendo progresivamente en los mercados, y han permitido su mejoramiento permanente. En particular, en los nuevos mercados, donde todo tiene que ser inventado; ni los economistas, ni los agentes económicos habituales pueden diseñarlos sin ayuda. Tienen que cooperar y aceptar que otros actores están involucrados y que, en contextos de incertidumbre, el proceso de diseño debe consistir, necesariamente, en un largo proceso de ensayo y error (Callon, 2009).

La eficiencia de un experimento de mercado radica en organizar la discusión de los asuntos de interés que emergen de su propio funcionamiento, contemplando los desbordes (Externalidades). Se deben establecer procedimientos para facilitar la evaluación de soluciones teóricas o prácticas a esos problemas. Este enfoque otorga centralidad a los experimentos y abre los debates; se presenta como un par problemático indivisible, lo económico y lo político (que muchas veces intenta ser excluido) (Callon, 2009).

En los mercados, emergen cuestiones donde la incertidumbre es tal que no se sabe cuál es el enfoque adecuado para resolverlos. No es claro si el abordaje debe ser político, económico o tecno-científico. Callon sostiene que ni la economía ni la política ni la ciencia pueden ser consideradas como realidades acabadas y estancas. Callon centra su posición entre el constructivismo social (lo que se considera como el político, económico y científico, es simplemente el resultado de un enfrentamiento entre grupos que luchan por imponer sus propios puntos de vista) y el esencialismo (hay una o más definiciones de la política, la economía y la ciencia, que proporcionan criterios objetivos que permiten decir, a priori, si un comportamiento, forma de pensar o dispositivo es político, económico y científico). Los mercados, en fase experimental, resaltan este proceso de

reconfiguración conjunta. Este enfoque permite una problematización multidimensional, constituyendo una red de problemas. Es más, la configuración del mercado puede dar prioridad a un enfoque sobre otro, y esto no es casual, sino que es parte del diseño. Se puede encontrar, entonces, que la dimensión política quede reducida a su mínima expresión.

En el experimento, aquéllos que diseñan e implementan los nuevos mercados deben contestar preguntas emergentes, tratando de no encerrarse en organizaciones existentes y permitiéndose innovar en busca de la solución. Incorporando esta problematización en el proceso de diseño, se construye una economía política compleja. Asimismo, en este proceso, las ONG se convierten en socios legítimos e inevitables. Este mercado en proceso de diseño evoluciona transformando la economía, la política y la ciencia que lo rodea. Por lo que experimentar nuevos mercados tiene un carácter performativo de la realidad y es una acción política. Los procedimientos que se diseñan en el mercado son dialógicos. Se debe permitir que todos los actores concernidos por el diseño y el funcionamiento de un mercado puedan expresarse y luego, analizar las cuestiones y comparar las soluciones propuestas (Callon, 2009).

1.2.1.3 Mercados eficientes

Roth sostiene que el funcionamiento eficiente de los mercados requiere (1) densidad (para atraer a un número suficiente de participantes), (2) superar los problemas de congestión que puede traer la cantidad de agentes operando (realizar transacciones con suficiente rapidez que permitan a los agentes tomar decisiones), y (3) que sea seguro y simple. Asimismo, debe contemplarse que algunas operaciones están moralmente excluidas, lo cual es una limitación a tener en cuenta al diseñar el mercado. Por último, el autor destaca el rol que tienen los experimentos en el diagnóstico y la comprensión de las deficiencias del mercado, en contrastar el éxito de un diseño y en la comunicación de resultados a los responsables políticos (Roth, 2008).

Tradicionalmente, se reconoce la importancia de la densidad de los mercados, pero no siempre se contemplaron los temas de la congestión, la seguridad y la sencillez. Una forma de evitar la congestión de los mercados es emplear una

cámara de compensación centralizada para coordinar el mercado donde un algoritmo aprobado realice las asignaciones. Ahora bien, Roth (1984) demuestra que la evolución de los mercados puede hacer imposible que el algoritmo funcione eficientemente frente a transformaciones²⁸.

1.2.2 Los mercados como un proceso de co-constitución

La tradición occidental ha establecido una clara distinción entre el individuo y lo colectivo²⁹, generando una relación dialéctica que ha dominado la producción en ciencias sociales (Callon y Law, 1997). En el caso particular de la ciencia económica, la noción de racionalidad limitada de Herbert Simon (1982) ha obligado al *homo economicus* a reconocer un contexto de objetos que lo condiciona. Las sociedades humanas son claramente diferentes; son heterogéneas y se constituyen en conjunto con tecnología, textos, bienes y capital. Asimismo, entender la sociedad como un mero conjunto de relaciones entre humanos, no captura la complejidad que conlleva una asociación colectiva de entidades heterogéneas donde los objetos y procedimientos no son simples recursos o restricciones, sino que pueden intervenir activamente para impulsar la acción en direcciones inesperadas (Callon y Law, 1997).

La presente subsección interpreta a los agentes económicos como híbridos colectivos de cálculo y su relación con las asimetrías de mercado. Primeramente, se definirá el concepto de híbrido colectivo, para luego analizar cómo éstos co-constituyen los mercados, vistos como acuerdos socio-técnicos. Por último, se analizará cómo las diferencias en capacidad de cálculo establecen asimetrías en el mercado.

1.2.2.1 De lo abstracto a lo real

En este contexto de interacción entre entidades colectivas heterogéneas, el mero concepto de “mercado” es problemático. Se presenta como un espacio abstracto en el que la demanda agregada y la oferta se cruzan entre sí; y, a través de ajustes sucesivos, terminan por definir el precio (Cournot, 1838). Esta concepción

²⁸ La congestión es un problema, especialmente, en mercados en los que las transacciones son heterogéneas y las ofertas no se pueden hacer a todo el mercado.

²⁹ Esta distinción no se da en otras culturas como, por ejemplo, la japonesa (Callon y Law, 1997)

presenta dificultades lógicas y teóricas, sobre todo, cuando se trata de explicar los mecanismos de agregación.

Para superar esta oposición entre los mercados abstractos y los concretos, se debe tomar como punto de partida la propia transacción, no la macro-estructura hipotética. La propuesta es, entonces, focalizarse en mercados reales, dejando de lado los abstractos, reconociendo el creciente papel de los experimentos en la concepción de los mercados. Se presenta, de este modo, al mercado como un conjunto de localidades donde el debate entre los grupos emergentes define las diversas maneras de organizar estos mercados, dependiendo de cuestiones relacionadas con los tipos de productos e interpretaciones del derecho de propiedad. Esto no significa que no hay proceso de estructuración de los mercados, sino más bien, que el proceso en sí es lo que se debate (Barry y Slater, 2002).

Las transacciones se describen mediante un doble proceso de entrelazamiento de actores y su posterior separación (Callon, 1998). Además, el mercado se presenta como una red de muchas y complejas relaciones donde el doble movimiento de entrelazamiento y separación explica cómo se forman los negocios bilaterales.

1.2.2.2 Acuerdos socio-técnicos

Michel Callon destaca el papel fundamental que las tecnologías tienen en la constitución de los mercados económicos y el papel, evidentemente, performativo de las teorías económicas (Barry y Slater, 2002). Esta interacción entre la tecnociencia y los mercados produce lo que Marilyn Strathern (2000) denomina la proliferación de nuevas identidades y que, constantemente, crea nuevas incertidumbres acerca de la constitución de lo colectivo. Estas nuevas identidades que emergen exigen un nuevo abordaje. Se requieren nuevos procedimientos, nuevas instituciones (Callon, Lascoumes y Barthe, 2001). Para resolver la cuestión del tratamiento democrático y participativo de la tecnociencia, se necesita entender la relación entre mercado y democracia.

Se puede resumir lo anterior argumentando que los mercados son acuerdos socio-técnicos (STA), que tienen tres características. Primeramente, permiten organizar la concepción, producción, circulación y transferencia de bienes. En segundo

lugar, se presentan como un conjunto de componentes heterogéneos: Normas, instrumentos técnicos³⁰, narrativas, conocimientos, así como las competencias y habilidades incorporados en los seres vivos. Y, por último, son un espacio de confrontación y luchas de poder que producen múltiples y contradictorias valoraciones de los bienes (Çalışkan y Callon, 2010).

Claramente, esta definición general permite distinguir a los mercados de otros tipos de organización. Contrariamente a lo presentado, el constructivismo se centra en los mecanismos "sociales" y analiza los mercados como una organización social más, perdiendo de vista la especificidad propia de la dinámica del mercado. Asimismo, reduce sus dimensiones materiales y técnicas a nociones generalizadas abstractas como "recursos" o "capital". Las relaciones sociales son el único elemento explicativo.

Ahora bien, postular que los mercados son acuerdos socio-técnicos no niega que la dinámica de los mercados distingue muy marcadamente entre las "cosas" a ser valoradas y transferidas, y las "Agencias" capaces de valorarlas y poseerlas. Una característica clave de la dinámica del mercado es la multiplicidad y diversidad de actores que compiten para participar en la definición de los bienes y valorarlos de acuerdo a sus intereses. Los objetos se presentan entrelazados, y el proceso de objetivación (que requiere una inversión monetaria) los separa (Thomas, 1991).

Ahora bien, si utilizamos la noción de "acuerdo", dejamos implícita una división entre humanos que organizan a las cosas que se dejan pasivamente utilizar. Esta es la razón por la cual Deleuze y Guattari (1998) propusieron la noción de *agencement*³¹, refiriendo a la capacidad de actuar de diferentes maneras, dependiendo de la configuración. No es posible separar las agencias y los acuerdos. En otras palabras, *agencements* refiere a acuerdos socio-técnicos considerados desde su capacidad de actuar, acorde a su diversidad de fuerzas (Çalışkan y Callon, 2010).

³⁰ El especial énfasis en materialidades y tecnicismos para entender los mercados no es una idea nueva, se encuentra ya presente en los escritos de Weber (1978 [1922]).

³¹ *Agencement* es una palabra francesa cuyo significado está muy cerca de "acuerdo", transmitiendo la idea de una combinación de elementos heterogéneos que se han ajustado entre sí.

Esta dinámica de los mercados tiene lugar en los colectivos híbridos (Callon y Law, 1997) a los cuales se denomina *agencements* socio-técnicos (STA). Éstos se componen de seres humanos y dispositivos materiales, técnicos y textuales. Dependiendo de las configuraciones, las agencias pueden ser deliberativas (McCarthy y Kelty), pueden tener capacidad de cálculo o no, pueden ser colectivas o individuales (Callon y Law, 2005).

Los mercados con su propia dinámica generan externalidades que impactan en la sociedad, impulsando espacios políticos de discusión e interacción. Si bien el enfoque tecnocrático económico tradicional propone dar cuenta de estas externalidades incluyéndolas en los modelos como variables, estos desbordes exceden lo técnico e impulsan una discusión claramente política. Se presenta, entonces, una confrontación entre el enfoque tecnocrático abstracto que intenta cuantificar externalidades sociales por un lado³², versus un enfoque político que propone un espacio de discusión por el otro. Por lo que el mercado no puede ser entendido como una categoría unificada³³, su organización depende de las actividades profesionales y de las tecnologías involucradas. De forma que las metáforas de amplia difusión en la literatura de “infraestructura subyacente” o la de *embeddedness* (Granovetter, 1985) dejan de ser útiles. Se postula que no existen las macroestructuras que sostienen las transacciones; lo que existen son relaciones en constante co-constitución.

1.2.2.3 Híbridos colectivos

Como se describe anteriormente, las sociedades humanas son heterogéneas y se constituyen en conjunto con la tecnología, los textos, los bienes y el capital. Es más, entender la sociedad como un mero conjunto de relaciones entre humanos, no captura la complejidad que conlleva una asociación colectiva de entidades heterogéneas donde los objetos y procedimientos no son simples recursos o

³² Polanyi, que tanto contribuyó a la comprensión de los mercados, también sostiene una definición abstracta de los mercados pues considera el mercado como un espacio de encuentro entre demanda y oferta (Polanyi, 1957).

³³ Como lo ha sido hasta la primera mitad del siglo XX.

restricciones, sino que pueden intervenir, activamente, para impulsar la acción en direcciones inesperadas (Callon y Law, 1997).

Siguiendo la literatura mencionada, se propone capturar la idea presentada utilizando el concepto de colectivo híbrido.

Bruno Latour (1999a) nos presenta un ejemplo de lo anterior: “Pasteur”. Claramente el ser humano Pasteur ha logrado realizar lo que figura a su nombre porque una red de elementos a su alrededor le dio la posibilidad de realizar su práctica científica diaria. En el proceso de esta conformación del colectivo híbrido interactúan personas, dispositivos y textos. Es importante destacar que no hay diferencia entre la persona y la red de entidades en las que actúa. O más precisamente, entre la persona y la red de entidades que actúan a través de ella, constituyéndose como el producto de un proceso de composición conjunta. Las entidades no son naturales, sino efectos relacionales. Por lo tanto su forma, su contenido y sus propiedades son producto de ese proceso relacional, y su identidad surge en el curso de la interacción. Son procesos de transformación, de compromiso mutuo y de negociación (Callon y Law, 1997).

En la economía, los agentes no maximizan sus utilidades, solamente, gracias a su capacidad mental individual, son también híbridos colectivos. A modo de ejemplo, imaginemos una alta ejecutiva de una gran empresa que es la presidenta durante un proceso de crecimiento exponencial de la corporación y cuenta con una experiencia notable en el mercado. Es fácil imaginar, entonces, que es una estrategia ejemplar, activa y energética. Ahora bien, ¿qué pasaría si elimináramos sus teléfonos, su fax y los informes que tiene sobre su escritorio? Seguramente, dejaría de ser la estrategia empresarial conocida.

Ahora bien, estos híbridos colectivos presentados interactúan en diferentes entornos, en particular, se relacionan y calculan para constituir mercados.

1.2.2.4 Los mercados como híbridos colectivos de cálculo

En el mercado, los híbridos colectivos, claramente, deben realizar operaciones de cálculo. Se propone, entonces, conceptualizarlos como dispositivos colectivos de cálculo (Callon y Muniesa, 2003). Ahora, si bien, notoriamente, el cálculo es una

característica del mercado, la pregunta es: ¿quién realmente calcula y cómo? En la literatura, se encuentran dos respuestas antagónicas. Mientras que, para la teoría económica neo-clásica, los agentes calculan ya que está en su naturaleza hacerlo, desde una perspectiva de antropología social, el cálculo es una racionalización ex post de las decisiones que, realmente, se toman en base a otras lógicas. Estas dos visiones son extremos que se deberían evitar para entender, verdaderamente, el mercado. Por un lado, no debe tomarse la visión formal económica de los mercados, que reduce a los agentes económicos a sus preferencias y aptitudes de cálculo; pero, tampoco, hay que deshacerse de la idea de cálculo y disolverla mediante descripciones etnográficas (Callon y Muniesa, 2003).

El proceso de valoración de los bienes surge de los intercambios mercantiles³⁴ mediante la realización de cálculos cruzados. Los agentes involucrados en estas operaciones son los dispositivos de cálculo (Çalışkan y Callon, 2010). Éstos cuentan con herramientas disponibles que no sólo permiten alcanzar ciertos fines, sino que contribuyen, activamente, en la constitución de su realidad (Rose y Miller, 2008). Estas valoraciones y cálculos se manifiestan, públicamente, como precios; luego de una lucha entre agentes que tratan de imponerse uno al otro (Weber, 1978 [1922]) (Stark, 2009). Los agentes calculan estos precios sobre la base de sus valoraciones³⁵, elaborando fórmulas de cálculo (Lepinay y Callon, 2009). Es importante notar que varios estudios han demostrado que los actores vinculan directamente la cuestión de la equidad de los precios a sus fórmulas de cálculo, reclamando que la construcción de las fórmulas sea justa (Guyer, J, 2009) (Muniesa, 2003).

Ahora bien, para especificar la noción de cálculo presentada, se propone partir del concepto de “centro de cálculo” desarrollado por Bruno Latour (1987). Se conceptualizan los agentes económicos como híbridos colectivos de cálculo, “centros de cálculo” (Latour, 1987). Agencias equipadas con instrumentos, el cálculo no se realiza sólo en las mentes humanas, sino que se distribuye entre los seres humanos y no humanos.

³⁴ Los encuentros pueden ser múltiples y se pueden producir cálculos superpuestos.

³⁵ Incluyendo otros precios, aunque se trate de una operación bilateral (Guyer, JI, 2004).

Se postula una definición general de cálculo como un proceso de tres pasos: En primer lugar, las entidades en cuestión deben ser separadas y colocadas en un espacio determinado. Luego se asocian entre sí, se manipulan y transforman materialmente. Finalmente, se extrae un resultado que se convierte en una entidad separable que puede circular en el mercado (Callon y Muniesa, 2003).

El concepto de configuración algorítmica del mercado ayuda a entender cómo es posible tener representaciones abstractas del mercado, que se pueden utilizar para actuar en mercados concretos. Ellos hacen explícito lo que llamamos las configuraciones algorítmicas del mercado, las cuales son acuerdos socio-técnicos; dispositivos de cálculo en el sentido que Callon & Muniesa (2003) le dan al término. En primer lugar, delimitan el grupo de agencias de cálculo haciéndolas identificables y numerables. Seguidamente, explicita el proceso de conexión y, por último, establece las reglas que gobiernan el orden en que las conexiones deben ser realizadas. Estas configuraciones algorítmicas de los encuentros no son estructuras existentes en las que las agencias de cálculo sólo circulan y se desarrollan. Los agentes participan en diversos grados en el diseño de los mercados en los que operan.

1.2.2.5 Asimetrías en los mercados

Algunos mercados se estructuran de tal forma que favorecen la creación de asimetrías, mientras que otros están más abiertos al debate sobre su funcionamiento y a su posible reorganización. No sólo el mundo privado interviene en su creación; los mercados son una extraña combinación de reglas definidas por los poderes públicos y agentes privados. En particular, el análisis de los diversos dispositivos de cálculo que actúan en los mercados permite entender las relaciones de dominación y sus asimetrías.

Como se dijo, los mercados son una combinación de reglas definidas por los poderes públicos y agentes privados. Algunos se estructuran de tal forma que favorecen la creación de asimetrías, mientras que otros están más abiertos al debate sobre su funcionamiento y a su posible reorganización. Es más, el análisis de los diversos dispositivos de cálculo con los que cuentan los STA permiten

entender las relaciones de dominación que definen los diferentes mercados. Son las diferencias en el poder de cálculo las que posibilitan que las agencias más poderosas sean capaces de imponer sus valoraciones y presionar por una mayor parte de la distribución de riqueza (Bourdieu, 2005).

Una forma de concebir las relaciones de dominación que atraviesan los mercados es inscribirlas en relaciones de cálculo (Hirschman, 1977). Es cada vez más difícil de ocultar las luchas de poder detrás de las transacciones comerciales. Ahora bien, este escenario de asimetrías y relaciones de poder nos lleva a preguntarnos: ¿cómo es posible realizar un cambio? Callon y Muniesa proponen que una de las primeras tareas de un estudio es identificar las fuerzas que participan en estas redes y entender cómo se interrelacionan. En este sentido, es fundamental el rol performativo de los experimentos en el proceso de aprendizaje para lograr mercados consientes y democráticos. Esto moviliza una verdadera ingeniería económica sobre la base de ensayo y error, abriendo la posibilidad de concebir nuevas formas de organización y teorización (MacKenzie, 2009) (Callon, 2009).

1.3 La dinámica industrial

La práctica nanotecnocientífica tiene el potencial de hacer converger varias disciplinas, que notoriamente, se manifiesta en su dinámica industrial, con claras expectativas de trascender la innovación industrial propia, transformando otras (Bozeman, Larédo y Mangematin, 2007). Una rama específica de la nanotecnología, de particular importancia para este trabajo, es la nanomedicina. La misma se define, simplemente, como las aplicaciones médicas de la primera, incluyendo el desarrollo de nuevos procedimientos para diagnosticar y curar enfermedades (Paradise et al., 2008).

Esta sección, primeramente, describe la dinámica industrial de la nanotecnología para luego, analizar en particular las aplicaciones médicas. A continuación, se aplica la metodología propuesta por Callon y Muniesa (2005) para explicar el proceso de co-constitución del mercado de nanoportadores. Por último, se describen dos casos de proyectos nano, uno global y otro caso en Argentina.

1.3.1 Dinámica industrial de la nanotecnología

Si bien el desarrollo económico de la nanotecnología está apenas comenzando, se presentan diferentes caminos de desarrollo futuro (Kahane y Mangematin, 2007). Comparando con la dinámica de la microelectrónica o con la de la biotecnología, Larédo et al. (2009) sostiene que existen al menos tres diferencias importantes. La primera se refiere a una diferente interacción entre las grandes empresas industriales los nuevos (start-ups). La segunda, se refiere al grado de concentración geográfica de la nanotecnología. La tercera, es la organización industrial de la nanotecnología. El enfoque de *top-down* (en consonancia con la Ley de Moore) permitió a la microelectrónica reducir tamaño y aumentar la densidad de los circuitos en el semiconductor. Por el contrario, la biotecnología propone procesos de innovación *down-top* (Larédo et al., 2009).

Las estadísticas sobre las publicaciones y las patentes en nanotecnología la presentan como una disciplina donde se insiste en la importancia de las tecnologías complementaria. La nanotecnología requiere de importantes plataformas tecnológicas. Por su parte, Darby y Zucker (2003) prevén un modelo de desarrollo similar a la biotecnología, con la presencia de científicos de renombre, vínculos estrechos entre las universidades y la industria, una organización eficaz de transferencia de tecnología, la creación de empresas basadas en la investigación y el capital riesgo para financiar las fases iniciales de desarrollo. Esta nueva ola tecnológica es muy diferente de las anteriores. Primeramente, se observa la inserción de nano S & T en el mercado de los productos existentes para mejorar aspectos específicos; de ahí la importancia de las inversiones realizadas por grandes empresas líderes mundiales en sus respectivos mercados masivos. Un segundo horizonte, por ahora difícil de especificar, plantea la integración de los conocimientos ("convergencia NBIC") y se basará en la creación de empresas que iniciarán nuevos nichos de mercado (Larédo et al., 2009).

En general, el grado de madurez de una nueva tecnología define tanto las condiciones cognitivas como la dinámica industrial de creación de conocimiento.

En la práctica científica, la exploración de hipótesis se lleva a cabo en un ambiente turbulento, donde la introducción de nuevas soluciones técnicas amplifica la incertidumbre en lugar de reducirla. En el mercado, la llegada de una tecnología radicalmente nueva genera nuevos proyectos (Bozeman, Larédo y Mangematin, 2007). Tanto en las industrias existentes o estimulando la creación de nuevas. Hite y Hesterly (2001) señalan que durante las primeras etapas de una nueva industria, las nuevas empresas enfrentan una gran incertidumbre y la circulación del conocimiento equivale a la circulación de los investigadores o ingenieros (Bozeman y Mangematin, 2004).

Zucker et al. (2007) hacen hincapié en la proximidad geográfica, en la creación de empresas de alta tecnología y en la circulación de conocimiento tácito a través de los recursos humanos, similar a la historia reciente de la biotecnología.

En particular, ahora se supone que, incluso en la biotecnología, ha habido relativamente poco desplazamiento de los operadores tradicionales, impulsando la idea de que la "destrucción creativa" se llevó a cabo dentro de las grandes empresas existentes (especialmente, las empresas farmacéuticas). Esto no descarta el papel de la creación de nuevas empresas, pero requiere de un reposicionamiento en relación con nuestra comprensión de la dinámica de un campo emergente. La nanotecnología se encuentra en estadio inicial de su ciclo de vida y todavía falta acumulación de conocimiento para fomentar innovaciones (Darby y Zucker, 2003; Zucker y Darby, 2005) (Robinson, 2009).

Por último, mientras Bonaccorsi y Thoma (2007) demuestran la importancia de los vínculos heterogéneos en nano patentes, Zucker et al. (2007) muestran la importancia de los vínculos institucionales previos.

1.3.2 La industria de la Nanomedicina

En el presente trabajo, se define Nanomedicina como las aplicaciones médicas de la nanotecnología, lo cual incluye el desarrollo de nuevos procedimientos para diagnosticar y curar enfermedades (Paradise et al., 2008). En particular, se están produciendo comercialmente nuevas drogas, dispositivos de diagnóstico e

implantes utilizando nanotecnología, los cuales serán brevemente descriptos a continuación.

La reformulación de la droga en forma de cristales de tamaño nanométrico genera versiones de fármacos existentes que tienen mayor solubilidad. Esto reduce el volumen necesario de dosis, disminuyendo los efectos secundarios adversos. Por otro lado, la inserción de las drogas dentro de una nanocápsula puede permitir la administración de fármacos específicamente a las células tumorales (Bawarski et al., 2008) (Davis, 2008).

Otro campo de acción es el de diagnóstico médico. Mediante el uso de diversos tipos de etiquetas, ciertas nanoestructuras pueden detectar la presencia o actividad de entidades moleculares específicas en el cuerpo³⁶ (Chan, 2006). Asimismo, se han desarrollado varios tipos de dispositivos de diagnóstico de mano que pueden verificar la existencia de una determinada proteína (Van Kasteel, 2009).

El uso de nanomateriales en dispositivos médicos implantables posee una oportunidad de mercado en los EEUU, debido a que en el mercado se espera un aumento del 9% anual durante los próximos años sobre los 27 mil millones de dólares anuales que mueve este mercado. Cada vez es mayor el alcance que debe darse a la satisfacción de las necesidades de dispositivos implantables, básicamente por la perfección con la cual se debe realizar los mismos para evitar que éstos sean rechazados ante la colocación, y que los mismos puedan llegar a causar alguna enfermedad (Harris y Graffagnini, 2007). Existen diferentes empresas que se dedican a la fabricación o perfeccionamiento de estos dispositivos. La empresa AcryMed utiliza nanopartículas de plata para prevenir las infecciones al realizar los implantes y no alterar sus funciones. Por su parte, Nanotecnologías Altair trabaja con el Consejo Nacional de Investigación de Canadá para realizar revestimientos ortopédicos con dióxido de titanio, lo que otorga dureza y resistencia en los implantes. Nanotech Catheter Solutions: Nanotecnología Soluciones desarrolla catéteres y stents con nanotubos de carbono. Nanicopeia es una empresa que desarrolla la incorporación de

³⁶ Los “puntos cuánticos” son nanocristales semiconductores fluorescentes que identifican las células cancerosas en el cuerpo al unirse a las células tumorales y emitir diferentes colores dependiendo del estado de enlace.

nanomateriales para mejorar los dispositivos médicos, así como la creación de recubrimientos avanzados y formulación de nuevas drogas (Harris y Graffagnini, 2007).

Claramente, los incentivos que impulsan a las empresas a utilizar nanotecnología en la medicina, se relacionan con el aporte que genera a la producción de nuevas y mejores drogas, debido a la reducción del consumo de energía al producirlos, al abaratamiento de los insumos que se requieren en la producción, al uso de nuevos materiales que suplantando a materiales que contaminan el medio ambiente y a la posibilidad de establecer nuevas patentes. Si bien los incentivos son muchos, también existen problemas con el uso de esta tecnología desde el punto de vista empresarial. Los desincentivos de las empresas en el uso de nanotecnología vienen dados por el tiempo que se tarda en comercializar los productos desarrollados, los efectos de generar consumidores *free raider* sobre los productos, los riesgos que pueden acarrear el patentamiento de los productos, la contaminación ambiental con algún nanomaterial, así como la percepción pública de estos riesgos del uso de nanotecnología, la cual puede acarrear una oposición frente al uso de esta (Bhattacharya, 2007).

Ahora bien, el gobierno juega un papel clave en el desarrollo estratégico. Por un lado, el crecimiento de la nanotecnología depende de la financiación pública para impulsar la investigación innovadora. Esto produce un crecimiento de la economía, pues se logra construir un puente entre la investigación básica y la comercialización de los productos nano. Asimismo, la nanotecnología es utilizada en algunos países como herramienta de defensa nacional en cuanto a la capacidad que posee de generar productos militares. Por otro lado, el gobierno vislumbra claros problemas con el uso de nanotecnología tales como los riesgos ambientales y el posible monopolio por uso de patentes exclusivas (Bhattacharya, 2007).

En Marzo del año 2009, la *Food and Drug Administration* (FDA) realizó una asociación con la *Alliance for NanoHealth*³⁷ para ampliar el conocimiento de cómo las nanopartículas impactan en los sistemas biológicos, de forma de desarrollar procesos que reduzcan los posibles riesgos asociados. Las partes

³⁷ FDA publicó un comunicado de prensa en la sección de noticias de FDA.gov en Marzo 2009 anunciándolo. El mismo puede consultarse en <http://www.fda.gov/hbs/topics/NEWS/2009/NEW01971.html>

dejaron claro que esta colaboración tiene dos objetivos principales³⁸. En primer lugar, incentivar el avance de la nanomedicina, comenzando con las fases preclínicas de desarrollo, continuando con las clínicas y, por último, apoyar su comercialización. En segundo lugar, comprometerse a trabajar para mejorar la comprensión de los riesgos y beneficios del desarrollo de productos nanoingeniería médica en la medida en que esta información puede ayudar a la regulación y evaluación de productos nanomédicos. En particular, las partes reunidas en Octubre del año 2008 establecieron siete prioridades que desagregan los dos grandes objetivos mencionados. La primera, es determinar la capacidad de distribución de los portadores de nanopartículas. Luego, se mencionó la importancia de entender las dosis administradas por las mismas. La tercera y cuarta prioridad marcan la necesidad de desarrollar modelos matemáticos (y computacionales) que permitan predecir los diferentes riesgos y beneficios de su uso. La quinta enfatiza la necesidad de establecer normas para los protocolos de los materiales. La sexta se relaciona con el transporte masivo en el cuerpo humano. Finalmente, la última, se propone el desarrollo de un conjunto de herramientas analíticas para la fabricación de nanopartículas con fines médicos (Maebius, S. y Jamison, 2008).

1.3.2.1 Patentes

La nanomedicina comercial se encuentra en la etapa de desarrollo aunque ya se han producido algunos productos realmente innovadores. Sin embargo, la industria tiene muchos desafíos por delante en los aspectos legales, ambientales, de seguridad, de ética y, en particular, los relacionados a la reglamentación de las patentes.

Solicitar una patente en nanomedicina no es algo fácil, debido a la preocupación de los evaluadores sobre si se puede considerar que la nanotecnología no produce riesgos en la salud y la seguridad de las personas. La experiencia de la industria biotecnológica acerca estrategias de licenciamiento, desarrollo y financiamiento a

³⁸ El "*Memorandum of Understanding*" entre las partes está publicado por el registro Federal de EEUU el día 13 de Marzo de 2009 (72 FR 10927).

la nanomedicina, pues presentan características comunes. Primeramente, las nuevas aplicaciones industriales en ambos sectores dependen fuertemente de la propiedad intelectual (IP) que surge de los laboratorios (tanto universitarios o corporativos). En segundo lugar, la investigación y el desarrollo es costoso, complejo e incierto. Por último, la empresa que desarrolla la tecnología puede no ser la misma que lleva el producto final al mercado (Stewart, 2005).

Uno de los problemas para el futuro desarrollo de la industria es la aprobación de las patentes. Ahora bien, tener un derecho de propiedad intelectual implica contar con un activo intangible, siendo necesario para poder ser patentado, cumplir ciertos requisitos. A saber, debe poder ser considerado una invención nueva con respecto a todo lo que fue patentado en el pasado; debe tener utilidad, y debe estar bien descrito a manera de demostrar su posesión, entre otras características. Por otro lado, el cumplimiento de los requisitos no es garantía del otorgamiento de la patente, debido a que este es un proceso largo, caro y tedioso por el hecho de tener que pasar por el proceso de examen (revisión de la patente), de intercambio de documentos entre los que examinan y los abogados de quienes piden la patente, de aviso de derecho de emisión (el cual se da, si la patente cumple con los requisitos) (Bawa, 2007).

El pedido de patentes se realiza en base a un incierto flujo de beneficios futuros, al que los inversores consideran que les generaría ganancias a posteriori (por lo que realizan la inversión en investigación y desarrollo). Claramente, entonces, los pedidos de patentes son un indicador de actividad y es relevante, económicamente, su cuantificación. Para medirlas se toman en cuenta distintos parámetros: el alcance, la aplicabilidad en otros campos, entre otros. Sin embargo, los expertos consideran que el sistema de patentamiento hoy en día produce una limitación por las batallas legales a las que deben enfrentarse para el otorgamiento de la misma. Esto genera ciertos temores ante la posibilidad de que el otorgamiento de las patentes retarde en cierto sentido el avance en la industria tecnológica. Ahora bien, por otro lado, un exceso de patentes en el mercado obligará al gobierno en cuestión a actuar para evitar comportamientos monopólicos, defendiendo una competencia leal para fomentar una mayor cooperación.

1.3.3 La co-constitución del mercado de nanoportadores

Como un ejemplo de aplicación de lo expuesto en la subsección anterior, ésta se focaliza en entender la formación del mercado de comercialización de nanotransportadores³⁹ (elementos de dimensiones nano que transportan drogas directamente al lugar donde son necesarias en el cuerpo humano) y de sus patentes. El presente trabajo de investigación aplica la metodología propuesta por Callon y Muniesa (2005). Este análisis posibilitará, luego, analizar sus riesgos y sus métodos de valuación de inversiones.

En el caso de la nanomedicina, claramente, el mercado todavía está en formación⁴⁰, y asumir un mercado abstracto que explique el modelo de precios, sería muy problemático. Por lo que se propone empezar analizando las transacciones concretas, como relaciones entre los agentes. Esta metodología de análisis se conoce en economía como “microfundación”, la noción refiere a un conjunto de transacciones entre un número limitado de agentes, un número limitado de productos y en un marco regulatorio en cambio.

Por lo anterior, y siguiendo a Callon y Muniesa (2005), esta investigación rastrea las relaciones que, partiendo de la práctica científica (registro de patentes), se transfiere a las empresas (uso de patentes y producción de nanoportadores) y permite que la nanomedicina llegue a los usuarios (facilitado por sus médicos). Esto se hace explícito en lo que los autores llaman, configuraciones algorítmicas de los mercados.

1.3.3.1 Objetivación y singularización

En primer lugar, es necesario poder objetivar los bienes mencionados. Las características y propiedades, tanto de la patente como del nanotrasportador,

³⁹ En particular, el uso de nanotransportadores puede ofrecer muchas ventajas sobre el uso de medicamentos directamente en el torrente sanguíneo: protegen la droga de la degradación prematura, impiden que las drogas actúen antes de tiempo, aumentan la absorción de los medicamentos en el tejido destino y mejoran la penetración intracelular.

⁴⁰ Como se vio anteriormente, el concepto tradicional de mercado conlleva la existencia de un espacio abstracto en el que la demanda y oferta se encuentran y, por sucesivos ajustes, terminan por definir el “precio”. El problema surge con los mercados incompletos, en formación o con pocos agentes.

deben ser detalladas. Ambos bienes tienen propiedades objetivas⁴¹ que permiten la aplicación y la transferencia de los derechos de propiedad.

En una transacción de mercado, un bien se vende por un precio que, como consecuencia, conlleva un cambio de manos del producto, dejando al vendedor y al comprador satisfechos con la transacción. El bien se separa del mundo del vendedor y adjunta a la del comprador (Muniesa y Callon, 2007b). En el caso bajo estudio, se encuentran dos bienes objetivables. El primero que surge es la patente. Si bien es intangible, claramente es material y transable. El segundo, es la posesión del derecho de uso de una patente, ya que permitirá construir y vender nanotransportadores, cuya materialidad es obvia.

Para lograr que se apruebe una patente de un nanotransportador, se realizan muchas conexiones sociales. Probablemente, un laboratorio universitario ha descubierto la tecnología y debe lograr patentarla. Es interesante que al intentar esto, muchas veces se desconoce el posible cliente. Se objetiva como bien la patente, se invierte en lograrlo, sin saber cuál será el beneficio comercial. Por último, es importante mencionar que el bien transable puede ser la patente, su alquiler o simplemente el permiso de uso. Esto complejiza el problema pues, notoriamente, se tienen varios bienes que pueden ser vendidos⁴².

En el caso de los nanotrasportadores, la materialidad es obvia debido a que son objetos físicos separables. En otras palabras, son materiales en la nanoescala (1-100 nm de diámetro) que pueden llevar múltiples medicamentos a un tejido destino del organismo humano. Es interesante mencionar que siempre el bien comprado se incorpora al mundo del comprador, en este caso, se introduce en el mismo cuerpo del cliente. Ahora bien, ahí no termina la relación comercial. Si bien los protagonistas se alejan una vez terminada la operación, queda una relación a futuro. Desde el punto de vista del comprador, debe recordar su responsabilidad por daños del producto. Claramente la transferencia de propiedad, no termina la relación entre partes.

⁴¹ Si bien la patente es un bien intangible, es importante recalcar que la materialidad del producto excede lo meramente físico.

⁴² Es importante aclarar que el alquiler o permiso poseen materialidad, de la misma forma que la venta total de la patente a un tercero.

Para lograr construir el objeto nanotransportador, se realizan muchas conexiones sociales. Durante la etapa de I+D, intervienen científicos que han descubierto la tecnología y aquéllos que realizarán las pruebas clínicas. Asimismo, cuando el producto llega al mercado, compete con otros productos similares y, al cruzarse con la demanda, definen precio. Asimismo, el productor intenta captar las reacciones del consumidor con el fin de tenerlas en cuenta en el futuro.

Ahora bien, la patente o el nanotrasportador caracterizados anteriormente son valiosos, solamente, si sus propiedades representan un valor para los potenciales compradores. Esta evaluación puede ser expresada como un precio que el comprador está dispuesto a pagar para apropiarse de la cosa, es decir, apegarse a él, para incorporarlo a su mundo. Una vez que él o ella han adquirido este bien, el comprador se convierte en el propietario. La transformación es doble: no sólo es el bien poseído por el dueño, sino que también se convierte en parte del mundo del propietario.

La patente recibe un valor económico, mediante un proceso dinámico, donde aparecen empresas que ven utilidad en la misma y donde se cambian las regulaciones del mercado para el uso de materiales, entre otros fenómenos. Es importante explicar la integración del producto en el mundo del comprador, una empresa que producirá el nanotransportador. Como fue mencionado anteriormente, existe la posibilidad de colocar precio al permiso de uso o a la transferencia de propiedad. En cualquiera de los dos casos, se objetiva un bien a ser comercializado que define su valor económico en un proceso donde actúan diversos agentes. El proceso de singularización de la patente consiste en una definición progresiva de sus propiedades, de tal manera que pueda entrar en el mundo de la empresa que la utilizará para producir el nanotransportador.

A lo largo de este proceso de calificación, el objeto “patente X” se transforma, progresivamente, en un bien a ser vendido. Cuando una empresa compra una patente (u obtiene permiso de uso por tiempo determinado), ésta entra a formar parte de las relaciones socio-técnicas que constituyen el mundo corporativo. La objetivación y la singularización de la patente se producen al mismo tiempo; las

propiedades objetivadas son aquéllas que permiten a la patente, unirse al mundo de la empresa compradora.

Una vez que la empresa colocó en su red la patente, puede iniciar el proceso de producción del nanotransportador para luego, iniciar el proceso de individualización del mismo, que consiste en una definición progresiva de las propiedades del producto, en una interacción con los profesionales de la medicina y los usuarios finales. El producto entra en el mundo del usuario por medio del profesional médico que recomienda su uso en el cliente. Por lo que el largo proceso de calificación del producto, se realiza en íntima relación con el médico. Una vez objetivado, el bien deja el mundo de la empresa que lo oferta y penetra el mundo del comprador, que se ha configurado para recibirlo con la ayuda del médico. El nanotransportador, visiblemente, pasa ser parte del organismo del usuario y opera en su cuerpo para lograr el efecto requerido.

1.3.3.2 Co-elaboración de Propiedades

A la hora de pensar las propiedades de las patentes y de los nanotransportadores, es necesario construirlas en contexto. Es más, la compra, en cualquiera de los dos casos, es el resultado de un encuentro entre sujeto y objeto; un proceso de relación que califica los productos y que termina en la singularización de sus propiedades. Esta co-producción de las propiedades requiere la participación de un gran número de profesionales del mercado (marketing, productoras, anunciantes, diseñadores, comerciantes, vendedores, etc.). Este proceso de adaptación, también implica una exploración extensa y sistemática de las redes de vinculación que constituye el comprador (potencial) del mundo. Uno de los principales requisitos, que los diseñadores y los vendedores tienen que cumplir, es el estudio de los archivos adjuntos de los compradores con el fin de ser capaces de proponer nuevas.

Analicemos, primeramente, el caso de las patentes. El científico, como híbrido colectivo, y en relación con sus ayudantes y colegas, construye el objeto. Claramente, la lectura de revistas científicas, la interacción con el exterior (por ejemplo, con médicos) y las políticas públicas de financiamiento afectan estas co-elaboración de propiedades del intangible. Es más, una parte importante de su

materialidad es contar con una buena documentación de los procedimientos involucrados para que el comprador asigne un valor económico lo más alto posible a la patente. Asimismo, el grupo de investigación debe saber que ciertas propiedades, perjudiciales para la salud, impedirán que el trabajo termine con una patente aprobada.

Ahora bien, el comprador de la patente adquiere con ella el derecho (no la obligación) de producir nanotransportadores. Para definir las características del producto, es fundamental entender las necesidades médicas concretas (seguramente, intuitas por el científico que logró la patente), ya que es fundamental una relación estrecha. Antes de la producción masiva, se requiere una serie de fases de testeo clínicos para lograr la aprobación del producto por parte de los entes reguladores. Cumplir con el regulador y lograr un producto deseable por parte de los médicos (y los usuarios), no es suficiente para entender el valor económico del producto. Es fundamental entender la competencia, no sólo del mismo producto, sino de los sustitutos.

Hacer calculable la patente y el nanotransportador

Como hemos detallado anteriormente, el proceso de singularización consiste en una serie de operaciones que resultan en la posibilidad de realizar un cálculo sobre la mercancía en cuestión. Es más, estudiar la competencia de mercado, consiste en establecer un espacio de cálculo en la que se puede conectar y comparar el producto en cuestión, con una lista finita de otros productos. Comparabilidad y la posibilidad de sustitución se encuentran en el corazón de los métodos de fijación de precios. Cuanto más complejo sea un producto, su comercialización planteará mayores problemas en términos de singularización. El producto oscila entre un alto nivel de singularización (sustitución débil) y un alto nivel de estandarización (sustitución fuerte).

La patente en cuestión se convierte en singular y calculable después de una operación de extracción, traducción y cambio de formato. Es necesaria vincularla con otras patentes para lograr una correcta clasificación, como así también, hacerla comparable con otras, pero diferentes, para que pueda calcularse su valor en el mercado. En el vocabulario de los profesionales de la calificación, esto tiene

un nombre: el posicionamiento. Durante la vida útil de la patente, seguramente, tendrán lugar una larga serie de reposicionamientos.

El nanotransportador sufre un proceso similar para hacerse calculable. Se trata de un proceso de clasificación, agrupación y clasificación que hace que los productos de dos compañías sean comparables pero diferentes. Asimismo, este proceso de vinculación de agentes, implica, entre otras cosas, el establecimiento de controles de calidad que permitan medir y objetivar ciertas propiedades; de forma que un producto pueda ser reconocido por los usuarios como “mejor”, y ellos le asignen un mayor valor económico.

En conclusión, tanto la patente como el nanotransportador son objetivados y singularizados para poder ser calculables. Al lograr estabilizar las propiedades de los mismos, se puede describir una fórmula que permita calcular los precios de los mismos.

1.3.3.3 Configuraciones algorítmicas

La existencia de una multiplicidad de formas prácticas de confrontación entre la oferta y la demanda se denominan configuraciones algorítmicas.

Estas configuraciones pueden tener una gran relevancia a la hora de definir precios y relaciones comerciales. Estos algoritmos identifican a los agentes autorizados para participar en una transacción. En otras palabras, existen normas regulatorias que el estado impone, que restringen la producción de nanoportadores (como producto medicinal) y normas que obligan al usuario a contar con un médico que avale el uso del producto en su cuerpo. Estas restricciones al mercado, necesarias para la actividad médica, claramente, son parte fundamental del proceso de formación de precios. Dentro del contexto que plantea la regulación estatal, interactúan la oferta y la demanda.

Estos procedimientos de formación de precios en un contexto regulado, se constituyen como una configuración algorítmica. Visiblemente, son dispositivos de cálculo, pues identifican las agencias de cálculo, organizan sus encuentros y establecen las reglas.

Con nuevas tecnologías de información, el poder y la diversidad de las tecnologías de encuentro se amplifican. Un ejemplo es la red creada por NanoKTN para promover y aumentar las relaciones en el mercado de la nanomedicina. Si bien se realizan encuentros donde exponen líderes de la industria y académicos de renombre, el mayor flujo de intercambio es virtual a través medios tecnológicos, que exploran formas de avanzar en la comercialización de los productos. Con estas tecnologías, las configuraciones se convierten en objetos por derecho propio en los que puede ser llevado a cabo la investigación y la experimentación.

Esta configuración algorítmica, donde se desarrollan los encuentros entre gobierno, usuarios, empresas, científicos y médicos, no son estructuras que ya existen. Los agentes con su accionar las diseñan.

Callon y Muniesa (2005) proponen preguntarse dos cuestiones que refieren a la relación entre un mercado concreto de nanomedicina y el abstracto que surge de un modelo económico-financiero. La primera, refiere a la relación entre la elección de determinadas formas de organización de mercado y su impacto en el mercado agregado. La segunda, refiere a las condiciones de validez de los modelos abstractos que proporcionan una descripción sintética y permiten calcular precios. En ambos casos, la cuestión de la relación entre los mercados de concreto y lo abstracto, se plantea.

1.3.3.4 Asimetrías

Las capacidades de las agencias de cálculo están vinculadas a su equipamiento distribuido. Esta caracterización permite tener en cuenta las asimetrías de poder de cálculo, un tema clave en el análisis de las guerras comerciales (Callon y Muniesa, 2005).

Las agencias de cálculo son híbridos colectivos equipados con los instrumentos de cómputo. El modelo matemático que permite valorar patentes médicas en base a ciertos parámetros es una herramienta, así como la computadora, donde el modelo se ejecuta. Asimismo, es necesario que profesionales puedan calibrar los parámetros e interpretar los resultados del modelo. La estimación se realiza en

base a información histórica disponible y en base a preguntas a expertos. Claramente, es un agente distribuido de cálculo, el que se presenta a valorar una patente. Mediante la introducción de estas nuevas entidades (modelos, estimación de parámetros, computadoras), se han ampliado las capacidades de los actores humanos y la distribuyen.

Callon y Muniesa (2005a) proponen un análisis de estas asimetrías en base a dos criterios. Primeramente, las agencias de cálculo se caracterizan por su poder de cálculo y su grado de autonomía. Según los autores, una agencia de cálculo será tanto más fuerte cuando sea capaz de: a) establecer una lista larga de entidades diversas, b) permitir relaciones complejas entre las mismas, y c) formalizar los procedimientos y los algoritmos de forma de multiplicar las jerarquías y las clasificaciones posibles entre estas entidades. Es fácil entender que el poder de cálculo, así definido, se distribuye en forma desigual entre los organismos de cálculo. Se consideran dos explicaciones para esta desigualdad: el grado de complejidad y riqueza de los dispositivos de las agencias de cálculo, y la red de interconexiones entre ellos (Callon y Muniesa, 2005).

Análisis de las patentes

El mercado, en este caso, implica, por lo menos, dos agencias de cálculo: la empresa que compra la patente para utilizar en la producción de nanotrasportadores y el científico (o grupo) que realiza la patente. En primer lugar, la empresa compradora realiza una valuación de la patente, involucrando referencias de terceros, prestigio del científico y todo tipo de información pública disponible por parte del gobierno. El marketing que realicen los científicos de su patente mediante revistas científicas, eventos, etc., constituye un sistema de conocimiento distribuido que participa, activamente, en el proceso de valuación y singularización de la patente en cuestión. Por otro lado, la empresa compradora, seguramente, requerirá la realización de pruebas con la patente y la discusión de los resultados. Pero, independientemente de qué tan fuerte es la agencia de cálculo del científico que registra la patente, sigue siendo débil en comparación con la potencia de cálculo con la que cuenta una empresa que evalúa su uso. Frente a un científico de un laboratorio, generalmente, del otro lado hay una

multitud de profesionales armados con computadoras, estudiando sus patentes y calculando con poderosos algoritmos cuál es el flujo futuro esperado de la patente. Sin embargo, esta relación de poder no es inmutable.

Ahora bien, en la medida que el científico tiene más prestigio, más patentes y mayor soporte de la institución que lo cobija, su poder de cálculo aumenta. Adquiere herramientas que le permiten cambiar el equilibrio de poder, siendo más activos en términos de cualificación y singularización. Este cambio de la geopolítica de las competencias de cálculo es, probablemente, más visible en el contexto de bienes intangibles como las patentes, que en otros contextos industriales de producción de bienes tangibles masivos. Tan pronto como una patente se establece como hegemónica en un mercado, su éxito impulsa a otros a invertir en posibles competencias cuyo impacto puede ser devastador para los intereses establecidos.

Análisis de los nanoportadores

En primer lugar, el usuario consumidor no está solo. Es fundamental el rol que juega el médico que tiene que aconsejar el uso del nanoportador, para lo cual realiza evaluaciones que implican referencias y evaluación de productos de varias marcas. El “médico” constituye un sistema de conocimiento distribuido que participa, activamente, en el proceso de calificación y la singularización del nanoportador. Es más, los médicos requerirán pruebas de la efectividad de la tecnología y discutirán los resultados con la empresa proveedora.

Pero, independientemente, de qué tan fuerte es la agencia de cálculo de los usuarios (y sus médicos), sigue siendo débil en comparación con la potencia de cálculo de la empresa proveedora (especialmente, si es una gran farmacéutica), ya que utiliza una serie de profesionales para analizar el mundo de la demanda e integrar mejor el producto. En otras palabras, la diferencia entre la capacidad de cálculo entre el médico y el vendedor del proveedor no se basa, solamente, en sus competencias de cálculo propios. Son, esencialmente, la consecuencia de la asimetría de los equipos distribuidos de cálculo con los que cuentan. En aquellos países con transparencia de la información y con asociaciones médicas fuertes y

responsables, permite cambiar el equilibrio de poderes, habilitando que la demanda sea más activa en términos de cualificación y singularización.

Si pensamos que el productor es una gran multinacional farmacéutica, ésta cuenta con unidades de negocio descentralizados, que se comportan como agencias de cálculo distribuido. Pero se agregan, a la hora de contribuir, a la rentabilidad de la empresa. El consumidor rara vez tiene la posibilidad de movilizar y controlar un gran número de organismos autónomos de cálculo. El estudio de estas conexiones, su naturaleza y su forma, nos permite plantear la cuestión de la autonomía relativa de las agencias: una conexión puede conducir a una dependencia pura, si un organismo está en condiciones de tener acceso sin restricciones al poder de cálculo a otro organismo.

1.3.4 Creación, gestión y financiamiento de una nueva empresa

En la subsección anterior se ha analizado como se configura un mercado de nanomedicina concreto, el de nanotransportadores (y sus patentes). Esta subsección pone el foco en las empresas y cuáles son los aspectos a tener en cuenta a la hora de crear una nueva empresa en el mercado nanotecnológico.

Con respecto a la forma jurídica de la nueva empresa, y debido a que la empresa va a necesitar inversión externa para su funcionamiento, es importante entender que la mayoría de los inversores prefieren una sociedad anónima, la cual está gravada al impuesto a las ganancias pero a nivel empresa (no de accionistas)⁴³.

Los fundadores de una empresa de nanomedicina deben llevar a cabo varias tareas para lograr un negocio exitoso. Primeramente seleccionar las estrategias del producto y armar un plan de negocios. Para continuar se debe negociar un acuerdo de licencia con la Universidad (o gobierno), logrando términos comercialmente razonables para asegurar el éxito del lanzamiento. Armar un consejo de administración del negocio y otro Consultivo Científico, negociando

⁴³ Los inversores “Ángel”, sin embargo, son una excepción pues generalmente requieren la formación de una sociedad de responsabilidad limitada al inicio del proyecto hasta que se haga la primera ronda de pedido de capital.

los salarios y/o participación en las ganancias de cada uno. Solicitar capital a los inversores de riesgo y negociar su participación en las ganancias (Stewart, 2005).

La mayoría de los acuerdos implican exclusividad para la empresa. A modo de ejemplo, en el año fiscal 2003 en EEUU, el 94% de los acuerdos otorgó exclusividad, pero limitando el uso de la licencia a un tipo particular de producto. Asimismo, es muy común que la empresa entregue acciones a la universidad. En el año fiscal 2003 en EEUU, las universidades recibieron acciones en el 67% de los acuerdos y el porcentaje de participación oscila entre 1% y el 10%. Por encima de las acciones muchos acuerdos requieren que la empresa entregue efectivo a la universidad en diferentes instancias del negocio. Primeramente es usual que se requiera dinero para cubrir el gasto de patentamiento del descubrimiento, también es práctica habitual exigir pagos durante el desarrollo cada vez que se termina una etapa y por último, una vez iniciada la venta, se requiere un pago de royalty (3% a 6% sobre ventas netas (Bastani et al., 2004)).

Otro tema relacionado a esta problemática es el rol del grupo científico universitario que invento la tecnología, en el proyecto. El trabajo de grupo en la nueva empresa puede ser a tiempo completo, parcial, o meramente consultivo. Por otro lado si es uno de los fundadores de la empresa, tendrá acciones de la misma. Por último el científico también participa en las regalías en efectivo que realiza la empresa a la universidad (Stewart, 2005).

Una fuente posible de financiamiento para la empresa es encontrar un socio corporativo de gran tamaño con el cual realizar una alianza estratégica. Estos socios pueden invertir solo o en conjunto con inversionistas de riesgo. La estrategia de producto representa ya La estrategia de producto debe ser determinado en conjunto con el plan financiero y las estrategias de comercialización. La estrategia óptima del producto dependerá de los fondos necesarios para desarrollar el período de investigación, el capital propio de la nueva empresa para el desarrollo y para vender el nuevo producto.

La estrategia “Out-licensing” plantea que a partir de una tecnología propia, el desarrollo esté financiado por una gran corporación y se licencia a la misma para que lo comercialice. Otra estrategia, “costos y ganancias compartidas” requiere

que las invenciones son propias, los costos del desarrollo se realizan en forma compartida y el beneficio también se comparte. La última estrategia, “integración total”, postula que partiendo de invenciones propias, la empresa autofinancie el desarrollo y su comercialización.

1.3.4.1 *Algunas lecciones aprendidas de la primera generación de empresarios nano.*

En el año 2009 la revista del sector *Nanotechnology Law & Business* realizó un listado de algunas lecciones que la primera generación de empresarios que trabajaron en el campo nano dejaron para el futuro (Maebius, Stephen y Jamison, 2009).

Se remarca la necesidad de hacer foco en las necesidades del mercado en lugar de la creación de una plataforma tecnológica. Muchas empresas se centraron en el desarrollo de plataformas tecnológicas que se podrían utilizar para una variedad diferente de productos y casi todas estas han fracasado porque debían enfrentarse a diferentes tipos de mercado al mismo tiempo. Es necesario lograr una mejor atención de las necesidades del mercado y un posterior éxito. Asimismo se propone no empezar la venta al público sino se dispone de una estimación de los ingresos futuros que generaran los productos. Varias empresas han cometido la falta de salir al mercado sin estimar los ingresos futuros de sus producciones, estas han fracasado. Es importante esperar la calificación rigurosa y extensa del producto. Los primeros empresarios no anticiparon correctamente la demora en comercializar los productos, debido a la necesidad de esperar la calificación del producto. Se debe tener en cuenta las complicadas cuestiones regulatorias, pues esto impone barreras relacionadas con la comercialización.

A nivel financiero del proyecto, es importante recaudar la mayor cantidad de capital posible cuando se sale al mercado pues la comercialización ha requerido más tiempo y más capital del inicialmente anticipado por los empresarios. A esto se suma la última crisis financiera que ha dejado descapitalizados a muchos emprendedores. Ahora bien, es importante el correcto uso de esos capitales

evitando construir capacidad instalada de producción antes de investigar a fondo la demanda a satisfacer. Por otro lado, la propiedad intelectual posee poco valor si el producto no está realizado. Muchas empresas han realizado inversiones en cartera con patentes ya otorgadas, las mismas a pesar de tener cierto valor no generan altos rendimientos hasta que el producto real sea comercializado. Por lo tanto el capital invertido en propiedad intelectual puede ser más valioso si se dirige principalmente al desarrollo de los productos.

La producción masiva de nanomateriales conlleva una gran incertidumbre técnica, existen incógnitas sobre algunos comportamientos que ocurren a nanoescala. Porque es muy importante contar con parámetros en el plan de negocios que contemplen la misma. Por otro lado es importante no subestimar las capacidades tecnológicas de los materiales tradicionales. Se debe contemplar que existe una continua innovación de las tecnologías tradicionales y no solo contemplar la tecnología nano a la hora de proponer una solución al mercado.

Por último, la definición del precio puede ser más importante que la performance del producto final. Si bien los primeros empresarios asumieron que estos productos pueden requerir un precio alto al mercado sin disminuir la demanda, no ha resultado siempre cierto.

1.3.4.2 La empresa Nanosphere Inc.

Como ejemplo de lo anterior, a continuación se describe la historia y negocio de una empresa nanotecnológica.

Nanosphere Inc. es una empresa que se considera como pionera en biotecnología; una de las pocas empresas de nanotecnología en llegar a hacer una oferta pública en los últimos años. La empresa fue fundada en el año 2000 por los doctores Robert Letsinger y Chad Mirkin de la Universidad Northwestern. Ellos han logrado un prototipo de proteína sensible de diagnóstico molecular del ADN que permite detectar proteínas. Durante los primeros años de vida, la empresa logró convertir su tecnología en propiedad intelectual protegida (IP).

Su tecnología basada en el diagnóstico in vitro (IVD), es ahora conocida como Sistema *Varigene*, en torno al cual se construye una cantidad de sistemas médicos de diagnósticos. El objetivo corporativo es cambiar el mercado de IVD con el desarrollo de sus dos proyectos denominados *Varigene I* y *II*, y ser la única empresa capaz de beneficiarse con los desarrollos de esta parte de la medicina.

Nanosphere ha generado ingresos en base al sistema de pruebas IVD⁴⁴; sin embargo, este sistema le ha ocasionado grandes pérdidas a causa del bajo volumen de ventas que se proyectan para los próximos años. IVD representa el 30% de todo el mercado de diagnóstico médico, el cual incluye el diagnóstico médico de imágenes en vivo.

Muchos de los expertos encuentran a la tecnología de Nanosphere como excelente⁴⁵, su sistema *Varigene* fue aprobado por la FDA en 2007 y los usuarios se encuentran satisfechos con el rendimiento de éste. Sin embargo, se dificulta el desarrollo del sistema en otras áreas y esto hace más difícil de lo esperado el despegue del producto, provocando ingresos menores de los esperados. Es así, que se propuso introducir, en el 2009, dos productos innovadores con ingresos proyectados para el 2010 en 3 ó 4 millones de dólares (Shalleck, 2009).

1.3.4.3 El proyecto POTENCIAR

El proyecto Potenciar surge en nuestro país. Su objetivo es desarrollar y comercializar implantes biomédicos desarrollados con tecnología de avanzada, los cuales estarán contruidos con nanomateriales y nanorecubrimientos innovadores. El proyecto tiene como objetivo principal proponer la instalación de una plataforma tecnológica de nanorecubrimiento con diamante ultrananocrystalino o también conocido como ultrananocrystalline diamond (UNCD) para una nueva generación de prótesis y bioimplantes.

⁴⁴ Las pruebas de IVD requieren dos exigencias: a) especificidad de las medidas de precisión del sistema y b) sensibilidad en los sistemas de diagnóstico.

⁴⁵ Según Alan B. Shalleck (2009), existe una serie de supuestos en los que se proyecta el negocio de la compañía. Primeramente, *Varigene* se considera la primera plataforma nanotecnológica habilitada para generar pruebas moleculares y ser capaz de probar proteínas. Luego, proporciona menores costos y tiempos de respuestas más rápidos con una plataforma más fácil de usar. Además, posee una sensibilidad al menos 100 veces mayor para las pruebas de proteínas en los ensayos, ofrece altos recuentos en la multiplexación de capacidades y ofertas para el futuro en la línea de desarrollo de pruebas moleculares.

El proyecto propone desarrollar cuatro productos a partir de láminas de UNCD. Primeramente, para encapsular imanes que se podrán localizar en la pared externa del ojo para atraer las partículas superparamagnéticas, inyectadas en el ojo, para pegamento de retina desprendida⁴⁶. En segundo lugar, para la optimización de prótesis de cadera y rodilla, productos de la empresa INVAP. En tercer lugar, para válvulas de drenaje en el tratamiento de glaucoma⁴⁷. Por último, el uso de láminas UNCD para dispositivos Bio-Electro-Mechanical-Systems (bioMEMS) implantables en el ojo para la liberación de drogas y para marcapasos.

El proyecto cuenta con siete participantes institucionales: 1) INTEC (Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química) y la consultoría ANL (Argonne National Laboratory de USA), proveerán el conocimiento científico y tecnológico del material UNCD en forma de película delgada, el cual se encuentra patentado internacionalmente, 2) INTEC/Bioingeniería UNER, el cual desarrollará la fabricación de dispositivos bioMEMS, 3) INVAP, coordinando a profesionales para el diseño y construcción de prótesis de cadera y rodilla, 4) CAB quien se encargará del diseño y producción de nanopartículas magnéticas y, a la vez, realizará con INTEC el recubrimiento de imanes con recubrimiento de UNCD, 5) FLECHA quien se encargará de la fabricación de electroestimuladores cardíacos, 6) UBA quien a través del departamento de patología de la Universidad de Buenos Aires desarrollará el estudio pre-clínico de la biocompatibilidad y evaluación de los implantes intracorporales, 7) HA (Hospital Austral), el cual desarrollará la fase clínica del proyecto. El desarrollo del proyecto estará a cargo de una figura jurídica que tomará el carácter de un consorcio de carácter público y privado.

Este proyecto, junto con otros existentes en nuestro país, es un claro ejemplo de la naturaleza ecléctica de los grupos de investigación. Asimismo se ve claramente como el contar con una patente permite pensar en varios productos de industrias diferentes. Con respecto al rol del estado es importante destacar el lugar de la universidad pública y la existencia de empresas creadas por el estado con alto impacto en el sector (INVAP).

⁴⁶ Este producto se encuentra con patente ya aplicada.

⁴⁷ Este producto se encuentra con patente ya otorgada

Conclusión

En el presente capítulo, se han presentado diferentes visiones sobre el concepto de nanotecnociencia, tanto del ámbito gubernamental, académico, privado y del tercer sector. En cuanto a lo disciplinar, se ha mostrado la necesidad de un marco teórico ecléctico para dar cuenta de la actividad nanotecnocientífica, la cual se co-constituye con su correspondiente mercado nano. Por último, la tercera subsección ha presentado su dinámica industrial, estudiando en detalle las aplicaciones médicas (nanomedicina).

Se ha propuesto el uso del concepto “Nanotecnociencia”, mediante el cual se da cuenta de un modo de investigación en el cual confluyen lo científico y lo técnico, siendo una forma ingenieril de hacer ciencia. Los investigadores no tienen como objetivo encontrar una teoría “nano” sobre la realidad para explicar esta última. En el laboratorio se trabaja dentro de un contexto complejo situado entre la teoría física clásica y la cuántica, donde se buscan explicaciones parciales mediante un uso ecléctico de varias teorías, forzándolas, más allá de su ámbito de aplicación tradicional. En otras palabras, el núcleo mismo de las teorías se fuerza para dar cuenta de una estructura causal detrás de los fenómenos observados a escala nano.

Los investigadores, trabajando en el laboratorio dan lugar a la constitución de una práctica nanotecnocientífica. Ellos provienen de diferentes formaciones básicas, por lo que, habitualmente, difieren en qué teorías utilizan para trabajar, pero todos coinciden en qué instrumentos y qué programas de computadoras utilizan. Estos artefactos se transforman en los referentes comunes en la comunidad y adquieren gran importancia en la dinámica de la propia práctica⁴⁸. Además, y debido a la necesidad de los grupos científicos de conseguir fondos gubernamentales, la narrativa del pasado (de tecnologías similares) y las expectativas de futuro juegan un rol crucial a la hora de entender las interacciones nano. Esta interacción entre agentes humanos, una teoría ecléctica, materiales y artefactos se constituye como práctica. Para dar cuenta de lo expuesto, se ha

⁴⁸ A este respecto, es especialmente interesante el trabajo realizado por Jochen Hennig (2006) sobre la historia del microscopio “scanning probe”, como así también, el de Ann Johnson (2006), que estudia el papel que ocupan los ingenieros de software en este proceso.

utilizado la teoría del Actor-Red para describir las relaciones entre los nodos y se ha analizado el proceso de formación y la dinámica de la práctica nanotecnocientífica.

Esta práctica, en su proceso de constitución interdisciplinar y ecléctico, da lugar a un nuevo mercado nano que se encuentra en pleno proceso de formación y diseño. En lugar de utilizar como punto de partida la idea abstracta de mercado, como una macro-estructura dada, se ha propuesto describir y analizar las transacciones concretas. En particular se ha descrito el proceso de objetivación, como bien transable, de los nanotrasportadores (y sus respectivas patentes). El presente trabajo argumenta que el mercado nano se presenta como una red de relaciones complejas donde hay un doble movimiento de agrupamiento (construcción de objetos transables) y separación (la venta a usuarios).

Se ha conceptualizado a los agentes del mercado como colectivos híbridos de cálculo, lo cual permite fundamentar, desde lo micro, las asimetrías de poder a la hora de fijar precios. Esto será decisivo para entender en el capítulo cuarto las relaciones de poder entre pequeñas empresas nano innovadoras y las farmacéuticas.

Finalmente, en la última sección se analizó la dinámica industrial de la nanotecnología y, en particular, a la de la nanomedicina. Se describió la problemática legal de las patentes y la necesidad de una política gubernamental que contemple la necesidad de innovación mediante la emisión de patentes, pero que también cuide la competencia, no permitiendo monopolios en el sector. Se analizaron, en esta sección, dos casos: uno internacional y otro, argentino, de emprendimientos comerciales de nanotecnología.

Estos mercados, con su propia dinámica, generan externalidades que impactan en la sociedad, impulsando espacios políticos de discusión e interacción. Si bien el enfoque tecnocrático económico tradicional propone dar cuenta de estas externalidades incluyéndolas en los modelos como variables, estos desbordes exceden lo técnico e impulsan una discusión claramente política. Se presenta, entonces, una confrontación entre el enfoque tecnocrático abstracto que intenta cuantificar externalidades sociales por un lado, versus un enfoque político que

propone un espacio de discusión por el otro. El detalle de estos riesgos y su posible gobernanza serán tratados en el siguiente capítulo.

2 Gobernanza de las innovaciones nanotecnológicas

Introducción

En la anterior sección, se ha analizado el proceso de co-constitución que, partiendo de la práctica nanotecnocientífica, diseña su correspondiente mercado. Este proceso de innovación descrito conlleva riesgos que deberán ser regulados desde la autoridad gubernamental. Ahora bien, para lograr una gobernanza sustentable del sector nano, se debe incluir al sector privado y a la ciudadanía en el proceso de construcción y regulación del mismo. Esta sección se propone analizar el concepto de riesgo nanotecnológico, y cuáles son las condiciones para el desarrollo de una gobernanza sustentable del mismo.

En la cultura contemporánea, el riesgo está presente en una amplia gama de prácticas y experiencias (Adam y Van Loon, 2000). Como una forma de conceptualizar el riesgo, cuatro paradigmas han evolucionado dentro de las ciencias sociales (Mythen, 2004): los enfoques antropológicos, el paradigma psicométrico, el enfoque gubernamental y la perspectiva *sociedad del riesgo*. Esta última, liderada por Ulrich Beck (1992), ha demarcado los efectos generalizados de riesgo en la vida cotidiana. Este marco teórico estudia la constitución del riesgo y sus efectos sobre los diversos ámbitos sociales, permitiendo un análisis que extienda el protocolo actuarial, financiero o ingenieril del riesgo.

Es la propia dinámica de la práctica nanotecnocientífica y de su mercado, la que genera nuevos riesgos asociados. Diversos estudios ponen en situación de alerta a la sociedad frente a los posibles riesgos nanotecnológicos. Si bien no existe una prohibición sobre el uso de nanopartículas para uso ambiental, muchos gobiernos reclaman que la industria adopte un enfoque responsable. La falta de experiencia sobre los riesgos inherentes debido a lo nuevas que son estas tecnologías, impide realizar una eficaz medición de los riesgos que pueden traer para la salud y el medio ambiente.

Ahora bien, ¿Cómo utilizar las herramientas de gobernanza actuales para aplicarlas tanto a la práctica de laboratorio como al mercado “nano”? Gorán Hermerén (2004) propone, extender el Protocolo de Bioseguridad o de Cartagena a las nanotecnologías, la aplicación el programa REACH (*Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals*) para la regulación de manufacturas creadas con nanoelementos y la promoción de la iniciativa CEN de tecnologías de la información. Esto permite la creación de grupos de trabajo dedicados a las nanotecnologías y a la revisión de los documentos de derechos humanos de la Unión Europea, para que tengan en cuenta los próximos riesgos.

Es importante destacar que existe un claro rol de la empresa privada en la gobernanza tecnológica. En efecto, Roure (2004) expresa que tanto inversores como instituciones financieras tienen el derecho y el deber de evaluar y dar a conocer los riesgos financieros involucrados en sus relaciones contractuales con las empresas del sector nano. Una primera aproximación en esta línea, la está llevando a cabo la Unión Europea cuyo parlamento aprobó en 2004, una resolución sobre gobernanza corporativa y supervisión de servicios financieros, dictamen que apoya la iniciativa de la Comisión Europea de establecer las responsabilidades de índole colectiva en el corto plazo y propicia el avance hacia el delineamiento de responsabilidades individuales. En la visión de Roure, este enfoque debería extenderse a todos los proyectos de convergencia tecnológica para establecer un puente entre los modelos institucionales de regulación nanotecnológica que separan la Unión Europea de los Estados Unidos.

Es necesario ir más allá de gobierno y empresa privada para una gobernanza sustentable, logrando un acuerdo de valores global que regule el uso de las tecnologías. Es importante que las organizaciones intergubernamentales, organizaciones no gubernamentales, los estados democráticos, las empresas y la sociedad civil se involucren en el proceso. La participación activa de los ciudadanos se convierte en un ingrediente clave, ya que son los que votan a los políticos, son consumidores y actúan a través de organizaciones no gubernamentales. Esta nueva simbiosis entre la política, los negocios y la sociedad civil permitirá una nueva gobernanza que contribuya a construir una

sociedad justa, sostenible y participativa, logrando una interrelación simbiótica entre los gobernantes, la sociedad civil y las empresas.

Claramente, el desastre de Fukuyima lleva a repensar todos los riesgos que conllevan las tecnologías innovadoras. Si bien, lo primero que surge es un pánico colectivo frente a cualquier utilización de tecnología y una sobrevaloración del principio precautorio, luego de un tiempo, es importante realizar un proceso reflexivo que permita proponer y articular protocolos y regulaciones sobre los usos de la tecnología.

El desafío que se le presenta a un estado democrático al diseñar una política pública, requiere conocer experiencias de otros gobiernos y realizar una evaluación crítica que permita una construcción colectiva adecuada para su propia problemática. Es una cuestión donde lo histórico y lo geográfico son aspectos cruciales; los procesos sociales y la ubicación en el mundo determinan el diseño. Asimismo, la política pública surge de un proceso de consenso y no como una mera agregación de decisiones independientes de sus ciudadanos que maximizan su utilidad.

Al analizar acciones del gobierno, nos enfrentamos a una situación completamente diferente al análisis econométrico tradicional. En primer lugar, la acción del gobierno no se basa en un gran número de decisiones individuales que se agregan a posteriori, sino en una sola decisión colectiva que ha sido precedida por un proceso de deliberación. Asimismo, el carácter deliberativo de la decisión colectiva implica que el teorema central de límite no pueda ser invocado para legitimar el paso de lo micro a lo macro (Arrow, 1963). Evidentemente, el comportamiento macro no es una simple suma de los comportamientos individuales. Por lo que, si hay una interacción estratégica entre los agentes, la probabilidad de existencia de regularidades estocásticas válidas en el nivel macro es muy baja.

Por lo tanto, la única forma de evaluar modelos de gobernanza es encontrar una narrativa histórica que articule los mecanismos causales presentes en los casos de estudio, y reconstruir un relato para el estado en cuestión. Este trabajo cualitativo debe contemplar los procesos históricos y geográficos del estado superando lo

meramente descriptivo. Este desafío se presenta en diferentes niveles -nacional, regional y global- que se relacionan, permanentemente entre sí, constituyendo un único proceso histórico concreto. Debido a la lógica de consensos que se necesita en un estado democrático para regular sectores tecnocientíficos, el uso de metodologías basadas en correlación que no tengan en cuenta una narrativa histórica que conecte mecanismos sociales, no es apropiada. En cambio, la propuesta de Renate Mayntz, en su trabajo sobre gobernanza multinivel, ilustra cómo tres estudios de caso pueden ser útiles para encontrar la propia narrativa, al entender la conexión entre los mecanismos sociales involucrados.

Este capítulo se organiza en cuatro secciones. La primera presenta el concepto de riesgo en general y los vinculados a las innovaciones tecnológicas en particular. La segunda, describe los riesgos nanotecnológicos para el ser humano y para el medio ambiente; plantea algunas cuestiones éticas que se derivan, y se detalla una evaluación de riesgos concreta realizada sobre 5 nanomateriales. En la sección siguiente, se introduce el concepto de gobernanza, enfatizando que la gestión política es también una fuente de riesgo; se describen los modelos de regulación norte-americano y europeo, y se realiza una comparación con la regulación de la industria Biotecnológica. La última sección presenta el concepto de gobernanza multinivel tecnocientífico y su relevancia para la industria de la nanomedicina. Para ello, se analiza críticamente el rol de los mecanismos causales en el diseño de políticas públicas de regulación de sectores tecnocientíficos que comercian globalmente.

2.1 Riesgo como un proceso co-constituido

En la cultura contemporánea, el riesgo está presente en una amplia gama de prácticas y experiencias (Adam y Van Loon, 2000). El sentido del riesgo es indeterminado, y los efectos de los diversos riesgos es un tema ampliamente debatido entre expertos, políticos, filósofos, profesionales de los medios y el público en general. En las culturas occidentales, el sentido del riesgo ha evolucionado junto con el desarrollo de las instituciones sociales, la economía y el Estado del Bienestar. La rápida expansión de los avances científicos,

tecnológicos y de los conocimientos médicos ha creado un conjunto de expertos en cálculo de riesgo, en su evaluación y en su gestión (Mythen, 2004). A fines del período moderno, la conciencia pública del riesgo también se ha visto influida por la ampliación de los medios de comunicación y el crecimiento de las nuevas tecnologías de información y comunicación.

Como una forma de conceptualizar el riesgo, cuatro paradigmas han evolucionado dentro de las ciencias sociales (Mythen, 2004). En primer lugar, inspirados por el trabajo pionero de Mary Douglas (1966), se encuentran los enfoques antropológicos. En ellos, las diferencias en la percepción del riesgo se explican a través de pautas de solidaridad social, diferentes visiones del mundo y valores culturales. En segundo lugar, en el ámbito de la psicología social, el paradigma psicométrico se ha centrado en la cognición individual de riesgo (Slovic, 1987). En tercer lugar, el enfoque gubernamental del riesgo se ha formado a partir de los escritos de Michael Foucault (Gordon, Burchell y Miller, 1991). Dentro de este paradigma, teóricos como (Castel, 1991) y (Dean, 1999) han acentuado el papel de las instituciones sociales en la construcción de entendimientos de riesgo que limitan rigen la conducta humana. En cuarto lugar, la perspectiva *sociedad del riesgo* liderada por Ulrich Beck (1992) ha demarcado, los efectos ubicuos de riesgo en la vida cotidiana. El autor sostiene que el proceso de modernización ha generado una colección única de los riesgos producidos humanamente (Beck, 1999). Las consecuencias de estos "riesgos manufacturados" se dispersan por el mundo, dando lugar a cambios radicales en la estructura social, política y cultural. En la última década, la perspectiva de la sociedad del riesgo ha sido muy influyente, ya que actúa como un estímulo para el sector académico, el medio ambiente y el diálogo político (Adam y Van Loon, 2000). La perspectiva de la *sociedad del riesgo* permite discutir la constitución del riesgo y sus efectos sobre los diversos ámbitos sociales, habilitando un análisis que extienda el protocolo actuarial, financiero o ingenieril del riesgo.

Para el pensamiento hegemónico, la producción social de riqueza conlleva una producción social de riesgos en forma inevitable, volviendo al riesgo algo normal y cotidiano. La cultura moderna del riesgo propone que la estabilidad es sinónimo de fracaso, el tomar riesgos es la única forma de ser innovador y exitoso (Sennett,

1998). En nuestra sociedad es un acto heroico el arriesgar la posición actual y buscar el “éxito” en la incertidumbre. La Investigación y desarrollo se presenta como un nuevo producto que se vende y compra, se presenta como una nueva oportunidad de negocios más allá del control de los estados-nación⁴⁹. En el contexto del mercado nanotecnológico, esto significa una carrera sin final de sucesivas innovaciones, las cuales se presentan como inocuas y efectivas para el sistema.

Ahora bien, para que el modelo técnico de evaluación y gestión de estos riesgos nanotecnológicos se reconcilie con los valores democráticos, es fundamental la participación ciudadana en la gestión de los mismos. Se requiere extender la perspectiva de equilibrio económico, incorporando los intereses del individuo global (que no es, solamente, el ciudadano de los países centrales). Esta forma de diagnóstico y gestión de riesgos requiere la colaboración entre los especialistas, los agentes del mercado, los gobiernos y el público general durante el proceso de innovación y de control del mismo.

La actual crisis nuclear de Fukuyima ha impactado de tal forma que es imposible escapar a una reflexión sobre el desarrollo de nuevas tecnologías y sus efectos sociales. La conciencia política puede ser radicalmente alterada a través de la experiencia de la catástrofe que nos da la posibilidad de pensar en una transformación del orden establecido. Ulrich Beck (2006), presenta a las catástrofes como momentos de “iluminación involuntaria”, son experiencias que actúan sobre los sobrevivientes, obligándolos a reordenar sus prioridades y creencias. El desafío es resignificar esas experiencias catastróficas con el fin de movilizar el cambio, creando una conciencia de crisis que evite nuevos colapsos.

2.1.1 La sociedad del Riesgo

El fenómeno de la sociedad del riesgo se hace visible cuando ésta se expone a peligros que no están cubiertos por ningún tipo de seguro (Beck, 1992). Si bien los peligros han existido desde siempre, los riesgos que se originan en las

⁴⁹ Si bien existe una proliferación de acuerdos e instituciones sobre regulación, no se ha logrado hasta el momento llegar a acuerdos globales al respecto.

decisiones adoptadas por el hombre pueden exceder la posibilidad de cobertura de la industria aseguradora.

Beck caracteriza la sociedad del riesgo actual en la que vivimos, comparándola con etapas anteriores de la historia social (Matten, 2004). En primer lugar, estos riesgos son provocados por el hombre, a través de decisiones gubernamentales, de la industria o de la sociedad en su conjunto, mediante la elección de un determinado estilo de vida que conlleva ciertos riesgos. En segundo lugar, caracteriza su condición de riesgos globales: no están limitados por las fronteras tradicionales de las sociedades industriales, no se limitan a un cierto lugar, ni a determinados grupos de la sociedad. Esta falta de los límites tradicionales de riesgo hace que este nuevo fenómeno sea relativamente difícil de manejar por las instituciones políticas de la modernidad clásica (Beck, 1999). En tercer lugar, estos nuevos riesgos presentan un desafío al sistema tradicional de modelos actuariales. En muchos casos, la probabilidad del evento catastrófico tiende a cero y la pérdida potencial tiende a infinito, lo cual hace colapsar la normativa tradicional de las instituciones financieras. En último lugar, las instituciones políticas de las sociedades modernas no pueden hacer frente a estos nuevos tipos de riesgos emergentes, pues la responsabilidad se diluye - Beck denomina a esta situación "irresponsabilidad organizada" (Beck, 1995). Del mismo modo, los riesgos de nuestra sociedad tienen una lógica de distribución inadecuada; los más pobres están más expuestos a los riesgos, mientras que los más ricos logran evitar los peligros.

Tomados individualmente, cada riesgo puede tener una causa racional concreta, y puede ser explicado y previsto, permitiendo actuar para su contención. Sin embargo, la sociedad del riesgo se presenta como un fenómeno acumulativo y complejo que no admite una gestión individual de los mismos, se impone como omnipresente. Esto nos deja con sólo tres respuestas posibles: la negación, la apatía o la transformación (Van Loon, 2002). Por un lado las dos primeras están inscritas en la cultura moderna occidental. Por el contrario, la transformación requiere una nueva modalidad de ser y de pensar que se convierte en una fuerza de cambio social. Ulrich Beck (1992, 2000) y Anthony Giddens (1990, 1991) coinciden en la necesidad de reformas sociales y políticas hacia una mayor

reflexividad para analizar el fenómeno complejo de co-constitución del riesgo y la sociedad.

El poder coloca en manos de los técnicos el control de los riesgos tecnológicos, dejando de lado toda práctica participativa, construyendo un discurso que transforma, narrativamente, los riesgos potenciales en “oportunidades” de negocios (Van Loon, 2002). Un claro ejemplo de lo anterior es el mercado de bonos “verdes”. Se pretende simplificar el fenómeno complejo del cambio global mediante un instrumento financiero que otorgue incentivos al tercer mundo para emitir menos a cambio de dinero. Se intenta resolver un problema global que nos involucra a todos como humanos, mediante un mercado financiero que, mágicamente, regula incentivos de agentes económicos. Esta política de urgencia impide la reflexión y la reconsideración y, como resultado, en última instancia, contribuye a la proliferación de nuevos riesgos. En cierto modo, esta tecnocracia del peligro produce, sin quererlo, una reacción de grupos ciudadanos que contraponen al poder hegemónico, una globalización “desde abajo” que reclama por un debate abierto y público. Esto da lugar a una “democratización involuntaria” por conflictos de riesgo (Beck, 2000).

Esta sociedad del riesgo nos propone un juego donde el ganador se lleva toda la riqueza, probablemente, sin riesgo, y deja los peligros emergentes de su actividad económica al resto de la sociedad.

2.1.2 La crisis como iniciadora de un proceso reflexivo⁵⁰

Claramente, el desastre de Fukuyima lleva a repensar todos los riesgos que conllevan las tecnologías innovadoras. Si bien, como se dijo anteriormente, lo primero que surge es un pánico colectivo frente a cualquier utilización de tecnología y una sobrevaloración del principio precautorio, luego de un tiempo, es importante realizar un proceso reflexivo que permita proponer y articular protocolos y regulaciones sobre los usos de la tecnología.

⁵⁰ Las ideas de esta sección nacieron de la presentación que realizara Sarah Amsler (Aston University) el 16 de Enero de 2009 en el evento: “*Future Ethics Workshop 3. A World Without Us? Imagining the end of the human*”. La autora presentó una ponencia titulada *Bringing hope ‘to crisis’: Crisis thinking, ethical action and social change*.

En lugar de las reacciones urgentes a las crisis que, habitualmente, tienen los políticos, Seyla Benhabib (1986) plantea la importancia de analizar las contradicciones del presente, pues señalan el camino hacia una práctica política que incluya la participación ciudadana en los procesos globales de decisión. La conciencia política puede ser radicalmente alterada a través de la experiencia de la catástrofe en sí. Ulrich Beck, nos presenta a las catástrofes como momentos de “iluminación involuntaria”, experiencias que actúan sobre los sobrevivientes obligándolos a reordenar sus prioridades y sus creencias (Beck 2006). El desafío es resignificar esas experiencias catastróficas con el fin de movilizar el cambio creando una conciencia de crisis que impida que éstas ocurran, problematizando la posibilidad de crisis. La experiencia de crisis puede ser el principal incentivo a la reflexión en nuestro tiempo y es una fuerza poderosa para la transformación social. La conciencia de la crisis surge a través de la crítica y la comunicación, y es considerada como inter-subjetiva y contingente (Benhabib, 1986). La transformación sólo puede surgir de la experiencia de ser descentrados en formas que no podemos controlar, pero de las que no podemos ignorar sus efectos.

Desde una perspectiva interpretativa de la realidad, la crisis es una manera de resignificar decepciones y fracasos, y volver a orientar la acción hacia el futuro (Benhabib, 1986). Las narrativas de las crisis no describen una realidad dada, sino que analizan momentos de reflexión, evaluación y de decisión sobre las condiciones sociales, y deben comunicar la posibilidad de su transformación, creando un espacio de oportunidad y esperanza. La función transformadora de la crisis tiene su expresión más destacada en ciertas tradiciones de pensamiento tradicional marxista, donde la revolución se configura como el sistema que pone de manifiesto las contradicciones del capitalismo a través de las crisis personales. Sin embargo, la reacción frente a la ideología hegemónica tiene muchos puntos de contacto con las políticas populistas que han demostrado ser tan eficaces en la consolidación de sistemas conservadores. Por esta razón, es fundamental que las demandas, los sentimientos y las insatisfacciones que generan la estructura social en los individuos, sean contemplados y que ellos tengan voz para argumentar a favor de sus derechos (Benhabib, 1986).

Por otro lado, y en relación con los riesgos globales, en los últimos años, han cobrado importancia en el estudio de riesgos, las consideraciones éticas y democráticas. Kristin Shrader-Frechette (1991) y León Olivé (2004a) sostienen que el especialista debe reflexionar para descubrir el impacto social que tendrá su práctica y los cursos de acción consecuentes. Es fundamental considerar la opinión popular a la hora de gestionar los riesgos. Es más, si un método científico de cálculo indica que algunas hipótesis pueden ser válidas, se debe poner en tela de juicio los impactos que surgirán de su aceptación. Por otro lado, al evaluar esas hipótesis, tienen que considerarse cuestiones de equidad. Estas consideraciones éticas instan a los hacedores de política, a revisar sus decisiones para incorporar el bienestar social y lograr una distribución del riesgo suavizada en el tiempo y el espacio. León Olivé (2004) contrapone, la *evaluación experta del riesgo* versus la *percepción pública del riesgo*. El modelo técnico de evaluación de riesgos debe reconciliarse con los valores democráticos, como la única forma “legítima y eficiente” de detectar y gestionar riesgos (Fiorino, 1990). En otras palabras, si se entiende a la democracia occidental como un proyecto de asociación de acuerdo a valores comunes, es incompatible pensar en cualquier enfoque tecnocrático del diagnóstico y gestión de riesgos (Olivé, León, 2004a).

Volviendo nuestra atención, particularmente, a las innovaciones tecnológicas, éstas se presentan como una configuración segura en lo inmediato, con altas expectativas de beneficios futuros y riesgos difusos (y, temporalmente, alejados). No parece ser evidente la posibilidad de sufrimiento para muchos y la injusticia global que estas nuevas relaciones financieras cristalizan. Asimismo, los técnicos han realizado un normativismo prematuro durante las últimas décadas a nivel global, implementando políticas improvisadas que solidifican diferencias, a la vez que fracasan en los objetivos que supuestamente buscan. Se asientan políticas globales que, en definitiva, consolidan la hegemonía de ciertos grupos de poder. Contra esta realidad, Seyla Benhabib (2002) propone un modelo democrático deliberativo que internalice la controversia cultural en las instituciones y otras organizaciones sociales. Si bien ciertas normas globales son necesarias, ciertos tipos de pluralismo legal y de participación ciudadana pueden darse en diferentes regiones. La autora plantea que la igualdad democrática y las prácticas

deliberativas son necesarias para los nuevos diseños institucionales globales. Si bien Seyla Benhabib (2002) expone claramente que la legitimidad de la ley no surge de un proceso discursivo, necesita de la participación ciudadana y, en particular, de los posibles afectados. La esfera pública se presenta como el entrelazamiento de diversas formas de asociación que interactúan, dando lugar a una conversación pública anónima.

En resumen, esta tesis propone que en lugar de permitir una regulación diseñada por políticos o tecnócratas, es imperioso un acuerdo de valores que defina una nueva ética mundial con respecto al uso de tecnologías. Se necesitan nuevas normas para que las relaciones económicas y financieras globales no dañen a ciertos grupos sociales. Esta iniciativa implica: la globalización de poder político, la mejora de la cooperación internacional y mejorar el derecho internacional. Es importante que las organizaciones intergubernamentales, organizaciones no gubernamentales, los estados democráticos, las empresas y la sociedad civil se involucren en el proceso. La participación activa de los ciudadanos se convierte en un ingrediente clave, ya que son los que votan a los políticos, son consumidores y actúan a través de organizaciones no gubernamentales. Esta nueva simbiosis entre la política, los negocios y la sociedad civil permitirá una nueva gobernanza que contribuya a construir una sociedad justa, sostenible y participativa, logrando una interrelación simbiótica entre los gobernantes, la sociedad civil y las empresas.

2.2 Práctica nanotecnológica y riesgos co-constituidos

Ahora bien, la propia dinámica de la práctica nanotecnocientífica y de su mercado, constituyen nuevos riesgos. Ante el increíble potencial y los riesgos inciertos asociados, las políticas de estado cobran fundamental importancia para proteger a la sociedad y para impulsar un mercado sostenible. Uno de los ámbitos de acción de los estados es a través de los programas *Converging Technologies*. En Estados Unidos, el programa adquiere el nombre *Converging Technologies for Improving Human Performance (CTIHP)*, habitualmente denominado *Nano-bio-info-cogno (NBIC)* (Roco, 2007). El nanomundo se modifica para beneficiar

a los gobiernos, mercados, sociedades, naciones y seres humanos que deberán adaptarse al mundo transformado. En la literatura americana sobre regulación tecnológica, uno de los trabajos más influyentes es “Responsive Regulation” (Ayres y Braithwaite, 1992). Los autores proponen la imagen de una pirámide de regulación, ilustrando un enfoque flexible que tiene en la base la auto-regulación de las empresas (“*soft law*”) y subiendo, la intervención del estado es mayor, hasta llegar a la cima donde se regula en forma estricta (“*hard law*”) (Bowman y Hodge, 2006). En los años siguientes, y para superar el carácter estático de la pirámide, se propuso un “enfoque incremental” regulatorio que parte de aceptar la autorregulación de las organizaciones, inicialmente, para luego, incrementar la regulación del estado utilizando la información obtenida (Marchant, Sylvester y Abbott, 2008). Es una propuesta incremental, reflexiva y cooperativa que contempla el nivel de incertidumbre y el dinamismo de la evolución de la nanotecnología, pero no considera el principio precautorio al delegar, en la etapa inicial, la autorregulación al propio mercado.

A diferencia del programa americano, el programa europeo *Converging Technologies for the European knowledge society* (CTEKS) pone el énfasis de la política de estado tecnológica en la creación de una sociedad del conocimiento, guiándose por un principio precautorio (Echeverría, 2005; Klinke et al., 2006). Asimismo, la noción de “regulación prudente” ha sido discutida y aplicada al caso de la nanotecnología, ampliando el alcance mucho más allá de lo meramente económico (Dupuy, 2007; Dupuy y Grinbaum, 2004). Un caso interesante para analizar es el de Reino Unido, donde las instituciones que han surgido del Reporte de la Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004) y la subsiguiente evolución (Rogers-Hayden y Pidgeon, 2008), son un claro ejemplo de regulación híbrida (Dorbeck-Jung, 2007). Un enfoque superador del anterior es el de “Gobernanza sostenible”. Este concepto extiende la perspectiva de equilibrio económico, incorporando intereses sociales y ambientales. (Kemp, Parto y Gibson, 2005). Esta forma de gestión requiere la colaboración entre los tecnocientíficos, los agentes del mercado, los gobiernos y el público general durante el proceso de innovación tecnológica y de difusión (Renn y Roco, 2006). En Europa, un grupo de investigadores sociales del

Institute for Environmental Decisions lo han aplicado para entender el caso de la nanotecnología en Suiza (Wiek et al., 2007).

Veamos ahora, si el énfasis se pone en la gobernanza de la innovación, es fundamental entender la dinámica industrial que subyace a los procesos de descubrimiento. Si bien algunos estudios analizan el impacto de la actividad industrial en la gobernanza del riesgo y la problemática del ciclo de vida (Meyer, Curran y González, 2009), pocos discuten el impacto de la dinámica industrial en la dirección del cambio tecnológico (Robinson, 2009). Rafols et al. (2009) argumentan que las características específicas de la dinámica industrial de los nanomateriales tienen fuertes implicancias en su gobernabilidad, ya que limitan e intervienen para dar forma a la tecnología utilizada. La cuestión clave en relación con la dinámica industrial es que los nanomateriales no son en general productos de consumo, son bienes intermedios que son utilizados por otras industrias. Es más, en muchos casos permiten la innovación en procesos fabriles tradicionales de producción masiva (Rafols et al., 2009). Las características propias de la dinámica industrial de los nanomateriales (flexibilidad e innovación distribuida) tienen importantes implicaciones para la gobernanza que dificultan su regulación directa (Rafols et al., 2009).

La Nanotecnología se presenta como una técnica de propósito general que impregna otras industrias por lo que se propone volver a analizar las categorías de innovación expuestas por Abernathy and Utterback (1978): diferenciar entre el producto y el proceso, y considerar la presencia o no de nanopartículas en los productos finales (Laredo, 2009). Consideran las nanoinnovaciones como revolucionarias (Abernathy Kim y William, 1985), por lo que es fundamental diferenciar *'embedded nano'* (no tiene implicancias políticas y propone un acercamiento funcional a su regulación), de los productos *'enabled nano'* (donde la experiencia de los *'Asbestos'* obliga a considerar cuestiones de ciclo de vida). Con respecto a los procesos, los autores proponen la implementación de normas relacionadas con la seguridad de los trabajadores y la circulación de bienes intermedios en forma segura. Asimismo, propone explorar las lecciones de la sociología de la innovación y, en particular, repensar el papel de las autoridades públicas en la conformación de mecanismos de selección (Delemaire y Laredo,

2008), contemplando su carácter global y su necesidad de contar con procesos de aprendizaje.

El trabajo de Rafols et al. (2009) plantea la relevancia de tres temas en la literatura sobre nanotecnología. Primeramente, éstas se presentan como un conjunto de diferentes tecnologías yuxtapuestas, por lo que resumirlas en el concepto “nanotecnología” no ayuda a su regulación eficiente (Doubleday, 2007; RCEP, 2008; Rip, 2009; Rip y Van Amerom, 2009). En segundo lugar, existe incertidumbre respecto a la toxicidad de los nanomateriales, por lo que se recomienda utilizar el principio precautorio (Hansen et al., 2008; RCEP, 2008). En tercer lugar, la discusión de los riesgos y beneficios, que plantea la nanotecnología, deben focalizarse sobre el control del proceso de innovación, se propone el uso de gobernanza de la innovación en lugar de gestión de riesgos (Felt y Wynne, 2007). La gobernanza de la innovación busca influir en las decisiones tecnológicas para que la innovación se oriente a metas socialmente acordadas (Rafols et al., 2009).

Lo que se presenta, actualmente, es una gobernanza de facto⁵¹, construida en el día a día por actores dispares con intereses en conflicto (Rip, 2009). El desarrollo de nanomateriales depende de las interacciones entre múltiples actores, y no es controlable desde una regulación de “arriba hacia abajo”, por el contrario, Rafols et al. (2009) proponen una gestión de abajo hacia arriba que dé cuenta de las interacciones distribuidas en el sistema, y su gobernanza de facto (Rip, 2009). Asimismo, se argumenta que los intentos de regulación deben ser intervenciones en la gobernanza de facto existente para ser eficaces.

En el marco del taller “*Mapping out Nano Risks*”, que tuvo lugar en Bruselas los días 1 y 2 de marzo de 2004, Goran Hermerén (2004) planteó la discusión acerca de la importancia de un enfoque ético para evaluar el desarrollo de estas nuevas tecnologías y sus consecuencias. De esta manera, las consideraciones éticas imponen un problema adicional, puesto que dependiendo del punto de vista ético que se adopte para tomar una decisión de política, se tomarán cursos de acción que beneficiarán a unos grupos pero, al mismo tiempo, afectarán a otros. Este

⁵¹ Esta propuesta remarca que existe una gobernanza, incluso en ausencia de regulación explícita porque las redes sociales existentes facilitan o limitan la evolución tecnológica futura.

conflicto de intereses está presente toda vez que se evalúan distintas alternativas como ser, realizar una acción o no, y en caso afirmativo, de qué manera se llevará a cabo, o si es necesario regular cierto sector o no, y de qué forma.

Esta falta de conocimiento, impide realizar una medición de ese riesgo. Entre los riesgos potenciales se encuentran la posibilidad de utilizar la nanotecnología con fines terroristas y las externalidades negativas que pueden traer para la salud, ya que al poder ser utilizados en detrimento de los derechos de las personas y su combinación con otros fenómenos, podría resultar perjudicial. Por otro lado, los beneficios derivados de la nanotecnología serían la efectividad para trabajar con drogas y terapias génicas, la posibilidad de contar con instrumental quirúrgico nanométrico y con diagnósticos más precisos.

El trabajo de Robichaud et al. (2005) realiza una evaluación de los riesgos relativos asociados con el proceso de producción de una muestra de cinco nanomateriales manufacturados, elegidos por su actual o potencial producción y comercialización a gran escala. Para realizar este análisis, se utilizó una metodología basada en el esquema, para cada material, de su proceso de producción (síntesis), identificando insumos, productos y sustancias derrochadas durante la fabricación. En base a estos elementos involucrados en la producción, se realizó un ranking de riesgo y se estimó la prima de riesgo correspondiente para las productoras que quisieran asegurarse.

2.2.1 Riesgos para el ser humano y para el medio ambiente

Una de las primeras áreas investigadas por los toxicólogos es el de los daños causados por la inhalación de nanopartículas. En el informe de la *Royal Society & The Royal Academy of Engineering* de Reino Unido (2004), los autores sostienen que el mayor peligro provendrá de las nanopartículas incorporadas en objetos de consumo masivo, por la posibilidad de que se desprendan y sean inhalados. Existen fuertes similitudes entre la inhalación de las fibras de amianto (asbestos) del pasado y la posible inhalación de los nanotubos de carbono que aparecen hoy en día en diversos objetos de consumo. Las partículas inhaladas en los pulmones

pueden causar daños durante largos períodos de exposición y producir dificultades para respirar en el largo plazo. Como los nanotubos son altamente resistentes, los anticuerpos no las pueden disolver y mueren en el intento, aumentando el tejido depositado en los pulmones. Muller et al (2005) realizaron un estudio donde concluyen que los nanotubos de carbono causan inflamación en los pulmones, un efecto similar a la exposición al amianto (asbesto). Por lo tanto, si estas nanopartículas pueden causar una respuesta similar a la inhalación de amianto en el corto plazo, es posible que puedan inducir los mismos efectos a largo plazo.

Un estudio realizado a ratones, donde se les introdujo nanopartículas de cobre concluyó que los animales bajo estudio, desarrollaron lesiones graves en riñones e hígado (Chen et al., 2006). Es de destacar que utilizando micropartículas de cobre no se encontró el mismo efecto, mostrando lo diferente de la escala nano a nivel toxicológico. Asimismo, las nanopartículas están siendo utilizadas en un número de productos que se ponen en contacto directo con la piel (ropa, cosméticos y crema para el sol). Una vez que el producto es absorbido por la piel y que las nanopartículas entran en contacto con los vasos sanguíneos, nos encontramos con el mismo riesgo de la ingesta (Monteiro-Riviere y Inman, 2006).

En el informe del gobierno británico, anteriormente referido, se menciona que no se dispone de datos sobre los posibles impactos negativos de los nanomateriales en el medio ambiente (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004). Algunas nanopartículas (como cobre o plata) han demostrado ser dañinas para la vida acuática. Las partículas podrían ser absorbidas rápidamente por las plantas y el suelo, o ser transportadas en grandes distancias a través del aire o estar suspendidas en el agua. Estos estudios nos ponen en una situación de alerta frente a los posibles riesgos involucrados. Si bien en el Reino Unido, no existe una prohibición sobre el uso de nanopartículas para uso ambiental, el Gobierno alienta a la industria a adoptar un enfoque responsable. Por su parte, en los EE.UU. también se están estudiando los riesgos, y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha publicado recientemente un libro blanco que expone su necesidad de investigación (*US Environmental Protection Agency*, 2007).

2.2.2 Algunas cuestiones

Sin lugar a dudas, uno de los problemas derivados del desarrollo de las nanotecnologías se refiere a las cuestiones éticas. Schummer (2007) divide las cuestiones éticas en dos grupos. Por un lado, las cuestiones éticas específicas, que surgen de cada proceso de investigación en particular, de sus productos y aplicaciones, y del proceso de transición desde el laboratorio hacia la industria. Por otro lado, las cuestiones generales que se despliegan al analizar cómo los proyectos se insertan en la comunidad científica y en la sociedad, y cómo son puestos en marcha, controlados y gobernados.

En este sentido, las cuestiones éticas específicas que Schummer (2007) menciona surgen en las aplicaciones de las tecnologías nano en los campos de la medicina, la industria y las aplicaciones militares. Los problemas éticos identificados en cuanto a salud y medioambiente tienen su origen en la falta de regulaciones en nanotecnología. Por ejemplo, una cuestión surge al considerar que partículas de la misma composición química tienen distintas propiedades según su tamaño. Sin embargo, las regulaciones sobre toxicidad de las sustancias no tienen en cuenta, todavía, el tamaño de las partículas, sino sólo su composición orgánica, lo que implica que una sustancia puede pasar los controles de toxicidad pero, por su dimensión, ser efectivamente tóxica. Además, el hecho de que las propiedades cambien según el tamaño, hace a los efectos de que ciertas aplicaciones sean impredecibles para la ciencia que, al momento, sólo toma en cuenta la composición química. Ello va de la mano de una rápida difusión de manufacturas basadas en investigaciones “nano” a escala industrial porque es, en esta esfera, donde se producen, masivamente, nuevos materiales con estas nuevas propiedades impredecibles. Para contrarrestar estos efectos, Schummer (2007) sugiere definir nuevos estándares para los controles, como así también avanzar en la investigación sobre los efectos nocivos asociados con el tamaño de las partículas, con el fin de basar en estos dos ejes una futura línea de regulación.

Otro problema específico surge en torno a la posibilidad de ejercer control sobre los efectos de los nuevos “nanodispositivos”. De acuerdo con Schummer (2007),

los avances tecnológicos no imponen cuestiones éticas adicionales, a menos que esos avances trasciendan la capacidad del ser humano de ejercer control sobre ellos. En este sentido, la cuestión ética fundamental gira en torno al hecho de que las nanotecnologías pueden causar daños al ser humano sin que pueda identificarse a algún responsable. En efecto, las herramientas fabricadas a escala nano tienen la capacidad de producir consecuencias sobre los seres humanos sin el consentimiento ni conocimiento del individuo involucrado. Todo ello requiere de un marco regulatorio que especifique el alcance de la responsabilidad de los fabricantes y usuarios de estas tecnologías (Schummer, 2007).

Asimismo, las aplicaciones militares también despiertan interrogantes éticos, dado que ahora es posible la creación de una nueva gama de armas biológicas y químicas. Pero más allá de esta preocupación colectiva, muchos proyectos nanotecnológicos militares de este estilo son “secretos” y, por tanto, quedan fuera del alcance de la comunidad. Esta situación impone una barrera al desarrollo de una gobernanza de la democracia tecnológica y de la confianza del público, además de acotar la gama de objetivos de las nanotecnologías a los objetivos militares (Schummer, 2007) .

Adicionalmente, varios problemas éticos surgen en el campo de la biomedicina. Por un lado, la propaganda exagerada al estilo ciencia ficción que se ha hecho de las nanotecnologías respecto a cuestiones como la inmortalidad y la posibilidad de curar enfermedades terminales con terapias génicas, despierta en muchos enfermos una ilusión que todavía no tiene correlato en la realidad y que puede ser perjudicial para la evolución de estos pacientes. Por otro lado, las responsabilidades de profesionales e instituciones médicas se ven desafiadas ante el desarrollo de dispositivos de auto diagnóstico y curación. Además, la creciente presión en la industria médica a derivar recursos desde el tratamiento de enfermedades hacia el “mejoramiento” de la raza humana pone en peligro el destino de recursos financieros para asistir enfermedades y realizar investigaciones en salud (Schummer, 2007).

Una cuestión ética adicional refiere a la necesidad de evaluar el impacto de los avances para los países en desarrollo y, en consecuencia, en qué medida estos

avances contribuirían a aumentar la brecha entre países ricos y pobres (Schummer, 2007). En este sentido, los derechos de propiedad respecto de las nanotecnologías impiden el acceso a la información científica a estos países. Nuevamente, aquí existe un problema de regulación, puesto que las normas sobre patentamiento son laxas y poco claras, implicando que el acceso a los avances científicos sea cada vez más restringido para quienes no están en la frontera tecnológica.

En el marco del taller “*Mapping out Nano Risks*”, que tuvo lugar en Bruselas los días 1 y 2 de marzo de 2004, Goran Hermerén (2004) planteó la discusión acerca de la importancia de un enfoque ético para evaluar el desarrollo de estas nuevas tecnologías y sus consecuencias. De esta manera, las consideraciones éticas imponen un problema adicional, puesto que dependiendo del punto de vista ético que se adopte para tomar una decisión política, se tomarán cursos de acción que beneficiarán a unos grupos pero, al mismo tiempo, afectarán a otros. Este conflicto de intereses está presente toda vez que se evalúan distintas alternativas como ser, realizar una acción o no, y en caso afirmativo, de qué manera se llevará a cabo o si es necesario regular cierto sector o no y de qué forma.

Ahora bien, Hermerén (2004) recurre a un modelo de análisis de problemas éticos que estipula que antes de tomar una decisión, debe detallarse toda la información relevante disponible sobre la cuestión, como así también, los puntos de partida normativos vigentes. En cuanto a la información relevante, ella debería dar cuenta del estado del arte al momento de las distintas alternativas factibles y sus consecuencias, y de las preferencias de los distintos grupos involucrados o afectados por cada curso de acción disponible. Por su parte, el punto de partida normativo debería establecer explícita y consistentemente las características éticas y culturales de la población involucrada, como así también sus objetivos y valores. Para su análisis, Hermerén utiliza como marco normativo los principios de dignidad o integridad humana, de autonomía, el deber de no dañar y de justicia.

Según el autor, este es modelo aplicable, independientemente de que el enfoque ético sea consecuencialista o deontológico⁵², y reconoce, además, que hay ciertos problemas que cobran relevancia bajo cualquier punto de partida ético: la evaluación de los riesgos- beneficios, información y consentimiento, privacidad e integridad, costos y prioridades de investigación, equidad y justicia (equity and fairness) y confianza pública y transparencia.

En cuanto a la comparación entre riesgos y beneficios, Hermerén identifica como principales dificultades, el determinar qué actor tiene la idoneidad necesaria para medir los riesgos y los beneficios, cuáles son sus costos, cuán probables son y a quiénes perjudican o benefician. Teniendo en cuenta que las evaluaciones son subjetivas y dependen de quien las realice, una correcta evaluación de los riesgos y beneficios requeriría un continuo diálogo entre las partes involucradas. En relación al riesgo, existen dos definiciones. La primera, lo mide como la probabilidad de ocurrencia de cierto resultado, es decir, según su frecuencia relativa. La segunda, lo evalúa como la ausencia de conocimiento de ciertas partes de una cuestión. Esta falta de conocimiento impide realizar una medición de ese riesgo. Entre los riesgos potenciales, se encuentran la posibilidad de utilizar la nanotecnología con fines terroristas y las externalidades negativas que pueden traer para la salud, ya que al poder ser utilizados en detrimento de los derechos de las personas y su combinación con otros fenómenos podría resultar perjudicial. Por otro lado, los beneficios derivados de la nanotecnología serían la efectividad para trabajar con drogas y terapias génicas, la posibilidad de contar con instrumental quirúrgico nanométrico y con diagnósticos más precisos.

⁵² El autor identifica dos grandes tradiciones éticas. Por un lado, la teoría consecuencialista (consequentialist), que establece una correspondencia entre el valor moral de una acción y el valor de las consecuencias de esa acción. Por lo tanto, para decidir sobre una acción determinada es necesario evaluar sus potenciales resultados. Por otro lado, se encuentra la tradición deontológica (deontological) que establece que el valor moral de una acción depende de si tal acción es compatible con ciertos deberes y derechos basados en la religión, los contratos sociales o los derechos naturales.

2.2.3 La industria aseguradora y el riesgo nanotecnológico

Otro de los aspectos a tener en cuenta a la hora de analizar la nanotecnología es el riesgo financiero por parte de las empresas inversoras en nanotecnología. Annabelle Hett (2004) advierte sobre las dificultades para el desarrollo de un mercado de seguros para las empresas que invierten en nanotecnologías, dado que los emprendimientos tienen un alto grado de incertidumbre.

Es necesario tener en cuenta que las compañías aseguradoras basan su negocio en la identificación, evaluación y diversificación de riesgo. En este sentido, los mecanismos de diversificación de riesgo se ven limitados cuando no es posible evaluar las probabilidades y los riesgos, cuando los asegurados son afectados de la misma manera por las contingencias o cuando la magnitud de los eventos exceden las capacidades de aseguramiento de la compañía.

Ante estos requisitos, las nanotecnologías presentan un desafío para las compañías aseguradoras, en tanto existe un gran nivel de incertidumbre en cuanto a los efectos adversos de las mismas sobre el medioambiente y sobre la posibilidad de que se levanten futuras protestas sociales. Además, todavía no se ha logrado una evaluación adecuada y precisa de los riesgos involucrados ni están claros los marcos regulatorios para hacerles frente. Todo ello contribuye a la dificultad de celebrar contratos de aseguramiento para el enorme capital que está puesto en juego.

Según el punto de vista de Hett, tanto el desarrollo de un lenguaje común como un diálogo constante entre las partes, son los elementos claves que conducirían hacia un panorama más claro. La primera cuestión aportaría a la realización de una evaluación estandarizada del riesgo a los efectos de la comparación del conocimiento científico entre distintos países y distintas industrias, como así también, a una nomenclatura universal para determinar los requerimientos de desempeño que las compañías aseguradoras imponen a las compañías aseguradas. En cuanto al diálogo que debería involucrar a reguladores, hombres de negocio, científicos, aseguradores y a la población misma, hoy está ausente en relación a los progresos que se están logrando. La incorporación de la población al diálogo se impondría como necesaria para conocer cómo asimila los nuevos proyectos y

cómo los estima. Además, el diálogo plural tiene un papel fundamental en la detección de los riesgos puesto que evitará que los interesados los minimicen ante la opinión pública.

2.2.4 Evaluación de riesgos asociados con el proceso de producción de cinco nanomateriales

El trabajo de Robichaud et al. (2005) realiza una evaluación de los riesgos relativos asociados con el proceso de producción de una muestra de cinco nanomateriales manufacturados, elegidos por su actual o potencial producción y comercialización a gran escala. Para realizar este análisis, se utilizó una metodología basada en el esquema, para cada material, de su proceso de producción (síntesis), identificando insumos, productos y sustancias derrochadas durante la fabricación. En base a estos elementos involucrados en la producción, se realizó un ranking de riesgo y se estimó la prima de riesgo correspondiente para las productoras que quisieran asegurarse.

Varias fueron las motivaciones para este análisis. Por un lado, el impacto medioambiental, ya que los procesos de producción de nanomateriales, inevitablemente, despiden parte de estos materiales a la atmósfera, hidrosfera y biosfera. Sin embargo, los estudios de impacto sobre la salud humana y el medioambiente son altamente especulativos, existiendo, únicamente, certeza acerca de las consecuencias de aquellas manufacturas de mayor tamaño, cuyo componente principal es aquel sobre el que se producen las nanomanufacturas. Pero esta últimas adquieren cualidades propias, dependiendo de su tamaño, forma, relación entre la funcionalidad de su superficie y su masa, y uniformidad de los materiales (Robichaud et al., 2005). Otras de las motivaciones fue el creciente conocimiento acerca de los impactos de estas manufacturas en la industria que, en la opinión de los autores, terminará generando una “industria verde” (Robichaud et al., 2005).

El estudio, entonces, reconoce y separa el tratamiento de dos tipos de riesgos: aquéllos asociados con los insumos, derroches y productos del proceso de

fabricación, y aquéllos asociados con los riesgos directos de los nanomateriales. Como resultado, los autores muestran que el proceso de producción de nanomateriales implicaría menores riesgos ambientales en relación con otras manufacturas.

En conclusión, el experimento realizado y descrito por Robichaud et al. (2005) sugiere exposición a los nanomateriales considerados, no impone riesgos desconocidos o inusuales en relación a los impuestos por otras manufacturas de producción y consumo masivo.

Por último, los autores rescatan los beneficios del enfoque de aseguramiento para el tratamiento de riesgos de los nanomateriales. En este sentido, inversores y empresarios en el mundo de las nanomanufacturas se beneficiarían por la baja de costos, menores primas de riesgo, costos legales menores, tasas por préstamos menores y por evitar pérdidas ocasionadas por la acción de consumidores activistas.

Como primer paso para el análisis de los riesgos relativos involucrados, Robichaud et al. (2005), esquematizan y describen el proceso de producción de cinco nanomateriales elegidos en base a la disponibilidad de información y a su potencialidad para alcanzar el nivel industrial de gran escala en su fabricación y difusión. Los materiales elegidos fueron *single-walled carbon nanotubes*, *bucky balls*, *quantum dots composed of zinc selenide*, *alumoxane nanoparticles* y *nanotitanium dioxide*.

De este esquema, los autores obtuvieron las realizaciones de las variables que consideraron importantes para el análisis de riesgos y que fueron, exclusivamente, aquéllas relevantes desde la perspectiva de aseguramiento: elementos constituyentes y sus propiedades, y los parámetros de los procesos (Robichaud et al., 2005). El objetivo del estudio de dichos factores fue obtener conclusiones acerca del riesgo relativo asociado, entendido como la probabilidad de exposición y el peligro asociado al grado de aparición de características propias de los nanomateriales, considerados como: toxicidad, inflamabilidad y persistencia en el medioambiente. Estas propiedades fueron, primero, identificadas, cualitativamente, en el proceso de síntesis y luego, combinadas

para calcular una prima de seguro para industrias manufactureras químicas, utilizando un protocolo actuarial (Robichaud et al., 2005).

El ejercicio de adaptar la información recolectada desde los procesos de síntesis al análisis de riesgo, sigue un esquema propuesto por los autores (Robichaud et al., 2005) que se resume como sigue:

Identificación de procesos y materiales. Esta fase implica el entendimiento de los procesos de síntesis y los elementos involucrados, y comprende dos estadios. Por un lado, los autores revisaron la información disponible sobre métodos de fabricación para encontrar aquél pasible de ser utilizado a escala industrial. Una vez elegido el método para cada nanomaterial, se dieron cuenta de las características de cada paso del proceso y de los insumos, productos y sustancias despididas en el proceso.

Caracterización de materiales y procesos. Cada uno de los elementos y procesos identificados en el paso anterior fue ordenado, cualitativamente, según el riesgo relativo que tenían asociado. Para el caso de los materiales, tal orden surgió de una evaluación de la toxicidad, solubilidad en agua, log Kow (bioacumulación), inflamabilidad y emisiones esperadas, correspondientes a cada material en cada paso de su proceso de síntesis. Luego, se colectó información adicional y se la adaptó para respetar los requerimientos del programa *XL Insurance database* que permite el cálculo de *scores* de riesgo relativo.

En cuanto a los procesos de producción, fueron caracterizados para ser incluidos en el programa de acuerdo a los elementos involucrados y a factores como temperatura y presión. En cada uno de los procesos, las sustancias involucradas fueron clasificadas en términos de su rol en el proceso, su transformación física, dadas la temperatura y presión propias del proceso y sus emisiones, para determinar su participación en el riesgo. El rol de la sustancia sirvió para identificar la probabilidad de exposición a cada una. Por su parte, el estado físico de la sustancia permitió estimar su grado de movilidad y persistencia, y completarlo en la base de datos. Por último, las evaluaciones acerca de los grados de emisión tendieron a describir la magnitud de la materia difundida al ambiente en kilogramos por tonelada de producto. Una vez determinada la contribución de

cada sustancia al riesgo, el programa permitió clasificar los procesos de síntesis elegidos según sus condiciones en la dirección de potenciales peligros.

Robichaud et al. (2005) utilizan una *metodología cualitativa* para ordenar las sustancias consideradas según su peligrosidad e incidencia ante la exposición. Para atender a los peligros potenciales se tomó en cuenta la toxicidad, la solubilidad en agua, la bioacumulación y la inflamabilidad. De esta manera, se establecieron umbrales para la caracterización cualitativa, por ejemplo, si una sustancia presentó un valor de solubilidad en agua menor que 10mg/L se la categorizó como de “bajo riesgo”. En cuanto a la exposición, se estimó a partir de la cantidad, en kg, de emisiones por cada tonelada de producto.

Por otro lado, se utilizó la metodología *XL Insurance Database* para asignarle un valor en la escala de riesgos relativos al proceso de producción de cada uno de los cinco materiales considerados en el experimento. Esta base de datos es ampliamente utilizada en la industria de los seguros, lo que permitió no sólo rankear la magnitud de los riesgos de estos cinco materiales sino, además, comparar estos resultados con los procesos de producción de otras manufacturas no pertenecientes al mundo de la nanotecnología, desde la óptica del aseguramiento.

Los peligros y riesgos de exposición asociados con cada proceso fueron determinados a partir de variables como temperatura, presión, persistencia y movilidad. La metodología consiste, en principio, en asignar a cada proceso un puntaje (score) de riesgo relativo. Luego, en establecer una correspondencia entre ese score y ciertas clases de riesgo relativo. Por último, estas clases de riesgos se combinan en fórmulas actuariales para determinar el ranking de peligrosidad de una cierta sustancia.

El protocolo actuarial seguido para los cálculos permitió la clasificación de cada proceso en tres tipos de ranking de riesgo relativo: riesgo incidental, riesgo de operaciones normales y riesgo de contaminación latente. En cuanto al primero, es el asociado con los accidentes que pudieran ocurrir durante el proceso de producción y que implican una exposición accidental. El segundo, tiene que ver con las emisiones que se esperan durante el proceso, mientras que el tercero, tiene

que ver con los riesgos de contaminación a largo plazo de las operaciones presentes.

En cuanto a las clases de riesgos relativos se establecieron tres: clase de probabilidad incidental, clase de cantidad de riesgo por peligros y clase de riesgos por sustancias peligrosas. Estas clases de riesgos relativos se incorporaron en cálculos actuariales junto con coeficientes de ajuste actuarial y dieron lugar a los puntajes finales de riesgo.

Desde la perspectiva del aseguramiento, lo relevante para formar los scores de riesgo finales son las sustancias constituyentes que mayor riesgo imponen (Robichaud et al., 2005), por lo que las clases de riesgo adquieren su valor relativo en función del valor de riesgo correspondiente a esa sustancia más riesgosa.

Para analizar los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías precedentes, los autores compararon los desempeños cualitativos y de aseguramiento en términos de riesgos de los nanomateriales considerados, con los resultados de otros procesos de producción de manufacturas difundidas: silicona, vino, plástico, baterías, petróleo refinado y aspirinas. Estos procesos están muy presentes en la vida cotidiana y representan, por ejemplo, la actividad de los complejos petroquímicos y de la industria farmacéutica. Los *scores* de riesgo de estos procesos fueron obtenidos de la base *XL Insurance Database*.

En el trabajo original de Robichaud et al. (2005), los resultados cualitativos son presentados en once tablas que exhiben el nombre del producto considerado (los cinco nanomateriales y las seis manufacturas industriales para su comparación) seguidos por todos sus elementos constituyentes. Como segunda entrada de la tabla, se exponen las cinco categorías analizadas para la evaluación de riesgos, a saber, toxicidad, solubilidad en agua, bioacumulación, inflamabilidad e impacto de las emisiones. Las primeras cuatro son inherentes a los componentes, mientras que la última surge del proceso de producción. En la intersección entre el componente y la categoría de riesgo, los autores determinaron el resultado cualitativo de la evaluación de riesgo mediante un arreglo de círculos. Un círculo blanco representa *bajo riesgo*, un círculo negro, *riesgo intermedio*, dos círculos

negros, *alto riesgo* y tres círculos negros, *muy alto riesgo*. Para el caso del impacto de las emisiones, la evaluación se define en términos de un rango de valores.

El análisis comparado entre los nanomateriales y los productos industriales masivos sugiere que, como grupo, los primeros tienen menos elementos constitutivos que los segundos. Además, tienen menos toxicidad pero niveles de emisiones proyectadas mayores. Una posible explicación sugiere que los menores niveles de emisiones que presentan los “no-nanomateriales” se deben a que sus procesos de producción están tan difundidos, que han ido perfeccionándose al punto de recapturar y reciclar los elementos peligrosos que se emplean y producen en su producción. Ello también explica que tengan una mayor cantidad de elementos constituyentes, puesto que dichos procesos de reciclaje y recaptura de componentes deben involucrar más químicos, que si no se llevaran a cabo.

En suma, el grupo de nanomateriales parece imponer menores riesgos que la producción de petróleo refinado y de plástico de alta densidad.

2.3 Gobernanza nanotecnológica

Como se planteó en la primera sección del presente trabajo, la tarea de definir “nanotecnología” es una cuestión relevante, pues las diferentes concepciones del término implican percepciones éticas radicalmente distintas. Esta sección presenta un primer acercamiento a la problemática de la gobernanza de las nanotecnologías. En la primer parte de esta sección se exponen tres posibles definiciones mencionadas por Schummer (2007): real, nominal y teleológica. Luego, se discute la gestión pública como fuente de riesgo para introducirnos en la problemática de la gobernanza de las nanotecnologías, siguiendo el trabajo de Echeverría (2005). Se discute un enfoque civil y uno militar, se describen los modelos americano y europeo de innovación y se analizan algunos aspectos éticos derivados. La siguiente subsección expone la discusión desde un punto de vista del riesgo financiero involucrado y se presenta un caso de estudio. Por

último, se plantean los desafíos futuros y se esbozan algunas posibles recomendaciones de política mencionadas en la literatura del tema.

Ahora bien, en la literatura sobre cuestiones referidas a las nanotecnologías, se reconoce la existencia de un problema en torno al concepto de “nanotecnología”, en tanto se presenta como difuso e impreciso. Por un lado, la exagerada publicidad que se ha venido haciendo en torno a los avances en nanotecnología (influenciado por los formadores de opiniones que han adoptado un enfoque del tema más cercano a la ciencia ficción que a la ciencia). Por otro lado, esta exageración en la opinión pública acerca de las potencialidades y desventajas de las nanotecnologías se está llevando a cabo en una fase muy temprana de su desarrollo, donde todavía no se ven resultados concretos.

Desde una perspectiva de gobernanza, Schummer (2007) presenta tres posibles definiciones. La *Definición Real* se centra en los campos de investigación que la misma comprende. Presenta a las nanotecnologías en plural y contemplando su aspecto multidisciplinario. En otras palabras, las nanotecnologías comprenden los últimos avances realizados en otras disciplinas que incorporan cuestiones “nano”, como por ejemplo, ingeniería genética, química orgánica, ingeniería eléctrica e investigación en microscópica, entre otras. La *Definición Nominal* considera a la nanotecnología como la “investigación y manipulación de objetos materiales en la escala de 1 a 100 nanómetros” (Schummer, 2006). El problema con este enfoque es que no delimita un campo de aplicación para la nanotecnología diferente del de cualquier disciplina biológica o de ingeniería, puesto que todos los materiales de la naturaleza están conformados por estructuras nanométricas. Así, esta concepción no ofrece nuevos dilemas éticos porque no existe una línea de investigación distinta a lo anteriormente desarrollado. Una tercera definición es la introducida por el ingeniero de software, Eric Drexler en 1986, la *Definición Teleológica*, que define a la nanotecnología por sus futuros objetivos y valores, tales como salud, riqueza, seguridad. Este enfoque fue inspirado desde la ciencia ficción y los problemas éticos asociados fueron expuestos en debates en un marco de ciencia ficción.

Al abordar el problema de la gobernanza de la nanotecnociencia, es necesario recordar que la nanotecnología constituye una línea de investigación que combina ciencia básica (observación y conocimiento del mundo) con tecnología (transformación del mundo) y, al ser un híbrido entre ambas, plantea desafíos para la cuestión de gobernanza de la misma.

Las cuestiones éticas se mezclan con la situación actual de riesgo e incertidumbre que requieren de una gobernanza adecuada. Los expertos plantearon que no sólo los modelos actuales son deficientes para generar un público informado, sino también que no están haciendo un avance correcto en cuanto a las consecuencias no previstas de las nuevas tecnologías. Lo que proponen al respecto es que en vez de tratar de predecir el futuro, se estudie cómo se pueden formar instituciones eficaces que las moldeen. Para ello, es esencial diseñar canales de diálogo entre los científicos y el público, en tanto este último es receptor de los beneficios y perjuicios de los avances. Además, es necesario que los nuevos modelos tengan en cuenta las cuestiones éticas que despierta la nanotecnología en sus diversos ámbitos de aplicación y que avancen en el progresivo entendimiento sobre los sistemas complejos, los riesgos e incertidumbres que imponen y sobre el proceso de toma de decisiones.

Asimismo, la política pública cobra importancia en varias áreas. Por un lado, es necesario hacer una evaluación rigurosa acerca de los actuales niveles de financiamiento en investigación. Además, como la nanotecnología promete tener un rol fundamental en los países subdesarrollados, se sugiere que los instrumentos de política tengan alcance internacional. Por otro lado, la nanotecnología afecta los derechos de propiedad, la transferencia del conocimiento sobre descubrimientos desde el laboratorio hacia el mercado, entre otras cuestiones legales, que requieren regulación. En la medida en que las innovaciones lleguen al mercado, el gobierno debería apoyar proyectos de investigación de estudios de impacto, en tanto sean confiables para la población que espera que los avances no generen consecuencias negativas en el ambiente y la salud.

Por último, es imperativo para la gobernanza conocer los riesgos genuinos involucrados en los proyectos, los cuales deberían surgir del diálogo con el público en general (Roco y Bainbridge, 2001). Es en este sentido resulta fundamental, para el éxito de esta empresa, avanzar en la educación y comunicación.

2.3.1 La gestión política como fuente de riesgo

Ahora bien, ¿Cuál es el rol de los gobiernos en la gestión del riesgo? Para analizar esta cuestión, en primer lugar, debemos tomar una definición de riesgo. Kristin Shrader-Frechette (1996) define el riesgo como “la probabilidad de un daño causado por ciertas actividades humanas que desatan desastres ambientales”. En el análisis de esa probabilidad, se mencionan distintas variables y sus efectos; expresando explícita preocupación por el riesgo para las generaciones futuras de los efectos acumulados en el tiempo. Asimismo, el marco teórico y el método científico que los expertos utilizan para evaluar y medir el riesgo, también se vuelven relevantes, puesto que distintos enfoques darán lugar a distintas conclusiones (a veces, contradictorias) acerca de la magnitud de la probabilidad de sufrir daños por causas ambientales (Shrader-Frechette, 1994).

Para ilustrar sus argumentos, Shrader-Frechette menciona dos casos de conocidos impactos ambientales: la manipulación genética de semillas y el proyecto de almacenaje de desechos nucleares en Yucca Mountain, Nevada. El primer caso se encuentra desarrollado en su trabajo sobre la relación entre derecho de propiedad e ingeniería genética (Shrader-Frechette, K, 2005). Los países desarrollados han inventado técnicas para modificar la cadena génica de algunas semillas para hacer que las plantas crezcan, inmunes a ciertos plaguicidas. Sin embargo, en los países en desarrollo, el avance de cultivos transgénicos ha producido perjuicios como la escasez de alimento, la aparición de malezas resistentes a pesticidas y desempleo (Shrader-Frechette, K, 2005). Con respecto al segundo caso, el plan de almacenaje perpetuo de residuos nucleares en Yucca Mountain, un estudio concluyó, aún en ausencia de evidencia suficiente y problemas para predecir la evolución de ciertas variables claves, que ese sitio en el estado de Nevada,

Estados Unidos, era apropiado para ser usado como depósito de basura nuclear. De esta decisión del presente, se desprenden varios peligros para las sociedades venideras. En particular, analiza el riesgo asociado con la metodología científica utilizada y a la deficiencia de información.

Hay un riesgo asociado con las decisiones de política pública que son tomadas en base a los resultados de la investigación científica. Utilizar métodos científicos no adecuados para ciertas situaciones o poner a prueba hipótesis que desentienden las preferencias de la sociedad, pueden llevar a aseveraciones a favor de la seguridad ambiental en situaciones que, desde el punto de vista ético o democrático, son riesgosas. Esto es particularmente importante en el caso de nanotecnología, donde la investigación sobre toxicología es escasa y el deseo de financiamiento público para el desarrollo del campo es increíblemente alto.

Por otro lado, Shrader-Frechette (1998) analiza si las acciones de repercusión pública en temas ambientales (que en última instancia afectarán al ser humano) encuentran su justificación bajo el paradigma de Racionalidad Ética o bajo el de Utilidad Simbólica que propone Nozick (1993). Bajo el primero, la decisión de política y la tarea del científico descansan en la postulación y evaluación de las hipótesis que suponen que el daño ambiental existe. En otras palabras, es éticamente preferible suponer que el daño existe y tratar de refutar tal aseveración, a desatender ciertos efectos ambientales. Los seguidores de Nozick, por otro lado, sostienen que la Utilidad Simbólica le agrega consistencia al paradigma de racionalidad ética, puesto que agrega los mensajes subliminales y las intenciones inobservables para la formación de una política. Shrader-Frechette concluye que esta última, no es una herramienta útil para justificar la acción pública.

En los últimos años, han cobrado importancia en el estudio del riesgo ambiental, las consideraciones éticas y democráticas. Como sostienen Shrader-Frechette (1998) y León Olivé (2004), el rol del científico debe reflexionar éticamente para descubrir el impacto social que tendrán sus evaluaciones sobre los perjuicios del medioambiente y los cursos de acción consecuentes. Justamente, porque las decisiones de política ambiental que se tomen en base a la aceptación o rechazo

de las hipótesis sobre impacto ambiental afectarán los intereses de las personas de hoy y de mañana. Asimismo, los autores remarcan la importancia de considerar la opinión popular a la hora de gestionar los riesgos: la participación ciudadana cobra vital importancia al estudiar el riesgo.

Shrader-Frechette sostiene que si el método científico indica aceptar, provisoriamente, algunas hipótesis y no otras, el científico debe poner en tela de juicio, además, los impactos que surgirán de la aceptación de las hipótesis candidatas. Por otro lado, al evaluar esas hipótesis, tiene que considerar cuestiones de equidad. Estas consideraciones éticas instan a los hacedores de política a revisar sus decisiones para incorporar el bienestar social y lograr una distribución del riesgo suavizada en el tiempo y el espacio.

León Olivé (2004) plantea que la democracia occidental es una democracia con arreglo a valores y es funcional al poder real. Es notable la cantidad de ‘secretos de estado’ que las democracias del primer mundo occidental tienen: el ciudadano no sólo no opina, tampoco debe enterarse del riesgo al que el poder real lo somete. El autor, claramente, contrapone la evaluación experta del riesgo versus la percepción pública del riesgo, apelando al concepto de Kristin Sharader-Frechette, de que todo riesgo es un fenómeno percibido. Si es riesgo para los humanos y / o su hábitat, entonces, tiene que ser percibido por algún agente. No hay una única manera “correcta” de evaluar el riesgo. Es indispensable la participación pública en la identificación y gestión de los riesgos que afectan a los humanos o a su ambiente, es más, se postula la “necesidad ética de la participación pública en la evaluación y gestión del riesgo” (Olivé, 2004)

Fiorino (1989) presenta dos conjuntos de valores en competencia: los técnicos y los democráticos. Si bien los primeros se asumen como racionales, los segundos no son irracionales y son tan válidos como los primeros. El modelo técnico de evaluación de riesgos debe reconciliarse con los valores democráticos como la única forma “legítima y eficiente” de detectar y gestionar riesgos.

Para León Olivé (2004:302) son dos los principios que fundamentan y sostienen relaciones humanas éticamente aceptables. En primer lugar, “nunca tratar a las personas sólo como medios,” y segundo, “se debe siempre permitir a las personas

actuar como agentes racionales autónomos”. Si se entiende a la democracia como un proyecto de asociación de acuerdo a valores comunes, es incompatible pensar en cualquier enfoque tecnocrático del riesgo (Olivé, 2004).

2.3.2 Dos modelos de innovación: NBIC vs. CTEKS

Javier Echeverría (2005) postula que, a partir del año 2000, comienza la era tecnocientífica (diferenciándose de la inmediata anterior, que era científica). El paso de las nanociencias a las nanotecnociencias (modificación de la materia desde el nivel atómico) se logró, en gran medida, gracias a los avances instrumentales en la creación de diversos y más sofisticados microscopios. Con ellos, fue posible la exploración y transformación de átomos, moléculas, ribosoma, ADN y células. Paralelamente, se desarrollaron macroprogramas de investigación (como los *Converging Technologies*) y se crearon centros de investigación públicos y privados. El principal problema de gobernanza, según este autor, es cómo se llevará a cabo la industrialización de la conquista o “colonización de los nanomundos”, en vistas a las nuevas capacidades humanas (Echeverría, 2005). Se podría afirmar que el principal interés que genera ese avance científico reside en que, por medio de estas técnicas, se puede operar sobre los componentes más pequeños de la materia y lograr la manipulación y transformación de su estructura y propiedades. Recordemos que se podrían diseñar medicinas capaces de modificar la estructura molecular de virus y bacterias, y atacarlos de esta manera. También se podrían crear materiales no existentes en la naturaleza a través de la modificación genética de la materia ya existente. Estas posibilidades⁵³ tienen, por lo menos, dos atractivos: uno económico y otro militar.

Desde el punto de vista económico, muchas empresas tecnocientíficas entraron en una gran competencia por el patentamiento de los materiales modificados, gracias

⁵³ Una limitación de esta línea de investigación se encuentra en el ámbito de las leyes de la mecánica. En efecto, como a la escala 10-12 mm las partículas se convierten en ondas, el principio de indeterminación de Schrodinger cobra validez. La Computación Cuántica constituye otra área limitante que promete una revolución en los sistemas TIC debido a la hipótesis acerca de que los fotones, al igual que los neutrones, son capaces de transmitir información pero a la velocidad de la luz (proposición que ya se maneja en la comunidad científica) (Echeverría, 2005).

a sus descubrimientos en nanotecnología. A este fenómeno, Echeverría lo denomina “colonización de los nanocosmos” (Echeverría, 2005). Por otro lado, la posibilidad de crear una nueva gama de armas de ataque y defensa en base a esta nueva tecnología se ha convertido en otro incentivo a la investigación. Por ejemplo, en Estados Unidos existe la National Nanotechnology Initiative que realiza investigaciones en el campo militar.

Ante los atractivos de las nanotecnociencias, en cuanto a su potencial para generar una revolución científica basada en la comunicación y la manipulación de la materia, las políticas de estado y la acción de las empresas privadas que buscan obtener ganancias cobran importancia. Uno de los ámbitos de acción de los estados es a través de los programas *Converging Technologies*.

En Estados Unidos, el programa adquiere el nombre *Converging Technologies for Improving Human Performance* (CTIHP), habitualmente conocido como Nano-bio-info-cogno (NBIC). Un informe que describe el plan hace hincapié en que el mismo no tiene como fin el conocimiento científico, sino que utiliza a éste como un *medio* para mejorar los desempeños humanos y lograr la progresiva transformación del entorno, a través de la revolución en ingeniería atómica y comunicación, en el caso de las nanotecnociencias. Uno de los problemas que se asocian con el programa estadounidense se refiere al problema de definir qué es un “mejor desempeño” para los seres humanos. En este sentido, el objetivo de gobernanza de las nanotecnologías consiste en coordinar y resolver los conflictos entre los diversos valores sobre los que se apoyan las investigaciones del nanomundo (valores epistémicos, tecnológicos, económicos, políticos, militares, sociales, ecológicos, jurídicos y morales). Por otro lado, la innovación y quienes son destinatarios de sus beneficios, aparecen como otra cuestión a tener en cuenta. El programa norteamericano manifiesta que el nanomundo se modifica para beneficiar a los gobiernos, mercados, sociedades, naciones y seres humanos que deberán adaptarse al mundo transformado.

A diferencia de este programa, el programa europeo *Converging Technologies for the European knowledge society* (CTEKS) pone el énfasis de la política de estado tecnológica en la creación de una sociedad del conocimiento, con el objetivo

último de formar una Unión Europea líder en conocimiento para el año 2010. Si bien ambos programas giran en torno a la innovación, el europeo, le asigna bastante importancia al manejo de los *riesgos* que los avances pudieran ocasionar. Una diferencia muy importante es la inversión. Mientras que la Unión Europea destinó 1.300 millones de euros para investigación en nanotecnología para el período 2003 – 2006, Estados Unidos invirtió 288 billones de dólares sólo en el año 2000.

Las diferencias más importantes en cuanto a desempeño entre ambos programas provienen de la formación de los grupos de expertos que diseñan y llevan a cabo los planes. Mientras que en Europa predominan los académicos vinculados a las ciencias sociales y humanidades, en Estados Unidos, los grupos académicos están conformados por representantes del gobierno, investigadores de la NASA y del Departamento de Defensa, entre otros.

A pesar de estas diferencias, los dos programas tienen puntos en común, en tanto son acciones de gobernanza que tienen características comunes (Echeverría, 2005). Las políticas son promovidas y diseñadas desde los departamentos de política científica y tecnológica de cada país con grupos de expertos afectados. Esos mismos grupos establecen un plan de acción que vincula las demandas e iniciativas tecnocientíficas previas. Finalmente, los productos de estas oficinas son presupuestados y aprobados por los respectivos parlamentos y están sujetos a una evaluación periódica de las innovaciones y su asimilación en la sociedad.

El programa de la Unión Europea estableció para sus expertos 10 principios - guía, expuestos en el documento *Group Mandate*- el cual tiene gran interés para la gobernanza. Echeverría selecciona algunos de los temas principales del documento y sostiene que, teniendo en cuenta que el programa europeo se basó en el norteamericano, el documento *Group Mandate* se plantea la cuestión de la existencia o no de una estrategia europea propia. En respuesta, el grupo debió orientarse, como se dijo, a conformar una sociedad europea del conocimiento. Por otro lado, el documento instaba a los expertos a hacer transparentes los beneficios de las investigaciones a fin de legitimar el proyecto. Otra de las preocupaciones del documento fue el rol de las ciencias sociales y cognitivas en el programa y su

impacto en la educación, cuestiones que también se exponen en el documento norteamericano. En cuanto a las diferencias con el norteamericano, el europeo insta a los expertos a descubrir y manejar las cuestiones éticas y sociales que surgen del avance en las investigaciones, como así también hace hincapié en el aprovechamiento de las innovaciones para generar beneficios sociales, en oposición a los beneficios individuales. Además, como una diferencia adicional, se refiere a la preocupación por cuestiones ecológicas, que se evidencian en los principios de *sostenibilidad* y de *precaución, anticipación y gestión de riesgos*.

Con base en la Agenda Lisboa 2000, el documento europeo *Group Mandate* propone la creación de una agenda tecnocientífica que especifique metas políticas, sociales y económicas, para servir al objetivo de transformar a la Unión Europea en un grupo competitivo en el ámbito civil en relación con Estados Unidos. Con ello, los objetivos científicos y tecnológicos quedan subordinados al objetivo de conformar una sociedad del conocimiento. El documento europeo reconoce la pluralidad de agendas de los programas *Converging Technologies* en diferentes países, como ser, defensa y ataque, mejorar las capacidades humanas, producir una síntesis de los biosistemas, asistir a la agricultura, alimentación y medio ambiente, procesar lenguajes naturales y desarrollar inteligencia artificial, entre otros (Nordmann, 2004a). En vistas a esta diversidad de agendas nacionales, el documento europeo concluye que las ciencias sociales y humanidades se convierten en “capacitadoras” de los diversos sistemas tecnológicos, en tanto orientan las agendas tecnocientíficas. De esta manera, la sociedad civil aparece como un actor fundamental en la gobernanza de las tecnociencias, puesto que ella debe tenerse en cuenta a la hora de impulsar los programas *Converging Technologies* y definir su agenda, siempre considerando que el avance tecnocientífico no es un fin en sí mismo, sino un medio para alcanzar los objetivos diversos de gobernanza que estipulan las agendas.

2.3.3 Desde la regulación Bio a la Nano

Michael D. Mehta (2004), utilizando Canadá como caso de estudio, argumenta que la regulación tanto en biotecnología como nanotecnología se tornó compleja

e inestable debido al error de no consultar suficientemente al público involucrado. Asimismo, el autor recomienda que la regulación de la nanotecnología debe aprender de los errores que se han cometido en la regulación de la biotecnología. Actualmente, son muchos los países desarrollados que están investigando fuertemente en nanotecnología. Al igual que en la biotecnología, muchos actores están comprometidos en desarrollar innovaciones a partir de los descubrimientos en nanociencia (Mehta, 2002). El autor propone analizar tres lecciones que surgen de la forma que se ha regulado la biotecnología y que pueden servir para la regulación nanotecnológica.

En primer lugar, se cuestiona el problema de la equivalencia sustancial (*Substantial Equivalence*). Con la biotecnología, el uso de la equivalencia sustancial ha promovido un marco reglamentario⁵⁴ que excluye la participación del público. Si los futuros reguladores de la nanotecnología adoptan este enfoque, el público es probable que sea excluido sistemáticamente pues la única evaluación válida es la “científica”.

La segunda lección es sobre la política regulatoria de etiquetamiento en el contexto de las biotecnologías (*Labeling*). El problema de etiquetar la comida “Genéticamente modificada” (GM) es complejo y existe una fuerte presión de los procesadores de alimentos y los minoristas para eliminar toda referencia a GM en los envoltorios. La lección es que el etiquetado de los futuros productos nanotecnológicos será complejo y que el debate se centrará en la discusión sobre su obligatoriedad versus el etiquetamiento voluntario.

La última lección propuesta por Mehta se refiere al principio precautorio. En Canadá, *The Canadian Environmental Protection Act* del año 1999, establece la obligatoriedad de utilizar este principio para temas ambientales. Es deseable extender este principio a futuros problemas que surjan en el contexto de las nanotecnologías.

⁵⁴ El informe “*Elements of Precaution: Recommendations for the Regulation of Food Biotechnology in Canada*” concluyó que la equivalencia sustancial no debe ser utilizada como una decisión definitiva para determinar si los productos modificados genéticamente deben ser sometidos a rigurosas evaluaciones científicas (Barrett y Brunk, 2001).

Si tenemos en cuenta el problema de información, éste gira en torno a la forma de divulgarla, de manera correcta y entendible para el público en general. En cuanto al consentimiento, hace referencia a que esa información pueda ser utilizada para tomar decisiones. En este punto, cabe preguntarse: ¿Cómo cuidar la privacidad cuando instrumentos invisibles pueden ser utilizados para obtener información personal?⁵⁵

Como se planteó anteriormente, los avances que están aconteciendo también despiertan interrogantes acerca del uso que harán las naciones desarrolladas de estas nuevas tecnologías en cuanto a disminuir o ampliar la brecha entre países ricos y pobres. Si las nuevas drogas para individuos y plantaciones son patentadas y sólo están al alcance de quien pueda pagarlas, no habrá oportunidad para los países en desarrollo de aprovechar los beneficios de las nanotecnologías.

Ahora bien, ¿Cómo utilizar las herramientas de gobernanza actuales para aplicarlas al campo de investigación “nano”? Algunos ejemplos sugeridos por Hermerén serían: la extensión del Protocolo de Bioseguridad o de Cartagena a las nanotecnologías, la aplicación el programa REACH (*Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals*) para la regulación de manufacturas creadas con nanoelementos y la promoción de la iniciativa CEN de tecnologías de la información con el fin de crear grupos de trabajo dedicados a las nanotecnologías y a la revisión de los documentos de derechos humanos de la Unión Europea para que tengan en cuenta los próximos riesgos impuestos sobre la privacidad y dignidad en vistas a los avances hacia tecnologías que impacten sobre la mente humana (Roure, 2004).

La gobernanza pública, entonces, puede obtenerse una vez identificado el marco para el establecimiento de reglas claras, esto es, una vez identificados los riesgos involucrados. Sólo así, sostiene Roure, será posible el desarrollo de un modelo que aborde los problemas de preocupación pública en un marco de transparencia, democracia y multilateralismo.

⁵⁵ Por ejemplo, a través de dispositivos que se inserten en el cuerpo sin el consentimiento del individuo para manipular funciones o localizar a la persona en cuestión.

2.3.4 La evaluación del riesgo

La posibilidad de establecer reglas claras y establecer una condena cuantificable ante el incumplimiento de esas instituciones se ve limitada por la debilidad existente en la evaluación de riesgo. Este es el punto de partida del argumento de Françoise Roure (2004) quien, en el taller de nanotecnologías, sostuvo la hipótesis de que los modelos de evaluación de riesgos financieros proporcionarían el marco institucional de gobernanza necesario para hacer frente a sus principales problemas.

En efecto, Roure (2004) expresa que tanto inversores como aseguradores, afectados e instituciones financieras nacionales tienen el derecho y el deber de evaluar y dar a conocer los riesgos financieros involucrados en sus relaciones contractuales con las empresas dedicadas a la producción, incorporación o difusión de materiales y estructuras “nano” (Roure, 2004).

Una primera aproximación en esta línea, la está llevando a cabo la Unión Europea cuyo parlamento aprobó en 2004, una resolución sobre gobernanza corporativa y supervisión de servicios financieros, dictamen que apoya la iniciativa de la Comisión Europea de establecer las responsabilidades de índole colectiva en el corto plazo y propicia el avance hacia el delineamiento de responsabilidades individuales. En la visión de Roure, este enfoque debería extenderse a todos los proyectos de convergencia tecnológica para establecer un “puente” entre los modelos institucionales que separan la Unión Europea de los Estados Unidos.

Veamos ahora, algunas de las recomendaciones impuestas por los paneles. En cuanto a las organizaciones con buena reputación, deberían articular la variedad de métodos y principios nanotecnológicos, con sus potenciales beneficios y riesgos. En relación a la investigación, debería ser ampliamente financiada y desarrollar modelos de comunicación e información para la incorporación del público al debate. El gobierno debería aumentar el financiamiento para conocer las consecuencias de las nanoestructuras en la salud y en el medioambiente, revisar el marco regulatorio actual y desarrollar estrategias de comunicación para mantener al público informado. Además, debería desarrollar programas de entrenamiento para solucionar la escasez de recursos humanos y, junto con el

sector privado, debería anticipar riesgos y mitigarlos. Finalmente, el sistema educativo debería avanzar en modelos de trabajo, entrenamiento y experiencias transdisciplinarias, en el desarrollo del pensamiento crítico y en la relación entre ciencias sociales y tecnología.

De lo anteriormente dicho, se derivan algunos resultados. Por un lado, el conocimiento científico y los avances tecnológicos son instrumentos de gobernanza, donde lo que importa no es el medio sino la meta, es decir, la innovación. Los diferentes países tienen agendas heterogéneas que tienen consecuencias en el ámbito internacional, donde se desarrolla la tecnociencia. Aunque actúen bajo los mismos paradigmas científicos, las naciones tienden a generar innovaciones muy diferentes. En todo caso, afirma Echeverría (2005), lo más importante es desarrollar una gobernanza racional que vincule medios y recursos disponibles con fines y se articule en el ámbito internacional. Lo que el autor propone es que, en vez de poner a competir sus diversas agendas, los países deben lograr una división internacional de objetivos. Todo ello, teniendo en cuenta al actor fundamental para la gobernanza racional, que es, la sociedad.

Asimismo, surge que los problemas éticos mencionados aparecen cuando el desarrollo de las tecnologías entra en conflicto con los estándares éticos de la sociedad. La capacidad de acción de los gobiernos no puede modificar estos últimos, pero sí puede regular las tecnologías para minimizar el conflicto (Schummer, 2007). Las recomendaciones del autor, en cuanto al marco regulatorio, se basan en la creación de nuevos estándares de toxicidad que tengan en cuenta los efectos del tamaño sobre los riesgos ambientales y de la salud. Además, es necesario cambiar el esquema moral y legal que supone que sólo los humanos ejecutan acciones autónomas, en vista a que los nuevos nanodispositivos realizan acciones con autonomía de su inventor o usuario. Asimismo, se requiere regular las actividades de “mejoramiento” humano a fin de prohibir la utilización de individuos para probar experimentos. Por último, por cuestiones de equidad, el autor sugiere que se flexibilicen las leyes de patentamiento para que los países en desarrollo puedan acceder a los beneficios de las nanotecnologías (Schummer, 2007). En cuanto a los modelos de investigación, actualmente adoptados, el autor recomienda que se modifique el

enfoque cerrado de considerar, únicamente, los aspectos tecnológicos para adoptar, en cambio, un modelo de investigación integrado que incluya especialistas en ética y sociólogos. Por otro lado, es necesario utilizar los recursos de investigación en aquellas áreas que son realmente de interés para la sociedad

2.4 Mecanismos causales y gobernanza multinivel tecnocientífico

El desafío que se le presenta a un estado democrático al diseñar una política pública, requiere conocer experiencias de otros gobiernos y realizar una evaluación crítica que permita una construcción colectiva adecuada para su propia problemática. Es una cuestión en la que lo histórico y lo geográfico son aspectos cruciales; los procesos sociales y la ubicación en el mundo determinan el diseño. Asimismo, la política pública surge de un proceso de consenso y no, como una mera agregación de decisiones independientes de sus ciudadanos que maximizan su utilidad.

En la actualidad de las ciencias sociales, hay dos paradigmas metodológicos que se disputan la búsqueda de la causalidad. Por un lado, se ubica la tradición dominante del análisis cuantitativo que postula el uso de correlaciones estadísticas como forma de encontrar causas. Esta metodología presenta graves problemas para la investigación empírica que trata con fenómenos macro como el Estado de Bienestar, la integración europea o las políticas de regulación de nuevas tecnologías. En última instancia, las correlaciones resumen relaciones entre variables estadísticas, por lo que tienen una limitada representación de los procesos causales.

Por el otro lado, están los autores que postulan la necesidad de mecanismos causales como única forma válida. Los mecanismos causales no son una mera reconstrucción de las relaciones entre las variables estadísticas, explican un determinado fenómeno social, un acontecimiento dado, la estructura, o el desarrollo mediante la identificación de los procesos constitutivos. La reconstrucción causal da lugar a una narrativa histórica. Contrastar los mecanismos sociales con el concepto de ley social significa contraponer una

explicación por medio de mecanismos a una explicación por medio de una ley universal (Mayntz, 2004).

Como esta tesis se propone detallar algunas consideraciones preliminares sobre el rol de la explicación causal en el diseño de políticas públicas, esta sección se estructura en tres subsecciones. Para lograr este objetivo, la primera subsección analizará, críticamente, los límites de la asociación estadística como forma de explicación causal y la necesidad inevitable de contar con una teoría previa. En la segunda subsección, se analizará el rol de las estructuras institucionales en la construcción de una explicación de fenómenos macro. En la tercera subsección, se analizará críticamente el rol de los mecanismos causales en el diseño de políticas públicas de regulación de sectores tecnocientíficos que comercian globalmente.

2.4.1 Asociación estadística y causalidad

La Comisión Cowles (Christ, 1994) postula que, si bien es posible aprender acerca de las causas utilizando metodologías estadísticas, es necesario incluir una teoría para poder realizarlo. En los últimos años, se ha observado cómo ciertos defensores de la metodología VAR, tratan de establecer relaciones de causalidad sin asumir una teoría asociada (Granger, 1990). En particular, Cooley y LeRoy (1985) realizan un ataque enfático contra los intentos de encontrar relaciones de causalidad sin utilizar una teoría previa en macroeconomía.

La metodología cuantitativa mencionada exige que las variables exógenas se determinen fuera del modelo, sin depender de las endógenas. Si bien la falta de correlación entre las variables exógenas es condición necesaria, no es una condición suficiente. Los coeficientes de un modelo econométrico se supone que representan la fuerza del efecto de las variables independientes sobre las variables dependientes. ¿Por qué suponer que existe la posibilidad de leer causalidad a partir de un sistema de ecuaciones cuyas variables exógenas tienen correlación cero? Nancy Cartwright (2007) plantea que las condiciones para que, efectivamente, se pueda interpretar causalidad a partir de un modelo econométrico son exigentes tanto desde el punto de vista objetivo (las variables

exógenas no tienen que estar correlacionadas), como desde el subjetivo (hay que saber que las variables exógenas causan las endógenas).

Los escritos económicos de David Hume (Hume, Green y Grose, 1889) presentan el concepto de causalidad como control y como estructural en el sentido de que las relaciones ocasionales pueden vincularse utilizando mecanismos y no rechaza la noción de conexión necesaria, sino que, simplemente, trata de explicar su origen (Hoover, 2001). Por su parte, algunos economistas tienden a identificar la causalidad con algo diferente del concepto de control. Por ejemplo, Clive Granger identifica causalidad con *predictibilidad incremental* (Granger y Newbold, 2001) y Edwin Burmeister (1980), con la existencia de solución única para un sistema dinámico. Para otros, el orden temporal es una característica crucial, la causa precede al efecto. Otros se centran en la contigüidad y conjunción constante. Causa es una versión simplificada de las relaciones del tipo “ley general”. Si siempre $A=f(B)$, algunos podrían decir que esta relación es causal, pero ninguno puede asegurar cuál es la causa y cuál el efecto. Si la relación es $A=2*B$, un primer acercamiento propone que B es la causa, pero si reescribimos la relación como $B=(1/2)A$, se evidencia lo relativo de la aseveración.

Aquéllos que adscriben a una visión probabilística de la causalidad⁵⁶, sustituyen el concepto de “relación permanente” con la noción de correlación robusta, y la noción de leyes deterministas con las de leyes de probabilidad. La principal dificultad metodológica de la utilización de la correlación es su carácter simétrico e intransitivo. Esto es totalmente contradictorio con la relación causal, la cual es asimétrica y transitiva. Además de la asimetría, es necesario algo más (que se podría denominar mecanismos) para capturar el sentido de control implícito en la idea de causa de (Hoover, 2001). El enfoque de la causalidad probabilística confunde el concepto de causa con el método utilizado para inferirla. Para ser válidas necesitan una permanente referencia a estructuras de causalidad implícitas. Lo que está implícito en la estrategia del enfoque probabilístico debería ser explícitamente aceptado. Para solucionar el conocido problema la “equivalencia de observación”, y poder definir cuál es la correcta la dirección de

⁵⁶ En términos estadísticos, A es causa de B si $P(B/A) > P(B)$.

la causalidad, es necesario, forzosamente, asumir que ciertas variables son independientes y otras, dependientes. Esta idea de control de las variables dependientes por medio de las independientes presupone el conocimiento causal como parte de la definición de la dirección de causalidad.

2.4.2 Las estructuras institucionales

En el mundo social, no encontramos nada como las leyes universales de la física. Mientras que éstas son elementos que se asumen invariantes en el tiempo y en el espacio, en lo social el contexto histórico y el espacio cultural son parte cruciales del proceso explicativo. Las leyes sociales son básicamente declaraciones generales que señalan los factores causales y no dan cuenta de los procesos causales involucrados (Mayntz, 2004).

Aun asumiendo que es posible entender el comportamiento individual, sería un malentendido creer que los fenómenos macro son una consecuencia directa de las conductas individuales. Esto ha sido claramente reconocido por Granovetter (1978), quien, en su análisis de umbral de los modelos de comportamiento colectivo, hace hincapié en la necesidad de especificar el impacto de la estructura social sobre los procesos colectivos. El mecanismo de generación del equilibrio de mercado depende de sus características estructurales, tales como la existencia de una pluralidad de productos, de la competencia y de la ausencia de políticas de fijación de precios. Las decisiones racionales de los individuos son la “materia” del proceso, pero su forma está determinada por los elementos estructurales (Mayntz, 2004). Las instituciones son características decisivas para la generación de efectos agregados macro motivados por la acción de los individuos. La motivación de las acciones de los individuos puede ser una causa necesaria en la explicación de los fenómenos macro pero nunca suficiente. Si el explanandum es la conexión entre dos fenómenos macro, tales como una contribución basada en el sistema de bienestar y una creciente tasa de desempleo, el principal reto es identificar las características estructurales e institucionales que organizan las acciones de los diferentes actores a fin de producir un efecto macro.

El punto de partida de la búsqueda de mecanismos que operan en un campo específico es siempre una regularidad observada o sospechada; una correlación, o

un acontecimiento desconcertante, estructura o proceso. Las declaraciones acerca de los mecanismos que articulan la teoría, son proposiciones causales que explican los resultados específicos mediante la identificación del proceso generativo que, dadas ciertas condiciones iniciales, las produce. Las teorías pueden incluir enunciados sobre los mecanismos sociales, pero por sí solos, estos enunciados no pueden constituir una teoría coherente. Los enunciados sobre los mecanismos, por lo tanto, bien se pueden complementar con un análisis basado en correlaciones estadísticas.

Utilizando metodologías estadísticas, el comportamiento en una situación de mercado se puede explorar en dos niveles. Un primer análisis micro de los comportamientos individuales, estima mediante un modelo de regresión un coeficiente y su error asociado. Ese error estándar nos da una idea clara de cuántos agentes se corren del comportamiento “medio” o “normal”. En cambio, en un análisis macro, la información sobre la variación de la conducta individual se diluye en el concepto de agente representativo de la población (Kittel, 2006). En esta visión, la hipótesis de la independencia y la identidad de los comportamientos a nivel microsociales, conjuntamente con la ley de los grandes números, justifican la validez del análisis cuantitativo de los datos agregados a nivel macroeconómico.

En el caso de las acciones del gobierno, nos enfrentamos a una situación completamente diferente. En primer lugar, la acción del gobierno no se basa en un gran número de decisiones individuales que se agregan a posteriori, sino en una sola decisión colectiva que ha sido precedida por un proceso de deliberación. Asimismo, el carácter deliberativo de la decisión colectiva implica que el teorema central de límite no puede ser invocado para legitimar el paso de lo micro a lo macro (Arrow, 1963). Un gobierno inicia las reformas del sistema social y sólo luego de décadas, sus efectos son visiblemente percibidos y medidos.

Cabría preguntarse si los actores colectivos, como los estados-nación, pueden ser conceptualizados como actores unitarios, considerándolos cajas negras. El problema es, sin embargo, que a fin de hacer inferencias causales ha de atribuirse una cierta regularidad al comportamiento de los estados. Esto no es posible pues,

en los actores colectivos, el comportamiento no es una simple suma de los comportamientos individuales. En conclusión, si hay una interacción estratégica entre los agentes, la probabilidad de existencia de regularidades estocásticas válidas en el nivel macro es muy baja.

2.4.3 Gobernanza multinivel tecnocientífico

La regulación tecnocientífica es diversa y múltiple en su desarrollo (Echeverría 2005). Por un lado, la pluralidad de agentes que intervienen (empresarios, políticos, investigadores, tecnólogos, militares, expertos en gestión e innovación, juristas, publicistas y la sociedad civil, entre otros) presentan gran un desafío. Por el otro, la combinación de estrategias coordinadas bajo los diversos programas *Converging Technologies* que han sido implementados en varios países, son un incipiente camino hacia una gobernanza. Asimismo, es imperativo conocer los riesgos genuinos involucrados en los proyectos, los cuales deberían surgir del diálogo con el público en general (Roco y Bainbridge, 2001).

El desafío que tiene un estado es evaluar cuál de los dos modelos presentados es el más adecuado para su propia problemática, planteando una cuestión donde lo histórico y lo geográfico son aspectos cruciales. Como se expuso en la sección anterior, trabajar sobre variables agregadas construidas por consenso político, invalida el uso de metodología estadísticas de correlación. Los procesos identificados en una reconstrucción causal de un caso particular pueden ser formulados como una cadena de mecanismos básicos si su estructura causal puede encontrarse también en otros casos. La mayoría de los fenómenos macro no se pueden explicar mediante la aplicación de un modelo de mecanismos en particular, por el contrario, implica una cadena de diferentes mecanismos que generan conjuntamente el resultado. Si nuestro objetivo es identificar mecanismos sociales lo suficientemente específicos como para tener valor explicativo de los resultados observados en particular, pero al mismo tiempo lo suficientemente generales como para aplicarse en diferentes campos empíricos, es necesario precisar el alcance de las condiciones iniciales que, a través de un

proceso con una determinada estructura causal, puedan generar una serie de resultados diferentes.

Por lo tanto, la única forma de evaluar modelos de gobernanza es encontrar una narrativa histórica que articule los mecanismos causales presentes en los casos de estudio, y reconstruir un relato para el estado en cuestión. Este trabajo cualitativo debe contemplar los procesos históricos y geográficos del estado superando lo meramente descriptivo. El desafío se presenta en diferentes niveles (nacional, regional y global) que se relacionan permanentemente entre sí, constituyendo un único proceso histórico concreto. Para ejemplificar, se presenta a continuación el trabajo de Renate Mayntz (2007), donde el autor compara tres sectores de la economía en el contexto europeo (el farmacéutico, el turístico y el de telecomunicaciones) e identifica los *mecanismos de causalidad*, que vinculan diferentes características de su gobernanza multinivel (estado, región y global).

En particular, el sector farmacéutico y el de telecomunicaciones tienen muchas características derivadas de la innovación tecnocientífica asociada a ellos. Renate Mayntz utiliza su teoría sobre mecanismos causales para explicar las relaciones internas entre los niveles de gobernanza y su narrativa. Se enfatiza que el control como objetivo de la gobernanza, la densidad de la reglamentación, la prevalencia de los agentes públicos y el predominio del nivel nacional están conectados, estrechamente, en una cadena causal. Los objetivos de la gobernanza difieren entre sectores, centrándose en diferentes partes de la cadena de producción. En telecomunicaciones, notoriamente, el objetivo es mantener la calidad del servicio (es decir, el ámbito territorial de la comunicación), mientras que en el caso de la industria farmacéutica, la seguridad de los productos es la preocupación primordial. El control de las externalidades negativas (es decir, riesgo para la salud pública) es una preocupación más palpable en la gestión de los productos farmacéuticos (Mayntz, 2007). Los objetivos difieren por nivel (nacional, regional o internacional). En los tres sectores, la regulación legal que controla la calidad de los productos está respaldada por sanciones, principalmente, en el plano nacional. A nivel de la UE, la regulación sirve, fundamentalmente, para crear el mercado único europeo. En el plano internacional, por último, la

expansión del mercado, más allá de las fronteras nacionales y regionales, es el principal objetivo (Mayntz, 2007).

La participación de actores privados da lugar a un régimen mixto de gobernanza que funciona como un sistema de negociación por nivel. En los planos regional e internacional, esta negociación es especialmente compleja, ya que los representantes de la industria se reúnen con agentes no de uno, sino de varios gobiernos, que, a menudo, persiguen intereses divergentes. Las estructuras económicas de los sectores están sujetas al cambio histórico, y esto se refleja en cambios en sus modos de gobernanza. Por ejemplo, la prevalencia de los organismos públicos en el presente gobierno de las telecomunicaciones es el resultado de una tradición que se inicia debido a la antigua condición pública del servicio. Asimismo, en la industria farmacéutica, el creciente poder de los fabricantes como consecuencia de la posición dominante en el mercado de las grandes corporaciones, junto con el desarrollo de una creciente y cada vez más costoso sistema de salud pública, ha motivado a los gobiernos a que refuercen el alcance de su legislación al respecto. Estas observaciones demuestran la importancia de una perspectiva histórica en el análisis de fenómenos macro (Mayntz, 2007).

La principal conclusión es que, debido a la lógica de consensos que se necesita en un estado democrático para regular sectores tecnocientíficos, el uso de metodologías basadas en correlación que no tengan en cuenta una narrativa historia que conecte mecanismos sociales, no es apropiada. En cambio, la propuesta de Renate Mayntz, en su trabajo sobre gobernanza multinivel, ilustra cómo tres estudios de caso pueden ser útiles para encontrar la propia narrativa al entender la conexión entre los mecanismos sociales involucrados.

Conclusión

Este capítulo ha presentado el concepto de riesgo manufacturado por el hombre y cómo se aplica en el contexto de las innovaciones tecnológicas, en general, y en el de la nanotecnología, en particular. Luego se han analizado los riesgos

nanotecnológicos para el ser humano y para el medio ambiente, planteando algunas cuestiones éticas que se derivan, y detallando una evaluación de riesgos concreta. A continuación, se ha introducido el concepto de gobernanza de los riesgos nano, argumentando que la participación ciudadana es imprescindible y que la gestión política es también una fuente de riesgo. Se han analizado críticamente los modelos de regulación norteamericano y europeo; argumentando que solamente el principio precautorio europeo es compatible con una gobernanza sustentable. La última sección ha presentado el concepto de gobernanza multinivel tecnocientífico y su relevancia para la industria de la nanomedicina. Se ha concluido que, para la toma de decisiones sobre políticas públicas relativas a nanotecnociencia es indispensable entender los mecanismos causales; no siendo suficiente la simple agregación de la información individual.

Al abordar el problema de la gobernanza de la nanotecnociencia, se ha tenido en cuenta que es una disciplina que combina ciencia básica (observación y conocimiento del mundo) con tecnología (transformación del mundo) y, al ser un híbrido entre ambas, plantea desafíos para la cuestión de gobernanza de la misma.

Este capítulo ha conceptualizado el riesgo nano como co-constituido tanto durante el proceso de la práctica tecnocientífica como en el mercado asociado. Particularmente, se analizaron los riesgos de la nanotecnología para el ser humano y para el medio ambiente, enfatizando diversas cuestiones éticas que surgieron en el análisis. Con el fin de ejemplificar el proceso de evaluación de riesgos que se lleva a cabo, actualmente, en diversas empresas del sector nano y que cuenta con la aprobación gubernamental (y de las compañías de seguros), se analizaron los riesgos asociados con el proceso de producción de cinco nanomateriales. Se concluye que esta gestión de riesgos realizada por la empresa, que claramente respeta la regulación gubernamental, no es suficiente para contemplar lo social y lo ambiental.

Se argumenta, entonces, que las características específicas de la dinámica industrial presentada en el capítulo anterior tienen fuertes implicancias en su regulación, ya que limitan e intervienen para dar forma a la tecnología utilizada. La cuestión clave es que los nanomateriales no son en general productos de

consumo, son bienes intermedios que son utilizados por otras industrias, lo cual complejiza la cuestión.

La regulación de facto existente en muchos países, coloca en manos de los técnicos el control de los riesgos tecnológicos, dejando de lado toda práctica participativa⁵⁷. Frente a esta realidad, y luego de realizar un análisis crítico de las doctrinas de regulación tecnocientíficas norte-americana y europea, este capítulo sostiene que para que el modelo técnico de evaluación y gestión de estos riesgos nanotecnológicos se reconcilie con los valores democráticos, es fundamental incorporar el principio precautorio y la participación ciudadana en la gestión de los mismos. De esta forma se extiende la perspectiva de equilibrio económico, mediante la colaboración entre los especialistas, los agentes del mercado, los gobiernos, y el público general durante el proceso de innovación y de control del mismo.

Muchas decisiones sobre políticas tecnocientíficas se realizan utilizando información agregada estadísticamente. La principal conclusión de este trabajo es que, debido a la lógica de consensos que se necesita en un estado democrático para regular sectores tecnocientíficos, el uso de metodologías basadas en correlación que no tengan en cuenta una narrativa historia que conecte mecanismos sociales, no es apropiada. Se propone, entonces, luego de un análisis crítico de los casos expuestos por Renate Mayntz, una gobernanza multinivel.

Esta gobernanza multinivel propuesta debe, primero, encontrar una narrativa histórica que articule los mecanismos causales presentes en el mercado, y reconstruir un relato de la cuestión. Este trabajo cualitativo debe contemplar los procesos históricos y geográficos del estado superando lo meramente descriptivo. Además, como se trata de un mercado global, el desafío se presenta en diferentes niveles (nacional, regional y global) que se relacionan permanentemente entre sí, constituyendo un único proceso histórico concreto.

En resumen, este trabajo propone que en lugar de permitir una regulación diseñada por políticos o tecnócratas, es imperioso un acuerdo de valores que

⁵⁷ Es más, en muchos países se construye un discurso que transforma, narrativamente, los riesgos potenciales en “oportunidades” de negocios.

defina una nueva ética mundial con respecto al uso de tecnologías. Se necesitan nuevas normas para que las relaciones económicas y financieras globales no dañen a ciertos grupos sociales. Esta iniciativa implica: la globalización de poder político, la mejora de la cooperación internacional y mejorar el derecho internacional. Es importante que las organizaciones intergubernamentales, organizaciones no gubernamentales, los Estados democráticos, las empresas y la sociedad civil se involucren en el proceso. La participación activa de los ciudadanos se convierte en un ingrediente clave, ya que son los que votan a los políticos, son consumidores y actúan a través de organizaciones no gubernamentales. Esta nueva simbiosis entre la política, los negocios y la sociedad civil permitirá una nueva gobernanza que contribuya a construir una sociedad justa, sostenible y participativa, logrando una interrelación simbiótica entre los gobernantes, la sociedad civil y las empresas.

En el próximo capítulo se describirán las metodologías generalmente utilizadas en la valuación de proyectos de inversión.

3 Valuación de proyectos de inversión

Introducción

Sabiendo que las inversiones tienen una gran importancia en la promoción del crecimiento económico, la correcta valoración de los proyectos de inversión es primordial para cualquier sociedad.

Las metodologías tradicionales de valuación estiman, primeramente, los flujos de caja futuros generados por el proyecto; luego, se elige una tasa de descuento adecuada para calcular su valor presente, y, por último, se estima el costo inicial. Estos métodos son ampliamente utilizados en la práctica y ocupan un lugar central en las finanzas corporativas. Los más conocidos son el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el período de repago. Sin embargo, estas metodologías tienen la desventaja de no reflejar la complejidad de los fenómenos sociales y económicos implicados en muchos proyectos de inversión. En particular, las técnicas tradicionales no contemplan en su cálculo contextos inciertos ni cuantifican las flexibilidades que muchas veces aparecen en proyectos de inversión.

Dixit y Pindyck (1994) sostienen que la mayoría de las decisiones de inversión tienen tres características que claramente no permiten utilizar los métodos tradicionales mencionados. Por lo que proponen la utilización de la metodología de opciones reales. En primer lugar, las inversiones son, en su mayoría irreversibles (total o parcialmente), y sus costos de capital, hundidos. En segundo lugar, existe incertidumbre sobre el futuro retorno de la inversión; los precios futuros de los activos son impredecibles, por lo que los flujos de beneficio futuros son inciertos. En tercer lugar, los inversores tienen, muchas veces, la opción de esperar para obtener una mejor información sobre los precios futuros.

En particular, este trabajo se interesa en las inversiones en investigación y desarrollo nanotecnológico. En las mismas es fundamental contemplar la irreversibilidad de la inversión, la incertidumbre de los precios y costos, y contemplar el pensamiento estratégico de los inversores. Por lo que este trabajo

propone utilizar la metodología de opciones reales para permitir realizar una valoración efectiva de estos proyectos.⁵⁸

A los fines de la valuación, muchos autores han asimilado las opciones reales con las financieras. Desde los años 70 gran parte del trabajo en la teoría de valoración de opciones financieras se ha caracterizado por soluciones analíticas, que ofrecen una rápida solución a problemas de valuación simplificada. Un primer caso a destacar es el modelo de Black y Scholes, el cual supone un modelo continuo donde el precio del activo subyacente sigue una distribución logarítmica normal. Si bien sigue siendo el más utilizado por los profesionales, no puede adaptarse adecuadamente a las inversiones en la economía real por no contemplar eventos extremos, por no permitir ejercicio anticipado de la opción y por ser un modelo analítico en tiempo continuo.

En las industrias relacionadas con este trabajo, la información estratégica llega a intervalos discretos en el tiempo, por lo que los enfoques analíticos no son adecuados para la valuación. Por lo que es necesario extender las fórmulas analíticas, y recurrir a diversas técnicas numéricas para contemplar la complejidad del problema.

Este capítulo se estructura en tres secciones. La primera analiza el problema de la valuación de inversiones en contextos de incertidumbre, introduciendo el concepto de opción real y proponiendo un modelo básico. En la segunda sección, se desarrollan, los cálculos estocásticos necesarios para valorar diversos instrumentos necesarios para la valuación en nanotecnología. Por último, en la tercera sección se desarrollan los modelos de valuación de inversiones donde hay aprendizaje.

⁵⁸ Una Opción Real es “un derecho, pero no una obligación, de ejecutar una acción a un determinado costo por un período predeterminado” (Copeland y Antikarov, 2001:5). Es decir, al igual que con las Opciones Financieras, una Opción Real otorga un derecho futuro de adquirir algo por un costo que ya está predeterminado.

3.1 Valuación de inversiones en contextos inciertos

Si bien la estrategia corporativa es fundamental para evaluar la conveniencia de una inversión, los métodos tradicionales no la tienen en cuenta, aunque, de forma notoria, son ampliamente utilizados en la práctica y ocupan un lugar central en las finanzas corporativas. Estos procesos de valuación, habitualmente, constan de tres etapas: 1) la estimación de flujos de caja futuros generados por el proyecto; 2) la búsqueda de una tasa de descuento adecuada para cada flujo de caja; 3) la estimación del costo inicial de la inversión. Estas metodologías son fáciles de aplicar, pero tienen la desventaja de no reflejar la complejidad de los fenómenos sociales y económicos implicados en muchos proyectos de inversión. En otras palabras, como se adelantó en la introducción del capítulo, las opciones reales permiten realizar una valoración efectiva de las opciones de inversión en contextos donde hay irreversibilidad, incertidumbre, y las decisiones son estratégicas, permitiendo reconocer flexibilidades y los procesos de aprendizaje. Este valor agregado se puede conceptualizar como “valor actual neto activo”, el cual se define como la suma del valor actual neto y el valor de la opción real asociada.

Esta sección, introduce, en primer lugar, el concepto de opciones reales. Luego, analiza el impacto de la incertidumbre en la definición de la inversión óptima. En tercer lugar, se plantea el carácter irreversible de muchas inversiones (especialmente, en innovaciones tecnológicas) y se detalla la eficiencia de la metodología de opciones reales para valuar las mismas. Por último, se presenta el modelo básico de Dixit y Pindyck para valuación de inversiones bajo incertidumbre.

3.1.1 Opciones reales

Las técnicas tradicionales de valuación son fáciles de utilizar y permiten, en contextos sencillos y de certidumbre, tomar decisiones eficientes de inversión. Ahora bien, si la decisión de inversión es estratégica o se realiza en contexto incierto, o sus costos son irreversibles, estas técnicas no pueden ser utilizadas debido a sus limitaciones. En particular, una de las técnicas más utilizadas es la

metodología del valor actual neto⁵⁹ (VAN). Visiblemente, su mecánica de valuación ignora las flexibilidades de la inversión, subvalorando la inversión. Por su parte, en el criterio de la tasa interna de retorno⁶⁰ (TIR), existe una expectativa diferente en el alza o la baja de la TIR, según sea el caso, es decir, si se está tomando prestado o si se está prestando, por lo que pueden existir múltiples TIR para un mismo proyecto, y puede confundir cuando son proyectos mutuamente excluyentes. Si bien las limitaciones expuestas no invalidan las metodologías tradicionales, es necesario tener en cuenta que en situaciones complejas e inciertas, las mismas dejan de ser válidas.

Por su parte, las opciones reales permiten realizar una valoración de las opciones de inversión en todo tipo de mercados, ya sea con información completa o incompleta. El uso de las opciones reales en comparación con el VAN, permite reconocer la flexibilidad del mercado y el aprendizaje que se realiza al pasar por diferentes etapas de desarrollo. Muchas investigaciones sugieren la integración de las opciones reales con el VAN. Ha sido Trigeorgis (1993), el que ha cuantificado este enfoque, diciendo que el VAN de la inversión en activos es igual a realizar la suma del VAN de los flujos efectivo estimado y de las opciones reales que existieran. Es más, muchas veces la adopción de opciones reales en proyectos de I&D estimula la inversión en el largo plazo (Kumaraswamy, 1996).

En su trabajo original, Black y Scholes (1973b) proporcionan un marco para la valuación de opciones europeas. Luego de unos años, es Myers (1977) quien propone analizar inversiones en activos reales, utilizando el concepto de opción. De forma que se define una opción real, como el derecho para llevar a cabo alguna decisión de negocios (por lo general, una opción para hacer una inversión de capital en un proyecto). Una vez establecido el paralelismo, se pueden utilizar técnicas estándares de las finanzas para su valuación.

⁵⁹El valor actual neto es una metodología que las empresas han utilizado por largo tiempo para evaluar proyectos de inversión. El mismo se calcula sustrayéndole al valor actual del flujo futuro de beneficios, la inversión inicial requerida. El criterio propuesto por esta metodología es aceptar proyectos que tengan VAN positivo.

⁶⁰Esta herramienta también es conocida como la tasa de rentabilidad del flujo de caja descontado (FCD). La misma se obtiene como la tasa de descuento que hace al VAN igual a cero. El criterio de esta herramienta es aceptar un proyecto de inversión cuando el costo de oportunidad del capital sea menor a la TIR.

Dixit y Pindyck (1994) sostienen que la mayoría de las decisiones de inversión tienen tres características que hacen imprescindible utilizar la metodología de opciones reales. En primer lugar, las inversiones son, en su mayoría irreversibles (total o parcialmente), y sus costos de capital, hundidos. En segundo lugar, existe incertidumbre sobre el futuro retorno de la inversión; los precios futuros de los activos son impredecibles, por lo que los flujos de beneficio futuros son inciertos. En tercer lugar, los inversores tienen, muchas veces, la opción de esperar para obtener una mejor información sobre los precios futuros. La literatura en estos temas es vasta, pero varios artículos aparecen como referencia ineludible en este campo. Los trabajos seminales de McDonald y Siegel (1986a), Pindyck (1991), Trigeorgis (1996) presentan los fundamentos de este método, utilizando programación dinámica y técnicas de arbitraje. Por otro lado, en la teoría clásica de las opciones reales, Brennan y Schwartz (1985) Trigeorgis (1993) se refieren a la valoración de la oportunidad de inversión como un conjunto integrado de opciones reales.

En otras palabras, la flexibilidad de una inversión es la que genera el valor de las opciones reales, incrementando la valuación de un proyecto. Habitualmente, este valor agregado se puede conceptualizar como “valor actual neto activo”, el cual se define como la suma del valor actual neto y el valor de la opción real asociada.

3.1.2 Inversión óptima en contextos inciertos

Esta sección se centra en entender el impacto de la incertidumbre en la decisión de inversión óptima. Frente a un nuevo proyecto de negocios en contextos inciertos, surge, en forma inmediata, la necesidad de establecer cuál es el nivel óptimo de inversión requerido por el mismo, tomando en cuenta el vínculo intertemporal entre los costos actuales y los retornos netos futuros. Para analizar esta problemática, se propone el uso de programación dinámica (Abel y Eberly, 1995). La literatura sobre el tema plantea que hay dos canales principales a través de los cuales la incertidumbre impacta en la dinámica de la inversión y la acumulación de capital. El primero, refleja la no linealidad de los beneficios operativos con respecto a las variables que caracterizan la incertidumbre (el

efecto Hartman (1972) Abel (1983) y Caballero (1991)) (HAC). El segundo, refleja las fricciones en el ajuste de capital, que se resumen en las diferentes formas de los costos del ajuste de capital.

Siguiendo la literatura mencionada, se formaliza el problema de maximizar el rendimiento de un proyecto, controlando la inversión. Se define una economía en la cual se encuentra una empresa neutral al riesgo que debe decidir el nivel de inversión I óptima, de manera de maximizar el valor actual esperado de la rentabilidad futura π , menos el costo necesario C , sujeto a una dinámica dada de su capital K y a las variaciones de una variable exógena estocástica Z . Utilizando los conceptos de programación dinámica (Dixit, AK y Pindyck, 1994) podemos expresar el problema de la siguiente forma:

$$F(K(t), Z(t)) = \max_t \left(\pi(K(t), Z(t)) - C(K(t), I(t)) + e^{-\rho dt} E_t(F(K(t+dt), Z(t+dt))) \right) \quad (3.1)$$

s.a.

$$dZ(t) = f(Z, \mu, \sigma)$$

$$dK(t) = g(K, I, \delta)$$

donde ρ es la tasa de descuento y δ la tasa de depreciación del capital (Wu, 2009). A continuación se analiza esta formalización del problema de inversión óptima.

3.1.2.1 Función de costos convexa

La función de costos $C(K(t), I(t))$ presentada depende del nivel de capital y del nivel inversión e incluye tanto los costos de compra directa de bienes de capital, como los costos asociados al ajuste de capital. Estos se introducen en la literatura de inversión como una forma conveniente para modelar las fricciones, retrasando la respuesta frente a nueva información sobre rentabilidad. En el sentido de la literatura tradicional, convexidad de la función costo requiere que la segunda derivada con respecto a la inversión sea positiva:

$$\frac{\partial^2 C(K(t), I(t))}{\partial I^2} > 0$$

Si bien hay acuerdo con respecto a este primer supuesto, la literatura se divide al agregar supuestos sobre la forma de la función costo. Un grupo de autores (HAC), asume que la primera derivada con respecto al capital es nula. Por otro lado, un segundo grupo, perteneciente a los estudios macroeconómicos sobre crecimiento, asume que la función de costos es linealmente homogénea con respecto a la inversión y al capital (Lucas y Prescott (1971), y Abel (2002)).

3.1.2.2 *Concavidad del beneficio neto*

Si la función de costos $C(K(t), I(t))$ es convexa y el beneficio $\pi(K(t), Z(t))$ es lineal, la función objetivo propuesta es cóncava. Esto asegura la existencia y unicidad de la solución al problema planteado.

Para que la función beneficio $\pi(K(t), Z(t))$ sea lineal es necesario asumir competencia perfecta en ambos factores y tecnología homogénea y lineal, quedando formalmente expresado por (Wu, 2009):

$$\begin{aligned}\pi(K(t), Z(t)) &= \max_{L(t)} [p(t) * K^\beta(t) * L^{1-\beta}(t) - w(t) * L(t)] \\ &= h(Z(t)) K(t)\end{aligned}\tag{3.2}$$

Es importante notar que la función $h(Z(t))$ es convexa, puesto que para un dado stock de capital, una vez resuelta la incertidumbre, la empresa puede ajustar por mano de obra para compensar a posteriori (Varian, 1992). Esta problemática del efecto sustitución entre capital y trabajo fue remarcada por Hartman (1976). La convexidad de la ganancia operativa con respecto a la incertidumbre, asegura una relación positiva entre incertidumbre y la inversión esperada debido a la desigualdad de Jensen (Abel, 1983). Este resultado lo generaliza Caballero (1991). Estos aportes se han resumido en la literatura como el efecto Hartman-Abel-Caballero.

Por el contrario, si la función costos $C(K(t), I(t))$ es lineal, se necesita que $\pi(K(t), Z(t))$ sea cóncava con respecto a K para garantizar la existencia de una solución única. Esto ha sido modelizado por Pindyck (1988) donde se asume

que cada unidad de capital permite producir una unidad por período de tiempo; junto con el requerimiento de una relación inversa precio-cantidad, nos asegura la concavidad de la ganancia operativa.

Para evaluar estos efectos, se mantienen todos los parámetros del modelo constantes salvo la volatilidad del proceso Z que contiene la incertidumbre. Se analiza primeramente el impacto en el corto plazo y luego en el largo plazo

3.1.2.3 Impacto en el corto plazo

La mayoría de los estudios en la literatura se han centrado en los efectos de la incertidumbre en el nivel de la inversión realizada por una empresa. Esta es una relación incertidumbre/inversión instantánea $\frac{\partial I(t)}{\partial \sigma}$.

Para evitar analizar un efecto instantáneo, varios autores, entre los que se encuentran Dixit y Pindyck (1994) proponen evaluar el promedio de la variación de la inversión $\frac{\partial E[I(t)]}{\partial \sigma}$.

Ahora bien, cualquier de las dos formulaciones asume que el proceso $Z(t)$ es constante lo cual no es cierto puesto que una variación de la volatilidad del proceso estocástico, cambia la distribución de $Z(t)$. Para compensar este efecto, los estudios empíricos utilizan la siguiente relación para contrastar con los datos:

$$\frac{\partial I(t)/\partial Z(t)}{\partial \sigma}$$

En otras palabras se analiza cómo impacta un cambio de la volatilidad sobre la capacidad de reacción de la inversión a cambios en $Z(t)$.

Mientras que en contextos de certidumbre existe un valor crítico que separa la decisión de invertir de la de no invertir; bajo incertidumbre, por el contrario, existe un rango donde es óptimo esperar. En particular es importante notar que la volatilidad de $Z(t)$ aumenta ese rango de inacción donde es óptimo continuar analizando el proyecto en lugar de invertir con consecuencias inciertas. Reconocer el impacto de la incertidumbre vuelve más cautelosos a los inversores. Es más, Bloom et al (2007) muestran que, si la inversión es irreversible, el aumento de la incertidumbre reduce la capacidad de respuesta de

la inversión a los cambios en la demanda⁶¹. Es más, si las empresas tienen costos de ajuste no convexos, la incertidumbre genera efectos medibles sobre la dinámica de la inversión. Bloom (2009) muestra, mediante un análisis econométrico estructural, el impacto de un cambio del nivel de incertidumbre en la producción durante los siguientes seis meses.

3.1.2.4 Impacto en el largo plazo

A pesar de la importancia del ajuste de capital a corto plazo, el stock de capital es lo que finalmente origina la producción y crea valor en la empresa. Por lo tanto, es importante analizar los efectos de largo plazo de la incertidumbre sobre el stock de capital. Abel (1984) presenta el primer trabajo⁶² donde explícitamente se estudian los efectos de la incertidumbre sobre el capital a largo plazo esperado (asumiendo costos de ajuste convexos). El autor analiza la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \lim_{s \rightarrow \infty} E_t(K(s))}{\partial \sigma}$$

Por su parte, Abel y Eberly (1999)⁶³ separan el stock de capital proveniente de inversiones irreversibles ($K^I(s)$), de aquel que se relaciona con proyectos reversibles ($K^R(s)$), modificando la expresión anterior:

$$\frac{\partial \lim_{s \rightarrow \infty} E_t(K^I(s))/E_t(K^R(s))}{\partial \sigma}$$

Los trabajos mencionados en esta subsección claramente muestran los efectos en el corto y en el largo plazo de la incertidumbre sobre las inversiones irreversibles. Es necesario ahora analizar como esto afecta a la valuación de dichas inversiones.

⁶¹ Para la contrastación empírica utilizan un modelo que articula diferentes costos del ajuste e incertidumbre dependiente del tiempo. Asimismo verifican la relación utilizando un panel de empresas manufactureras.

⁶² El autor utiliza un proceso de reversión a la media para modelar $Z(t)$.

⁶³ Los autores modelan $Z(t)$ mediante un *random walk*.

3.1.3 La valuación de inversiones irreversibles

La literatura sobre valuación de proyectos de inversión de los años noventa del siglo pasado ha remarcado dos de sus características más importantes. En primer lugar, en su mayoría, requieren inversiones irreversibles, por lo que son un costo hundido. En segundo lugar, muchas veces, es posible esperar nueva información sobre precios, costos y otras condiciones del mercado antes de comprometer los recursos⁶⁴. Es más, el carácter irreversible de una inversión, profundiza la exposición a diferentes riesgos: con respecto a los flujos de beneficios futuros, a las tasas de interés involucradas en el cálculo y al costo final de la inversión (Pindyck, 1991).

La irreversibilidad surge debido a que el capital involucrado en el proyecto no puede ser utilizado de manera productiva en otra inversión. Una planta petroquímica, por ejemplo, es específica para ser utilizada en la industria correspondiente, y sólo puede ser usada para producir artículos petroquímicos, por lo que si la demanda de productos del sector cae, el valor de mercado de la planta disminuye. Claramente, la inversión en la planta mencionada debe ser vista como un costo hundido, al menos parcialmente (se puede tomar como reversible el valor del terreno por ejemplo). Otra fuente de irreversibilidad parcial son los bienes de uso. Notoriamente, al invertir en amueblamiento de oficinas, computadoras o automóviles se sabe que el precio de reventa baja un instante luego de comprarlo; si bien no son específicos de la industria, tienen valor de reventa muy por debajo de su precio de compra (Pindyck, 1991). El concepto de irreversibilidad replantea el fundamento teórico de los modelos estándar de inversión neoclásicos, a la vez que invalida la regla del valor presente neto. Hace que la inversión sea especialmente sensible a la incertidumbre sobre precios de los productos futuros y sobre los costos (y duración) de la operación⁶⁵.

⁶⁴ Ben Bernanke (1983) ha desarrollado un modelo en donde las empresas tienen un incentivo para posponer inversiones irreversibles, para que puedan esperar información futura. Sin embargo, el autor asume que esta información reduce la incertidumbre futura, mientras que el presente trabajo se centra en las situaciones en que nueva información va llegando, pero el futuro es siempre incierto.

⁶⁵ Desde la perspectiva de la política macroeconómica, esto significa que si el objetivo es estimular la inversión, reducir la incertidumbre institucional puede ser mucho más importante que los incentivos fiscales directos.

Desde el punto de vista formal, una oportunidad de inversión irreversible es muy similar a una opción de compra financiera. Esta última otorga al tenedor el derecho (no la obligación) de comprar un activo a un precio de ejercicio durante un tiempo futuro determinado. En el contexto de la economía real, una empresa con una oportunidad de inversión tiene la opción de gastar el dinero (el "precio de ejercicio") ahora o en el futuro, a cambio de un activo (por ejemplo, un proyecto) de algún valor. Al igual que ocurre en el mercado de derivados, la opción de la empresa para invertir es valiosa, en parte, porque el valor futuro del activo que la empresa obtiene mediante la inversión, es incierto. Si el activo aumenta en el valor, la rentabilidad de la inversión se eleva. Si cae en el valor, la empresa no necesita invertir, y sólo se pierde lo que pagó para obtener la oportunidad de inversión al momento inicial. Muchas veces estas oportunidades de inversión no se compran, sino que surgen de la gestión de la empresa (conocimiento tecnológico, reputación, porción del mercado). Estas opciones para invertir son valiosas, siendo una parte sustancial del valor de mercado de muchas empresas⁶⁶.

Ahora bien, cuando una empresa realiza un proyecto irreversible, "ejerce" su opción de invertir. Esto ocasiona una pérdida que debe ser incluida como parte del costo de la inversión. Estudios recientes han demostrado que este costo de oportunidad puede ser grande, y las metodologías de valuación de proyectos que lo ignoran, cometen un error importante al hacerlo⁶⁷. Además, este costo de oportunidad es muy sensible a la incertidumbre sobre el valor futuro del proyecto, de modo que el cambio de las condiciones económicas que afectan al riesgo percibido de los flujos de efectivo futuros, puede tener un gran impacto en el gasto de inversión, pudiendo ser mayor que un cambio en las tasas de interés.

3.1.3.1 Histéresis

Si el valor futuro del proyecto es incierto y requiere un costo hundido inicial, se crea un costo de oportunidad de invertir, lo que abre una brecha entre el valor actual del proyecto y el costo directo de la inversión. Por ejemplo, al abandonar un proyecto en curso puede haber un costo hundido proveniente de los pagos de

⁶⁶ La importancia de las opciones reales de crecimiento como fuente de valor para la empresa está detallado en Myers (1977) y en Kester (1984).

⁶⁷ Véase, por ejemplo, McDonald y Siegel (1986b) Majd y Pindyck (1987).

indemnizaciones. Esto crea un costo de oportunidad de cerrar (el valor del proyecto podría aumentar en el futuro). Un ejemplo claro de lo anterior es la valuación de los proyectos mineros de inversión en los cuales hay costos hundidos (Brennan y Schwartz, 1985). Los autores analizan los efectos de los costos hundidos en la decisión de apertura y cierre de un negocio de extracción de materia prima. La mina está sujeta a derrumbes e inundaciones cuando no está en uso, por lo que un cierre temporal requiere incurrir en gastos hundidos para evitar perjuicios y, al reabrir, también se demandará un gasto considerable. El trabajo muestra cómo los costos hundidos de la apertura y el cierre de una mina, pueden explicar la histéresis observada. Aun, frente a precios bajos, muchos emprendedores continúan operando yacimientos no rentables que fueron abiertos en contexto de precios altos. Dixit (1989) formaliza lo anterior: si existen costos de oportunidad para entrar a una inversión, aumenta el precio crítico a partir del cual es óptimo entrar⁶⁸. En otras palabras, las empresas que entraron en una industria cuando el precio era muy alto, pueden permanecer allí durante un período de tiempo largo, aun cuando el precio caiga por debajo del costo variable.

3.1.3.2 Secuencialidad de las inversiones

Muchos proyectos de inversión requieren de varias etapas para ser completados y poder contar con un producto listo para el mercado. En estos casos, las inversiones se realizan por etapas. Por ejemplo, una inversión en una droga farmacéutica empieza con una etapa de investigación en el laboratorio que, con cierta probabilidad de éxito, conduce a un nuevo compuesto a testear. Luego, se realizan numerosas pruebas hasta que se obtenga la aprobación del ente del gobierno encargado de regular las drogas. Por último, se prepara la planta de producción y se comercializa a los usuarios. Todo este proyecto puede requerir hasta diez años.

Estos proyectos secuenciales pueden ser abandonados a medio camino, si el valor del producto final desciende o la inversión esperada se incrementa. Por lo tanto, estas inversiones pueden ser vistas como opciones compuestas; cada etapa terminada da a la empresa una opción para completar la siguiente etapa. Majd y

⁶⁸ Inversamente para salir de un proyecto.

Pindyck (1987) trabajan esta problemática, utilizando un modelo en el que una empresa invierte continuamente hasta completar el proyecto. Los autores proponen que la inversión puede ser detenida y reiniciada sin costo, imponen una tasa máxima a la que se puede incorporar dinero. Se demuestra que mientras que una alta volatilidad aumenta el costo de oportunidad de esperar, también reduce la tasa esperada de crecimiento del valor del proyecto durante la inversión. Por lo que la rentabilidad esperada al completar se reduce. Sin embargo, las inversiones secuenciales, muchas veces, se producen en etapas discretas, por lo que para encontrar la regla de inversión óptima, se debe realizar una inducción retrospectiva.

3.1.3.3 Aprendizaje

En lo analizado hasta el momento, los precios futuros son siempre inciertos, no habiendo aprendizaje. Ahora bien, en algunas inversiones secuenciales, las primeras etapas proporcionan información acerca de los costos o pagos netos en etapas posteriores. Por ejemplo, las inversiones en investigación y desarrollo determinan la eficacia y efectos secundarios de la droga y, por lo tanto, su valor.

En particular, Roberts y Weitzman (1981)) desarrollaron un modelo de inversión secuencial que contempla el aprendizaje, donde en cada etapa se obtiene información que reduce la incertidumbre del valor del proyecto terminado. El supuesto fundamental del modelo es que los precios y los costos no evolucionan estocásticamente; al invertir se aprende. La erogación realizada en las primeras etapas permite recopilar información, añadiendo valor, pues aumenta la información al momento de decidir la continuación en una etapa futura. De forma que, aunque a priori el valor actual neto de todo el proyecto sea negativo, puede ser conveniente invertir en las primeras etapas para bajar la incertidumbre y lograr un proyecto rentable futuro. Utilizando esta metodología, Weitzman, Newey, y Rabin (1981) evalúan la conveniencia de construir plantas piloto para la producción de combustible sintético, concluyendo que el aprendizaje acerca de los costos podría justificar estas inversiones iniciales⁶⁹.

⁶⁹ Existe un debate sobre el rol del gobierno en estas cuestiones, en particular, si las subvenciones para las plantas piloto están justificadas. Estas cuestiones se analizan en Joskow y Pindyck (1979).

3.1.3.4 *Inversiones incrementales.*

Hasta ahora se han examinado las decisiones de invertir en nuevos proyectos que requieren una inversión determinada para ser llevados adelante. Sin embargo, gran parte de la literatura económica, estudia la inversión incremental. Es decir, las empresas invierten de forma de igualar el costo marginal del capital al valor presente de los ingresos esperados⁷⁰.

El problema de incrementar la inversión para permitir un cambio de escala en la producción fue estudiado, inicialmente, por Manne (1961). El autor muestra que en un contexto de economías de escala, la incertidumbre sobre el crecimiento de la demanda implica un aumento del tamaño óptimo de las inversiones, creciendo el valor presente de los costos esperados. Muchas veces, la elección del tamaño de la planta de producción, conlleva una elección sobre la tecnología a utilizar. Pindyck (1988) determina, al mismo tiempo, el nivel óptimo de capital y la elección con respecto a la flexibilidad tecnológica.

En particular, Pindyck (1988) desarrollan un modelo que tiene en cuenta la posibilidad de inversión incremental en un contexto de proyectos irreversibles. La empresa está expuesta a una función de demanda estocástica. El autor demuestra que, en contextos de alta incertidumbre de la demanda, es óptimo contar con un capital menor. Sin embargo, aunque a priori no sea intuitivo, el valor de mercado de la empresa sube⁷¹.

Como se mencionó en la sección anterior, Hartman (1972) señala que en el caso de una empresa competitiva que combina capital y trabajo con una función de producción homogénea lineal, la incertidumbre en la demanda incrementa la inversión. Es más, Abel (1983) extiende el resultado de Hartman a un modelo dinámico en el que el precio sigue un movimiento browniano geométrico con costos convexos de ajuste del capital. El autor coincide con Hartman al demostrar que la incertidumbre aumenta la tasa de inversión de la empresa. Por último, en esta línea argumental, Caballero (1989) presenta costos asimétricos de ajuste para

⁷⁰ Nickell (1978) presenta un resumen de la literatura sobre este tema.

⁷¹ La idea de que la incertidumbre sobre la futura demanda puede aumentar el valor de una unidad marginal del capital no es nueva. Todo lo que se requiere es que el ingreso del producto marginal del capital sea convexa en el precio.

permitir la irreversibilidad y muestra que a mayor incertidumbre de los precios, aumenta la tasa de inversión. Sin embargo, los resultados de Hartman, Abel y Caballero (efecto HAC), requieren asumir rendimientos constantes y competencia perfecta, haciendo el rendimiento del producto marginal del capital, independiente del stock actual. Como muestra también Caballero, si los rendimientos son decrecientes o hay competencia imperfecta, la conclusión presentada anteriormente, propuesta por Pindyck, se verifica.

3.1.3.5 Equilibrio competitivo y proceso de precios

En un equilibrio competitivo, el nivel de inversión de las empresas depende de los precios de mercado que la interacción entre aquellas colectivamente genera. Este problema se analiza en Leahy (1993), donde el autor extiende el trabajo de Dixit (1989), endogenizando el precio y muestra que el precio depende, fuertemente, de los shocks sobre la demanda hasta que una barrera de entrada (o de salida) se alcanza. Lo más interesante del trabajo es que no hay diferencia en los resultados, si las empresas toman de cuenta la entrada (o salida) o, simplemente, asumen que los precios siguen un movimiento geométrico browniano. Esto sugiere que los modelos en los que el precio es exógeno, proporcionan una descripción plausible para los problemas analizados.

3.1.3.6 Políticas públicas

Los trabajos presentados en esta sección, especialmente Pindyck (1988), claramente, argumentan que el nivel de incertidumbre es el determinante más importante para entender el nivel de inversión. Esto le asigna una indiscutible relevancia para el diseño de políticas públicas. Particularmente, Ingersoll y Ross (1992) han examinado decisiones de inversión sobre proyectos irreversibles donde la tasa de interés evoluciona estocásticamente, pero los flujos de efectivo futuros se conocen con certeza. Al igual que con la incertidumbre sobre los flujos de efectivo futuros, esto crea un costo de oportunidad de invertir. A diferencia de la metodología tradicional de valor presente, la inversión debe hacerse sólo cuando la tasa de interés está por debajo de una tasa crítica, que es inferior a la TIR. Por otra parte, la diferencia entre dichas tasas crece a medida que la volatilidad de las tasas de interés crece. Ingersoll y Ross sugieren que el nivel de

las tasas de interés tiene una importancia secundaria y que la volatilidad de la misma es la que determina la inversión agregada. Lo expuesto implica que para estimular la inversión, la estabilidad y la credibilidad pueden ser más importante que los incentivos fiscales o de tasas de interés (Pindyck, 1991).

3.1.4 Modelo básico de valuación de inversiones bajo incertidumbre

En esta subsección se desarrolla un modelo elemental para la valuación de inversiones bajo incertidumbre. Primeramente se presenta un ejemplo donde la utilización de VAN puede llevar a una decisión de inversión errónea. Luego se presenta un modelo de inversión en contexto cierto, para ser comparada con la última parte donde se presenta la metodología básica de Dixit-Pindyck para valuación de inversiones en contextos inciertos.

3.1.4.1 Ejemplo del valor de esperar

Inicialmente se presenta un ejemplo donde evaluar la inversión con el criterio VAN puede llevar a error. Se parte de un proyecto que contempla dos posibles escenarios futuros, cada uno con 50% de probabilidad. El primero produce un beneficio neto de \$8 por período por siempre, el segundo \$24 en las mismas condiciones. Asimismo se supone una tasa de descuento del 5% por período, por lo cual el valor actual de este proyecto es:

$$VA = \frac{\$8}{.05} * 0.5 + \frac{\$24}{.05} * 0.5 = \$320$$

Si el costo inicial es \$200 entonces el valor actual neto es:

$$VAN = \frac{\$8}{.05} * 0.5 + \frac{\$24}{.05} * 0.5 - \$200 = \$120 > 0$$

Al ser positivo la regla del VAN nos indica que conviene hacer la inversión al momento inicial pues es rentable. ¿Qué hubiera pasado si se espera hasta el segundo período para decidir la inversión? Claramente, por un lado se pierde el primer pago, pero por otro tenemos certeza de cuáles serán los pagos futuros. Si al momento 2 el camino que se descubre es el que paga \$8, el VAN es negativo:

$$\frac{\$8}{.05} - \$200 = -\$40 < 0$$

Si al momento 2, el pago es de \$24:

$$\frac{\$24}{.05} - \$200 = \$280 > \$120$$

El valor actual es mayor que si hubiéramos invertido al momento inicial, esperar un período en el ejemplo ha permitido evitar una inversión desfavorable. En otras palabras, la posibilidad de invertir en un proyecto hoy, compite contra la alternativa de esperar e invertir en el proyecto en el futuro.

Diversos factores pueden dar cuenta de esta situación. La histéresis: Esperar tiene valor cuando hay incertidumbre el pago futuro, cuando se aprende con el paso del tiempo o cuando la inversión es de carácter irreversible. Este valor agregado al VAN que aparece por esperar se denomina en la literatura “valor de la opción” (en obvia referencia a las opciones financieras).

3.1.4.2 *Valuación en contextos ciertos.*

A los fines de poder comparar con la situación de incertidumbre, esta subsección presenta un modelo de valuación en contexto cierto, donde el valor del proyecto completado se sabe con certeza. La decisión de inversión que obtendremos nos permitirá abandonar el proyecto si es necesario y maximizar el valor de la firma en un mercado competitivo. Consideremos una inversión en un proyecto cuyo costo de finalización cierto es “ C ”, la tasa de inversión es “ I ” (con un valor máximo I_{MAX}) y tiene una duración “ T ”. Cuando se completa el proceso, la firma recibe un activo con valor igual a V . Teniendo en cuenta que el proyecto toma un tiempo $T = \frac{C}{I_{MAX}}$ en ser completado, la oportunidad de invertir tiene un valor $F(C)$ dado por (He y Pindyck, 1992):

$$F(C) = \max \left[V e^{-r \frac{C}{I_{MAX}}} - \int_0^{\frac{C}{I_{MAX}}} I_{MAX} e^{-rt} dt ; 0 \right] \quad (3.3)$$

Siendo r la tasa libre de riesgo.

Resolviendo la integral y reordenando queda:

$$F(C) = \max \left\{ \left(V + \frac{I_{MAX}}{r} \right) e^{-r \frac{C}{I_{MAX}}} - \frac{I_{MAX}}{r}; 0 \right\}$$

La regla de inversión óptima sería avanzar con el proyecto si $F(C) > 0$, es decir, si $C < C^*$. Para obtener C^* debemos obtener el valor de C que hace indiferente el máximo planteado. En otras palabras, para que valor de C el primer componente del máximo se iguala a cero.

$$\begin{aligned} \left(V + \frac{I_{MAX}}{r} \right) e^{-r \frac{C}{I_{MAX}}} - \frac{I_{MAX}}{r} = 0 &\Rightarrow \left(\frac{r}{I_{MAX}} V + 1 \right) e^{-r \frac{C}{I_{MAX}}} = 1 \Rightarrow e^{-r \frac{C}{I_{MAX}}} \\ &= \frac{1}{\left(\frac{r}{I_{MAX}} V + 1 \right)} \end{aligned}$$

Aplicamos logaritmo a ambos miembros:

$$\ln[e^{-r \frac{C}{I_{MAX}}}] = \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{I_{MAX}} V + 1 \right)} \right] \Rightarrow -r \frac{C}{I_{MAX}} = 0 - \ln \left(\frac{r}{I_{MAX}} V + 1 \right) \Rightarrow$$

$$\boxed{C^* = \ln \left(\frac{r}{I_{MAX}} V + 1 \right) \frac{I}{r}} \quad (3.4)$$

3.1.4.3 La metodología de Dixit-Pindyck

Uno de los primeros modelos de valuación de proyectos irreversibles es el de (McDonald y Siegel, 1986a). Los autores analizan en qué momento es óptimo invertir, recibiendo a cambio un proyecto cuyo valor es V que evoluciona de acuerdo a un movimiento browniano geométrico. La oportunidad de inversión es equivalente a una opción de compra perpetua, y la decisión de inversión es equivalente a decidir cuándo ejercer tal opción. Por lo tanto, la decisión de inversión puede ser vista como un problema de valuación de opciones. Por su parte Pindyck (1991) presenta algunos modelos simples de la inversión irreversible, y muestra cómo las reglas óptimas de inversión y la valuación de proyectos pueden obtenerse a partir del análisis demandas contingentes, propias de la matemática financiera, o bien mediante programación dinámica. En el

presente trabajo nos concentraremos en las soluciones mediante programación dinámica.

Un proyecto de inversión cuyo valor V es un proceso estocástico que sigue un movimiento browniano geométrico, está representado por:

$$dV(t) = \alpha V(t)dt + \sigma V(t)dz \quad (3.5)$$

La decisión de inversión consiste en elegir en que momento invertir I para entrar en el proyecto, en otras palabras para que valor de $V(t)$ es óptimo realizar el pago.

Si la tasa de descuento es ρ , la ecuación de Bellman correspondiente al valor de la opción es:

$$F(V(t)) = \max \left(V(t) - I, e^{-\rho dt} E \left(F(V(t + dt)) \right) \right) \quad (3.6)$$

La metodología de resolución propuesta consiste en convertir el problema en un problema de parada óptima y analizar la regla de decisión correspondiente.

Regla de decisión

Existe un valor crítico V^* que separa la región donde es óptimo esperar ($V < V^*$) de la zona donde detenerse es la mejor opción.

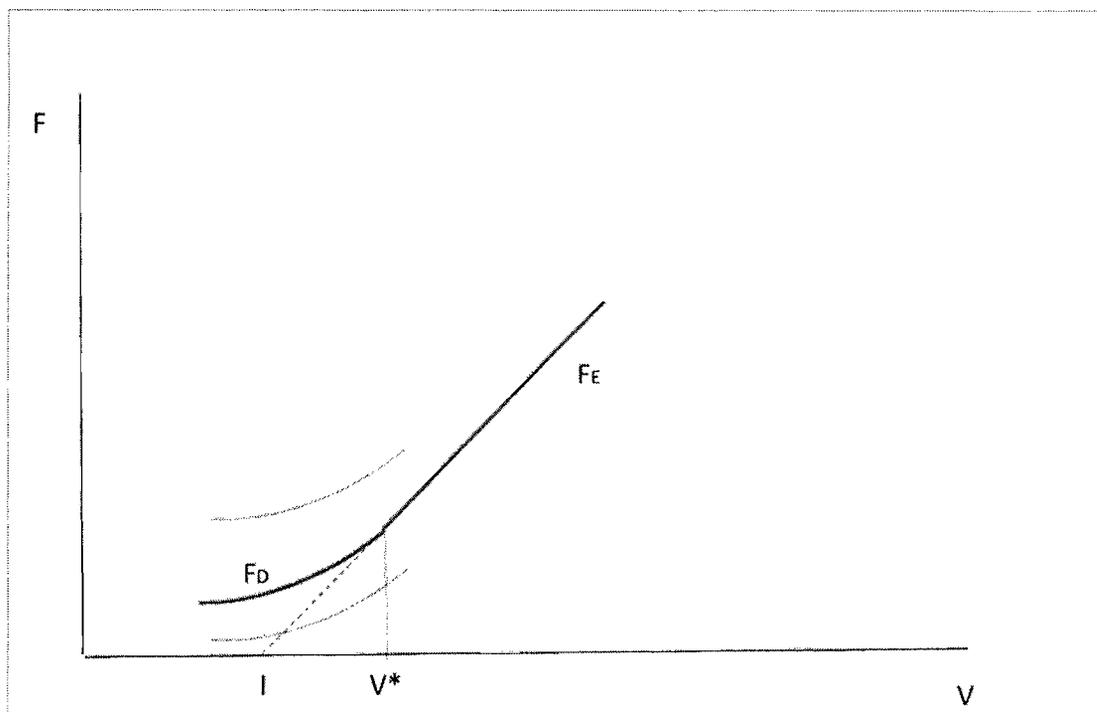
$$\text{Si } V < V^* \Rightarrow F_E(V(t)) = e^{-\rho dt} E \left(F_E(V(t + dt)) \right)$$

$$\text{Si } V > V^* \Rightarrow F_D(V(t)) = V(t) - I$$

$$\text{Si } V = V^* \Rightarrow F_E(V^*) = F_D(V^*) \quad (\text{Continuidad de la función } F)$$

$$\frac{dF_E}{dV}(V^*) = \frac{dF_D}{dV}(V^*) \quad (\text{Continuidad de la primera derivada de } F)$$

Se requiere que se cumpla la condición de monotonía para F_D y F_E y para $V(t+dt)$ dado $V(t)$



3.1. Valor de la opción de esperar en función de V

En la región donde es óptimo esperar:

$$F_E(V(t)) = e^{-\rho dt} E \left(F_E(V(t + dt)) \right)$$

Multiplicando ambos miembros por $e^{\rho dt}$,

$$e^{\rho dt} F_E(V(t)) = E \left(F_E(V(t + dt)) \right)$$

Restando $F_E(V(t))$

$$(e^{\rho dt} - 1) F_E(V(t)) = E \left(F_E(V(t + dt)) - F_E(V(t)) \right)$$

Dividiendo por Δt

$$\frac{(e^{\rho \Delta t} - 1)}{\Delta t} F_E(V(t)) = \frac{E \left(F_E(V(t + \Delta t)) - F_E(V(t)) \right)}{\Delta t}$$

Si $\Delta t \rightarrow 0$

$$\rho F_E(V) = \frac{E \left(dF_E(V) \right)}{dt}$$

Por otro lado como sabemos que V sigue un movimiento browniano geométrico, podemos escribir utilizando el lema de Ito, el proceso de $dF_E(V)$:

$$dF_E(V) = \left(F'_E(V)\alpha V + \frac{1}{2} F''_E(V)\sigma^2 V^2 \right) dt + F'_E(V)\sigma V dz$$

La esperanza es:

$$E(dF_E(V)) = \left(F'_E(V)\alpha V + \frac{1}{2} F''_E(V)\sigma^2 V^2 \right) dt$$

Por lo que

$$\rho F_E(V) = \frac{E(dF_E(V))}{dt} = F'_E(V)\alpha V + \frac{1}{2} F''_E(V)\sigma^2 V^2$$

Convirtiendo el problema original en una ecuación diferencial ordinaria sujeta a restricciones:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V^2 F''_E(V) + \alpha V F'_E(V) - \rho F_E(V) = 0 \quad (3.7)$$

$$\text{s.a.} \quad F_E(0) = 0, F_E(V^*) = V^* - I, F'_E(V^*) = 1$$

Se propone la forma de la solución: $F_E(V) = C V^\beta$, por lo que la ecuación característica es:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 \beta(\beta - 1) + \alpha\beta - \rho = 0$$

Por lo que tenemos dos raíces $\beta_1 > 1$ y $\beta_2 < 0$

$$F_E(V) = C_1 V^{\beta_1} + C_2 V^{\beta_2}$$

La restricción $F_E(0) = 0$ nos impone que el término con el exponente negativo no puede existir, por lo que $C_2 = 0$.

Finalmente, utilizando las otras restricciones se puede afirmar que el valor de la constante de integración C_1 está dada por

$$C_1 = \left(\frac{\beta_1 - 1}{I} \right)^{\beta_1 - 1} \beta_1^{-\beta_1} \quad (3.8)$$

y el valor crítico en cuestión es:

$$V^* = \frac{\beta_1}{(\beta_1 - 1)} I \quad (3.9)$$

3.2 El cálculo estocástico y la valuación de opciones reales

Esta sección presenta algunos métodos estocásticos que permiten resolver problemas de valuación de opciones reales que serán utilizados en el próximo capítulo de este trabajo. Primeramente se presenta la valuación de una opción binaria. La siguiente subsección describe el modelo tradicional de valuación de opciones de compra europeas (Fórmula de Black y Scholes). Por último se presenta un modelo de cálculo del precio de una opción de venta bermuda utilizando simulación de Montecarlo.

3.2.1 Valuación de una opción binaria

Esta sección desarrolla la valuación de una opción que paga una suma fija cuando el subyacente alcanza un determinado valor antes de una determinada fecha límite. Sabiendo que el activo subyacente se representa por un proceso browniano geométrico, el precio de la opción se calcula como el valor esperado del pago descontado al momento de valuación (Lin, 2006).

Dado un activo S sigue un movimiento browniano geométrico dado por:

$$S(t) = S(0)e^{at+bW(t)} \quad (3.10)$$

donde $W(t)$ es un movimiento browniano estándar. El problema es encontrar el precio al momento inicial de una opción binaria que paga un monto fijo (\$1) al momento que cruza una barrera $U > S(0)$ antes del momento T .

Para poder realizar la valuación, lo primero es calcular la variable aleatoria τ_u , el primer momento en el cual el activo S alcanza la barrera U:

$$\tau_u = \inf \{ t, S(t) \geq U \}.$$

3.2.1.1 Función de distribución de τ_u

Derivar la función de distribución de τ_u requiere trabajar con un proceso $Z(t)$ construido de manera tal que sea martingala. Luego se aplica el teorema de muestreo óptimo sobre esta martingala y por último se asocian los resultados obtenidos con la transformada de Laplace para así entender la forma de la función de densidad de acuerdo a la relación biunívoca que existe entre la transformada de Laplace de una variable aleatoria y su función de distribución. En el apéndice, y siguiendo a Lin (2006), se realiza el cálculo matemático correspondiente. En el mismo se muestra que si hacemos $\alpha = a \frac{u}{\sigma^2}$ y $\beta = \frac{u^2}{\sigma^2}$ se verifica que τ_u tiene distribución Gaussiana Inversa con los parámetros descriptos y que la transformada de Laplace de una función gaussiana inversa es:

$$\tilde{f}_{IG}(z) = e^{\alpha \times \left(1 - \sqrt{1 + 2 \times \frac{z}{\beta}} \right)} \quad (3.11)$$

3.2.1.2 Cálculo del precio de la opción

A partir de esta variable aleatoria podemos escribir el pago como una variable aleatoria:

$$Pago = 1 \times I_{\{\tau_u \leq T\}}$$

Claramente se paga siempre que el activo alcance el valor U antes del vencimiento de la opción. Si se considera la tasa de interés r constante, el valor presente del pago es una variable aleatoria dada por:

$$Pago(0) = 1 \times I_{\{\tau_u \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_u}$$

Por consiguiente, el precio al momento cero es la esperanza de la variable en cuestión:

$$\text{Precio} = E(\text{Pago}(0)) = E\left(I_{\{\tau_U \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_U}\right) \quad (3.12)$$

Si reemplazamos por la función de densidad de τ_U obtenida anteriormente,

$$\begin{aligned} E\left(I_{\{\tau_U \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_U}\right) &= \int_0^T e^{-r \times t} \times \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-(\beta t - \alpha)^2 / 2\beta t} dt \\ &= \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\left((\beta t - \alpha)^2 + r \times t^2 \times 2 \times \beta^2\right) \times \frac{1}{2\beta t}} dt \\ &= \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\left(\beta^2 t^2 - 2\beta\alpha t + \alpha^2 + r \times t^2 \times 2 \times \beta^2\right) \times \frac{1}{2\beta t}} dt \end{aligned}$$

En el apéndice se resuelve esta esperanza, lo cual permite encontrar la fórmula de valuación del precio en función de los parámetros:

$$\text{Precio} = \frac{S(0)}{U} \times N\left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}}\right) + \left(\frac{U}{S(0)}\right)^{\left(\frac{2r}{\sigma^2}\right)} N\left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}}\right)$$

3.2.2 Valuación de una opción de compra europea: La fórmula de Black y Scholes

Como se menciona en el apartado anterior, la valuación de opciones reales puede realizarse utilizando los instrumentos del sector financiero. Por consiguiente en esta sección se desarrolla la demostración de la fórmula de Black y Scholes (1973a), la cual permite el cálculo del valor presente de una opción de compra europea dada. En esta subsección se presenta la demostración de la fórmula propuesta por Lin (2006).

3.2.2.1 Supuestos

Dentro de un marco de equilibrio general los autores imponen varios supuestos para encontrar una solución analítica al problema. Primeramente, el subyacente es

una acción que no paga dividendos durante la vida de la opción. En segundo lugar, el precio del activo subyacente sigue un movimiento geométrico browniano. En tercer lugar, la volatilidad del precio del subyacente es constante. Asimismo, se permiten las ventas en descubierto, no hay costos de transacción y el mercado opera en forma continua. En quinto lugar, el mercado del subyacente es líquido y divisible y existe un mercado de crédito en el cual pueden tomarse o prestar fondos a una tasa libre de riesgo constante. Por último se postula que no existen oportunidades de arbitraje (esto es, el mercado está en equilibrio). Los siguientes párrafos formalizan los supuestos mencionados.

Comportamiento del subyacente S

Si el precio del activo subyacente sigue un proceso geométrico browniano puede escribirse:

$$dS = \mu \times S \times dt + \sigma \times S \times dW \quad (3.13)$$

Ahora bien, dado que se procede a valorar un derivado cuyo valor depende del tiempo y del valor del subyacente ($\Phi(S,t)$) es posible aplicar el Lema de Itô⁷².

Entonces el proceso derivado $\Phi(S,t)$ puede escribirse como:

$$d\Phi = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial S} \times \mu \times S + \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2\Phi}{\partial S^2} \times \sigma^2 \times S^2 \right) dt + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial S} \times \sigma \times S \right) dw \quad (3.14)$$

Instrumentos del mercado de crédito

Si se considera la existencia de un mercado de crédito al cual puede tomarse o prestarse dinero a una tasa constante e igual a la tasa libre de riesgo (tasa con composición continua “r”) el monto de la deuda o de la inversión, a la que puede denominarse B, sólo depende del paso del tiempo. Sea B₀ la deuda / inversión inicial esta crecerá de acuerdo a la tasa de interés:

⁷² Este lema establece que cualquier proceso que sea función del tiempo y de un proceso de Itô es también un proceso de Itô con tendencia y volatilidad calculada a partir de la tendencia y volatilidad del proceso subyacente.

$$B_t = B_0 \times e^{rt} \Rightarrow dB_t = B_0 \times r \times e^{rt} dt \Rightarrow dB_t = B_t \times r \times dt \quad (3.15)$$

3.2.2.2 Ecuación diferencial de Black & Scholes

El supuesto de mercado en equilibrio implica que no existe posibilidad de arbitraje dentro del mercado financiero. Esto es, no es posible obtener ganancia sin asumir un riesgo. Consecuentemente, dos carteras que proporcionan el mismo resultado en un determinado momento del tiempo deben necesariamente tener el mismo valor hoy.

Se plantea entonces la construcción de una cartera que, infinitesimalmente, replique el valor del derivado. Esta cartera estará compuesta del activo subyacente y de una inversión a tasa libre de riesgo. En cada instante de tiempo (dado que se está suponiendo que no existen costos de transacción y que el mercado opera de manera continua) esta cartera se ajusta de manera de que siempre replique el valor del derivado en el momento siguiente y se autofinancia (se modifica en composición desde su construcción pero no requiere de nuevos ingresos ni egresos de dinero hasta el vencimiento).

Si se considera B al monto invertido a tasa libre de riesgo y $\Theta(S,t)$ el valor de la posición en subyacente (que puede interpretarse como la cantidad de activos en los que se está posicionado multiplicado por el valor de cada uno de los activos), el valor de la cartera C al momento t :

$$C_t = B_t + \Theta(S,t)$$

Además, esta cartera se construyó de manera que replique el valor del derivado. Por lo tanto:

$$C_t = \Phi(S,t)$$

Por lo que:

$$\Phi(S,t) = B_t + \Theta(S,t) \Rightarrow B_t = \Phi(S,t) - \Theta(S,t) \quad (3.16)$$

Adicionalmente, se consideró una estrategia autofinanciable: si bien varía la composición de la cartera no es necesario inyectar nuevos fondos. Las ganancias o pérdidas de capital serán reinvertidas o asumidas en cada momento del tiempo.

$$dC_t = B_t \frac{dB}{B} + \Theta(S, t) \frac{dS}{S}$$

Reemplazando el valor de (3.16) en la ecuación y teniendo en cuenta que la cartera replica el valor del derivado es posible escribir:

$$d\Phi(S, t) = \left(\Phi(S, t) - \Theta(S, t) \right) \frac{dB}{B} + \Theta(S, t) \frac{dS}{S} \quad (6) \quad (3.17)$$

Esta ecuación puede completarse de acuerdo a las expresiones (3.13) y (3.15) que explican el comportamiento del subyacente y del mercado libre de riesgo.

$$d\Phi(S, t) = \left(\Phi(S, t) \times r + (\mu - r) \times \Theta(S, t) \right) dt + \Theta(S, t) \times \sigma \times dW \quad (3.18)$$

En la expresión (3.14) se calculó el proceso estocástico que sigue el derivado en función del Lema de Itô. Ambas expresiones debieran ser equivalentes dado que detallan el comportamiento del derivado en base a un componente determinístico (tendencia) y un componente aleatorio, siendo la aleatoriedad producto de un movimiento browniano estándar.

Igualando los componentes determinísticos y de volatilidad en las expresiones (3.14) y (3.18) se tiene que:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial S} \times \mu \times S + \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S^2} \times \sigma^2 \times S^2 = \Phi(S, t) \times r + (\mu - r) \times \Theta(S, t) \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial S} \times \sigma \times S = \Theta(S, t) \times \sigma \Rightarrow \Theta(S, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial S} \times S \quad (3.20)$$

La ecuación (3.20) señala que la cantidad de subyacente que debe mantenerse en una cartera autofinanciable que replique el valor del derivado es igual a la sensibilidad del instrumento respecto del subyacente. Este resultado puede reemplazarse en la ecuación (3.19):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial S} \times \mu \times S + \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S^2} \times \sigma^2 \times S^2 = \Phi(S, t) \times r + (\mu - r) \times \frac{\partial \Phi}{\partial S} \times S$$

Agrupando los términos de esta última expresión y tomando como factor común el valor de las derivadas del instrumento se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial S} \times (\mu \times S - (\mu - r) \times S) + \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S^2} \times \sigma^2 \times S^2 - \Phi(S, t) \times r &= 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial S} \times (r \times S) + \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S^2} \times \sigma^2 \times S^2 - \Phi(S, t) \times r &= 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

La expresión (3.21) constituye la ecuación diferencial de Black y Scholes, cuya solución es:

$$\Phi(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi \left(S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) + \sigma \times \sqrt{T-t} \times y} \right) \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (3.22)$$

3.2.2.3 Reescritura en la medida de probabilidad Q

Es importante destacar que la expresión (3.22) no depende de la tendencia determinística del subyacente, pero sí de su volatilidad. Esta expresión se corresponde con una esperanza matemática descontada a la tasa libre de riesgo r desde el vencimiento de la opción y hasta el momento de valuación. La aleatoriedad en este caso está dada por la variable “ y ” que, dada la forma de la función de densidad, tiene distribución normal estándar. Puede interpretarse entonces este resultado considerando que bajo una medida de probabilidad Q el subyacente sigue un proceso geométrico browniano en donde el componente estocástico está modelizado por un movimiento browniano estándar y bajo el supuesto de neutralidad a riesgo.

$$dS(t) = r \times S(t) \times dt + \sigma \times S(t) \times dW_Q(t)$$

De acuerdo a lo anterior, la medida de probabilidad Q se considera como la *medida de probabilidad riesgo neutral*.

La expresión (3.22) puede reinterpretarse de la manera siguiente:

$$\Phi(S,t) = e^{-r \times (T-t)} \times E_Q \{ \Phi(S_T) | S(t) = S \} \quad (3.23)$$

3.2.2.4 Valuación de un Call Europeo

El pago al momento T de un call europeo viene dado por:

$$\Phi(S,T) = \max(S_T - K; 0) \quad (3.24)$$

Reemplazando (3.24) en (3.22):

$$Call(S,t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \max \left(S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) + \sigma \times \sqrt{T-t} y} - K; 0 \right) \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

En el apéndice se resuelve la integral, encontrando la fórmula conocida de valuación de una call europea:

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r + \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}} \quad d_2 = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}} \quad (3.25)$$

$$Call(S,t) = S \times N(d_1) - K \times e^{-r(T-t)} \times N(d_2)$$

3.2.3 Valuación de una opción de venta bermuda utilizando simulación de Montecarlo

Para la valuación de derivados simples, como la opción de venta europea, habitualmente existe una fórmula analítica de cálculo, en particular el modelo de Black y Scholes (1973b) ha jugado un papel fundamental en la fijación de precios y en la cobertura mediante opciones; siendo imprescindible para el crecimiento y el éxito de la ingeniería financiera en los años 1980⁷³.

Varios autores introdujeron métodos numéricos basados en técnicas de MonteCarlo (véase, entre otros, Broadie y Glasserman, 2004; Carriere, 1996; Glasserman, 2004; Tsitsiklis y Van Roy, 1999). El punto de partida de estos métodos consiste en sustituir el intervalo continuo de tiempo hasta la fecha de

⁷³ En 1997, Myron Scholes y Robert Merton recibieron el premio Nobel de Economía por desarrollar el modelo Black-Scholes. Por desgracia, Fischer Black había muerto en 1995, de lo contrario, habría sido también uno de los destinatarios.

ejercicio, por un subconjunto finito de subintervalos. Esto equivale a aproximar la opción americana por una opción llamada Bermuda, la cual permite el ejercicio en ciertos intervalos discretos. Como se mencionó anteriormente, la solución de los problemas de optimización discreta se reduce a una aplicación efectiva del principio de programación dinámica.

Esta subsección presenta el modelo de valuación de opciones de venta bermuda propuesto por Longstaff y Schwartz (2001).

3.2.3.1 Opción de venta bermuda

Un contrato de opción americana de venta sobre un activo, autoriza al titular del contrato a vender el activo durante un plazo de tiempo predeterminado hasta la fecha de vencimiento. Durante ese periodo, el titular de la opción puede vender el activo por una cantidad acordada, al precio de ejercicio⁷⁴. La flexibilidad que tiene la opción americana de poder ejercerse en cualquier momento previo al vencimiento, agrega complejidad a la valuación. Asimismo, el cálculo de los precios de las opciones americanas realizado en forma numérica también es un desafío pues formalmente existen infinitos puntos de decisión donde se puede ejercer o no.

Desde el punto de vista de la teoría matemática, este problema es equivalente al de parada óptima, donde se evalúa en qué momento es más rentable detener un proceso. Estos problemas se resuelven por programación dinámica, partiendo de la certeza de los valores al vencimiento y retrocediendo hasta llegar al punto inicial de forma de describir el camino óptimo. En nuestro problema particular debemos también incorporar la incertidumbre del activo por lo que no es un problema matemático de programación dinámica determinística, sino que es estocástica⁷⁵.

Ahora bien, las expectativas condicionales involucradas en el proceso de iteración de programación dinámica son la principal dificultad para el desarrollo de las técnicas de Montecarlo. Una forma de tomar en cuenta este problema es

⁷⁴ Mientras que las opciones americanas pueden ejercerse en cualquier momento hasta la fecha de vencimiento, las denominadas europeas sólo pueden ejercerse en la fecha de vencimiento.

⁷⁵ Desde los setenta se ha utilizado un enfoque probabilístico para la valuación de los contratos financieros (Harrison y Kreps, 1979).

realizar cada período una regresión cuadrática sobre un conjunto finito de funciones como sustituto de la esperanza condicional. Esta idea es la novedad introducida por Longstaff y Schwartz (2001) (LSM). Asimismo, la convergencia del método cuando los caminos de simulación tienden a infinito ha sido probado por (Clément, Lamberton y Protter, 2002).

El algoritmo LSM primeramente simula N caminos de trayectorias de precios del activo subyacente desde el momento de valuación hasta llegar al vencimiento (T). Luego se realizan iteraciones retrospectivas, estimando (por mínimos cuadrados) en cada nodo la función de la continuación en función del valor del activo. Éste es comparado con el valor de ejercer y se elige el mayor como valor de la opción en el nodo. Para finalizar se suman los valores actuales de los valores de ejercicio en cada camino y se divide por la cantidad de simulaciones. A continuación detallaremos primeramente el modelo y luego el algoritmo de solución correspondiente.

3.2.3.2 Simulación del proceso de precios

El precio del activo subyacente sigue un proceso browniano geométrico que viene dado diferencialmente por:

$$dS = Sadt + S\sigma dz \quad (3.26)$$

Donde S es el precio del activo subyacente, $dz = \varepsilon \sqrt{dt}$ es el incremento infinitesimal de un proceso browniano, ε es la distribución normal estándar, a es la tasa de ganancia y σ es la volatilidad del proceso. Siguiendo a la literatura de valuación de opciones y asumiendo una inversora neutral al riesgo el proceso queda definido por:

$$dS = S\left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)dt + S\sigma dz, \quad (3.27)$$

donde r es la tasa libre de riesgo del mercado.

A los fines del problema, discretizamos la ecuación diferencial estocástica, obteniendo la siguiente ecuación en diferencias:

$$\Delta S = S_t \left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) \Delta t + S_t \sigma \varepsilon \sqrt{\Delta t} \quad (3.28)$$

$$\text{con } S_{t+1} = S_t + \Delta S \quad \text{y } S_0 \text{ es dato}$$

A partir de esta ecuación y su condición inicial, se arma una matriz del proceso de precios del activo subyacente con N filas (camino de simulación) y $M + 1$ columnas (pasos temporales donde $M = \frac{T}{\Delta t}$)

3.2.3.3 Inducción retrospectiva y precio de la opción

Ahora bien, en base a los valores simulados de los precios al momento T (para cada uno de los caminos) se puede valorar la opción al momento del vencimiento T que viene dada por la siguiente expresión:

$$C_T = \max(X - S_T, 0) \quad (3.29)$$

Con la última columna completa, se comienza a retroceder en el tiempo por cada camino de simulación. Nótese que en cada nodo se debe decidir si es conveniente ejercer o esperar otro paso más. Formalmente la regla de parada para este algoritmo de programación dinámica es comparar en cada nodo el valor de ejercer contra el valor de continuar un paso más descontado un período:

$$\max(X - S_t, 0) \quad \text{vs} \quad E \left[C_{t+1} / \mathcal{F}_t \right] e^{-r\Delta t}$$

Mientras que el valor de ejercer surge directamente de la matriz de precios, el valor descontado de continuar es complejo pues involucra una esperanza matemática condicional a la información disponible⁷⁶. En otras palabras, debemos contar con la expresión de la esperanza en función de S_t para su cálculo. La solución propuesta por LSM es estimar esa relación recurriendo a una regresión matemática que es posible pues se cuenta con la información de varios caminos al mismo tiempo. En concreto, se estima realizando una regresión entre el valor de continuación descontado y los valores de S_t (para los diferentes caminos de simulación).

⁷⁶ Siendo más precisos, es una esperanza condicionada a una filtración \mathcal{F}_t

El algoritmo LSM propone elegir una colección de funciones independientes para realizar la regresión. Para el presente ejercicio elegimos $1, S, S^2$ que actúan como variables independientes de la regresión y la variable dependiente es el valor de continuación del paso siguiente descontado un período. De forma que se obtienen los parámetros h_1, h_2, h_3 para definir la función estimada:

$$f(S) = h_1 + h_2 S + h_3 S^2 \quad (3.30)$$

Con esta función estamos en condiciones de decidir.

La regla de decisión indica que se debe ejercer en el nodo si:

$$\max(X - S_t, 0) > f(S_t) \quad , \quad (3.31)$$

caso contrario se espera un período más para evaluar nuevamente y se toma como valor de continuación el del próximo período descontado. Para finalizar se suman los valores actuales de los valores de ejercicio en cada camino y se divide por la cantidad de simulaciones.

3.2.3.4 Algoritmo numérico

El algoritmo inicialmente genera cuatro matrices de N (Número de caminos) x M (números de intervalos desde $t = 0$ hasta $t = T$).

S es la matriz con los precios del activo simulado, C Valor de continuar sin ejercer, E Valor de ejercicio y D matriz que tiene el valor “1” donde es óptimo ejercer. Luego se calculan los valores de la última columna de C y E utilizando la fórmula del pago de la opción de compra:

$$\max(S - X, 0).$$

A continuación comienza el proceso iterativo hacia atrás. Para cada período se calcula el valor de continuar y se arma una matriz con las variables independientes utilizando las funciones $1, x, x^2$, donde x es el valor del activo en el nodo correspondiente. Se arma el vector del término independiente Y con los valores del ejercicio inmediato de la opción. Se realiza una regresión entre X e Y para obtener los parámetros que serán utilizados para obtener el valor de continuación a comparar con los ejercicios inmediatos. En cada nodo, si el ejercicio inmediato es mayor que el valor de la regresión, se elige el valor de

ejercicio y se pone un 1 en el correspondiente nodo de la matriz D. Se realiza esto hasta llegar a $t = 2$. En el apéndice se encuentra un diagrama de flujo del algoritmo en cuestión.

3.3 Modelos de valuación de inversiones con aprendizaje

En muchas inversiones secuenciales las primeras etapas proporcionan información acerca de los costos o pagos netos en etapas posteriores. El supuesto fundamental es que los precios y los costos no evolucionan estocásticamente, al invertir se aprende. La erogación realizada permite recopilar información, añadiendo valor pues aumenta la información al momento de decidir la continuación del proyecto. De forma que, aunque a priori el valor actual neto de todo el proyecto sea negativo, puede ser conveniente invertir en las primeras etapas para bajar la incertidumbre y lograr un proyecto rentable futuro.

En esta sección primeramente se presenta un modelo básico de aprendizaje donde existe una fuente de incertidumbre y luego otro modelo donde hay dos fuentes; ambos modelos están basados en los trabajos de Pindyck (1993).

3.3.1 Modelo básico con aprendizaje

En esta subsección se presenta un modelo básico de aprendizaje que contiene una sola fuente de incertidumbre, la cual está vinculada con el costo total del proyecto de inversión. El modelo presentado en esta subsección se basa en el propuesto por Dixit y Pindyck (1994).

Se plantea un desarrollo de un producto cuyo valor se asume conocido al momento de ponerlo en mercado B y donde el costo necesario para desarrollarlo es una variable aleatoria cuya esperanza viene dada por el siguiente proceso:

$$dC(t) = -I dt + \sigma \sqrt{IC(t)} dz \quad (3.32)$$

siendo $I(t)$ la tasa de inversión, σ la volatilidad y z un proceso browniano.

El problema es encontrar cuál es la política óptima $I(T)$ que maximiza el valor de la oportunidad de inversión F , sujeto a una restricción de tasa de inversión

máxima I_{MAX} (Nótese que el tiempo necesario para completar el desarrollo es una variable aleatoria τ):

$$F(C, B, t) = F(C) = \max_{I(t)} E_0 \left[B e^{-\mu\tau} - \int_0^{\tau} I(t) e^{-\mu t} dt \right] \quad (3.33)$$

$$\text{s.a.} \quad 0 \leq I(t) \leq I_{MAX} ; C(\tau) = 0$$

La condición necesaria que debe cumplir $F(C)$ viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 I C F''(C) - I F'(C) - I = r F(C) \quad (3.34)$$

Esta expresión es lineal en I , por lo que la solución debe estar en alguno de los dos extremos; o bien la tasa de inversión se ubica en el mínimo o en el máximo:

$$I = 0 \quad \vee \quad I = I_{MAX}$$

Ahora bien, si el costo esperado es arbitrariamente grande, claramente no es óptimo invertir pues el valor de la oportunidad de inversión es arbitrariamente pequeño:

$$\lim_{C \rightarrow \infty} F(C) = 0$$

Por el contrario si el costo remanente es nulo, es óptimo invertir el máximo disponible. Asumiendo continuidad entre estos valores extremos de C , se deduce por tanto que existe un valor crítico C^* tal que:

$$\begin{cases} C \leq C^* \Rightarrow I(t) = I_{MAX} \\ C > C^* \Rightarrow I(t) = 0 \quad \wedge \quad F(C) = 0 \end{cases}$$

Por lo que para el valor crítico ($C = C^*$) se cumple que:

$$F(C^*) = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} \sigma^2 C^* F''(C^*) - F'(C^*) - 1 = 0 \quad (3.35)$$

Por lo que para encontrar C^* y $F(C)$, se debe resolver el siguiente problema:

$$\frac{1}{2}\sigma^2 I C F''(C) - I F'(C) - I = r F(C)$$

s.a.

$$F(0) = B$$

$$\lim_{C \rightarrow \infty} F(C) = 0$$

$$\frac{1}{2}\sigma^2 C^* F''(C^*) - F'(C^*) - 1 = 0$$

3.3.1.1 Cálculo numérico del máximo costo esperado para el cual es óptimo invertir C^*

Primeramente es importante notar que la ecuación (3.34) presenta una singularidad en $C = 0$ cuando la inversión es máxima ($I = I_{MAX}$) que debe ser resuelta antes de realizar el cálculo numérico de C^* . Para salvarla se propone la siguiente sustitución de variables (Pindyck, 1991):

$$F(C) = y(z) \text{ donde } z = \ln(C),$$

de forma que el problema original se transforma en:

$$y''(z) + \left(-1 - \frac{2}{\sigma^2}\right)y'(z) + \left(\frac{-2r e^z}{\sigma^2 I_{MAX}}\right)y(z) = \frac{2 e^z}{\sigma^2} \quad (3.36)$$

$$\text{s.a. } \lim_{z \rightarrow -\infty} y(z) = B ; y(z^*) = 0 ; y'(z^*) = 0$$

El problema planteado por la ecuación (3.36) es una ecuación diferencial de segundo orden con condiciones de borde, donde uno de los bordes, z^* esta libre. A continuación se propone un algoritmo para su resolución:

- (a) Se propone inicialmente utilizar como valor de z^* , el correspondiente a $r = 0$:

$$r = 0 \Rightarrow C^* = \left(1 + \frac{\sigma^2}{2}\right)B \Rightarrow z^* = \ln \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{2}\right)B \right]$$

- (b) Se resuelve la ecuación diferencial para obtener $y(z)$ y $y'(z^*)$ para $r = 0$.
- (c) Se incrementa el valor de z^* y se resuelve la ecuación diferencial
- (d) Se evalúa la derivada $y'(z^*)$ numéricamente
- (e) En el momento en que la derivada deja de ser negativa y pasa ser positiva, se ha cruzado el punto donde $y(z^*) = 0$ por que se obtiene z^* mediante una interpolación entre el valor actual y el valor del paso anterior.

3.3.1.2 Cálculo del valor del proyecto por simulación de Montecarlo

Discretización del problema

Se proponen M caminos de simulación $i: 1..M$ y una grilla temporal de N intervalos $j: 1..N$. La discretización del costo esperado para completar el desarrollo en el camino "i" al momento " $j\Delta$ " viene dado por $C(i, j\Delta)$.

Asimismo se postula que su valor sigue un proceso discreto dado por:

$$C(t + \Delta) = C(t) - I\Delta + \sigma\sqrt{IC(t)\Delta} \varepsilon_S$$

El proceso de desarrollo del producto para cada camino "i" finaliza para un valor de $j = q_i \in \mathbb{N}$, el cual es el mínimo valor de "j" donde el costo esperado es cero.

$$C(i, q_i\Delta) = 0 \quad ; \quad \forall j \geq q_i: C(i, j\Delta) = 0$$

Valor del proyecto

Valor del proyecto en el camino de simulación "i" cada instante de tiempo "j" :

$$W(i, j\Delta)$$

Valor del proyecto al finalizar el desarrollo $W(i, q_i) = B$

Inducción retrospectiva

$\widehat{W}(i, j\Delta)$ es el valor que surge de la regresión durante el proceso de inducción retrospectiva

Valor del proyecto durante el desarrollo:

$$W(i, j\Delta) = \max(\widehat{W}(i, j\Delta) - I\Delta, 0)$$

Donde $I\Delta$: Inversión durante el período Δ

Regla de decisión

Si $\widehat{W}(i, j\Delta) < I\Delta$ en un camino “ i ”, el proyecto se abandona y se define α_i como el valor de “ j ” donde esto ocurre. Por lo que:

$$\forall j \geq \alpha_i: W(i, j\Delta) = 0$$

B : Valor del proyecto al momento de terminar el desarrollo ($j = q_i$)

Para calcular el valor del proyecto al momento cero para cada camino “ i ”:

$$\text{Si abandona } \alpha_i < q_i \rightarrow F_i = \sum_{j=1}^{\alpha_i} \frac{(-I\Delta)}{(1+r)^{j\Delta}}$$

$$\text{Si termina desarrollo } F_i = \sum_{j=1}^{q_i} \frac{(-I\Delta)}{(1+r)^{j\Delta}} + \frac{B}{(1+r)^{q_i\Delta}}$$

3.3.2 Modelo de valuación con dos fuentes de incertidumbre

Pindyck (1993) propone un modelo de aprendizaje que contempla dos fuentes de incertidumbre: La técnica y la vinculada al precio de las materias primas en el mercado.

La Incertidumbre técnica está asociada a la dificultad física de completar un proyecto, es decir, lo relacionado al tiempo, esfuerzo y materiales que serán necesarios para llevarlo a cabo. Este tipo de incertidumbre sólo puede ser resuelta llevando a cabo y completando el proyecto. Los costos corrientes se observan a medida que el proyecto se realiza, por lo tanto, el costo total se sabrá únicamente al completar el proyecto. Una característica de esta fuente de incertidumbre, es que es diversificable dado que no depende de condiciones macro coyunturales. La incertidumbre en el precio de las materias primas está asociada a la fluctuación que pueden presentar los precios de mano de obra, inmuebles y materiales requeridos para completar el proyecto. Se contempla que estos precios se comportan estocásticamente independientemente de la inversión realizada. De

esta forma, para proyectos que toman un tiempo considerable en ser completados, esta fuente de incertidumbre es particularmente importante y dado que están relacionados a las condiciones macro coyunturales, no son diversificables.

La ecuación de movimiento que describe la evolución del costo remanente es ahora:

$$dC = -I dt + \beta(IC)^{1/2} dz + \gamma C dw \quad (3.37)$$

Siendo I la tasa de inversión, $z(t)$ un movimiento browniano asociado a la incertidumbre técnica y $w(t)$ un movimiento browniano asociado a la incertidumbre de los precios de materias primas. Claramente el costo remanente decrece con la inversión corriente pero también posee un componente estocástico relacionado con los precios del mercado. Es importante destacar que el segundo término de la ecuación anterior describe la incertidumbre técnica. Por otro lado, el último término de la ecuación describe la incertidumbre en el precio de las materias primas. Es importante mencionar que esta sección, al tener dos fuentes de incertidumbre, C fluctúa incluso cuando no existe inversión corriente, dado que los costos de mano de obra y de los materiales varían con el mercado, sin importar las decisiones de la compañía.

Para el cálculo de la solución, y al igual que en la sección anterior, supondremos que la máxima tasa de inversión es I_{MAX} .

Siendo $F(C) = F(C, B, I_{MAX})$ el valor de la oportunidad de inversión. Entonces el objetivo será maximizar $F(C)$:

$$F(C) = \max_{I(t)} E_0 \left[B e^{-\mu \bar{T}} - \int_0^{\bar{T}} I(t) e^{-\mu \bar{T}} dt ; 0 \right] \quad (3.38)$$

$$s. a. \begin{cases} dC = -I dt + \beta(IC)^{1/2} dz + \gamma C dW \\ 0 \leq I(t) \leq I_{MAX} \\ C(\bar{T}) = 0 \end{cases}$$

Donde μ es la tasa de descuento y \bar{T} es el tiempo de finalización (estocástico).

Tasa ajustada por riesgo

Dado que dW esta correlacionado con el mercado, μ no puede usarse como tasa de descuento libre de riesgo. Se asume que x es el precio de un activo perfectamente correlacionado con W de forma tal que:

$$dx = \alpha_x x dt + \sigma_x x dW$$

El retorno esperado de x será la tasa ajustada por riesgo r_x . De acuerdo al modelo CAPM:

$$r_x = r + \theta \rho_{xm} \sigma_x$$

Donde θ es la prima de riesgo del mercado y ρ_{xm} el coeficiente de correlación de x con el portafolio de mercado.

3.3.2.1 Ecuación diferencial

Si aplicamos el lema de Ito a $F(C)$:

$$\frac{1}{2} \beta^2 IC \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} + \frac{1}{2} \gamma^2 C^2 \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} - I \frac{\partial F}{\partial C} - \left(\frac{r_x - r}{\sigma_x} \right) \gamma C \frac{\partial F}{\partial C} - I = r F$$

Sabiendo que $r_x = r + \theta \rho_{xm} \sigma_x$:

$$\frac{1}{2} \beta^2 IC \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} + \frac{1}{2} \gamma^2 C^2 \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} - I \frac{\partial F}{\partial C} - \theta \rho_{xm} \gamma C \frac{\partial F}{\partial C} - I = r F \quad (3.39)$$

Teniendo en cuenta que θ es un parámetro relacionado al contexto macroeconómico, el único parámetro que nos faltaría determinar es ρ_{xm} .

Es importante destacar que la expresión (3.39) es una ecuación lineal en I , por lo que la tasa de inversión que maximiza $F(C)$ es cero o la máxima I_{MAX} :

$$I = \begin{cases} I_{MAX} & \text{para } \frac{\beta^2}{2} C \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} - \frac{\partial F}{\partial C} - 1 \geq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

De esta forma, la expresión (3.39) posee un contorno libre en el punto C^* tal que $I(t) = I_{MAX}$ cuando $C \leq C^*$ y $I(t) = 0$ en otro caso. El valor de C^* debe ser encontrado como parte de la solución de $F(C)$.

3.3.2.2 Condiciones de contorno

Para determinar $F(C)$ y C^* , vamos a resolver (3) sujeto a las siguientes condiciones de contorno:

(a) implica que cuando el proyecto se completa el pago del mismo es B .

$$F(0) = B$$

(b) Si el costo remanente C es lo suficientemente grande, la probabilidad de que sea conveniente comenzar el proyecto es baja.

$$\lim_{c \rightarrow \infty} F(C) = 0$$

(c) La condición de *smooth pasting* para que $\frac{\partial F}{\partial C}(C)$ sea continua en C^* .

$$\frac{\beta^2}{2} C^* \frac{\partial^2 F(KC^*)}{\partial C^2} - \frac{\partial F(C^*)}{\partial C} - 1 = 0$$

Siendo $F(C)$ continua en C^* .

3.3.2.3 Cálculo simultáneo de $F(C)$ y C^*

Cuando $I = 0$, $F(C)$ tiene la siguiente solución analítica:

$$F(C) = a C^b$$

Con derivadas: $\frac{\partial F}{\partial C} = a b C^{b-1}$ y $\frac{\partial^2 F}{\partial C^2} = a b (b-1) C^{b-2}$

Por lo cual podemos reemplazar para encontrar los valores de los parámetros a y b :

$$\frac{1}{2} \beta^2 I C a b (b-1) C^{b-2} + \frac{1}{2} \gamma^2 C^2 a b (b-1) C^{b-2} - I a b C^{b-1} - \phi \gamma C a b C^{b-1} - I = r a C^b$$

Reordenando:

$$\frac{1}{2} \beta^2 I b (b-1) c^{-1} + \frac{1}{2} \gamma^2 b (b-1) c^0 - I b c^{-1} - \phi \gamma b c^0 - I = r$$

Si $I = 0$:

$$\frac{1}{2}\gamma^2 b(b-1) - \phi\gamma b C^0 - r = 0$$

Para obtener b simplemente hay que resolver la ecuación cuadrática pero para que se cumpla la condición de contorno (b), la raíz que nos interesa es la raíz negativa:

$$b = \frac{1}{2} + \frac{\phi}{\gamma} - \frac{1}{2\gamma} \sqrt{(\gamma + 2\phi)^2 + 8r}$$

Luego, el parámetro a podrá obtenerse en función de las otras condiciones de contorno.

En el apéndice se encuentran las soluciones para dos casos particulares extremos: Cuando sólo hay incertidumbre técnica y cuando sólo hay volatilidad de los precios.

Conclusión

Dado que el objetivo del presente trabajo es analizar inversiones en nanotecnología, las cuales cuentan con un carácter innovador, este capítulo se ha concentrado en estudiar la valuación de proyectos en investigación y desarrollo en presencia de irreversibilidad e incertidumbre, y donde las decisiones son estratégicas.

Estos proyectos de inversión nano requieren de varias etapas para ser completados y poder contar con un producto listo para el mercado. En estos casos, las inversiones se realizan por etapas. Se comienza con una etapa de investigación en el laboratorio que, con cierta probabilidad de éxito, conduce a un nuevo producto a ser testeado. Luego, se realizan numerosas pruebas hasta que se obtenga la aprobación del ente del gobierno encargado de regularlo. Por último, se prepara la planta de producción y se comercializa a los usuarios. Todo este proyecto puede requerir hasta diez años.

Los métodos tradicionales de valuación son fáciles de aplicar, pero tienen la desventaja de no reflejar la complejidad de los fenómenos sociales y económicos implicados en las inversiones nano. Esta tesis propone utilizar la teoría de opciones reales para valorar proyectos nanotecnocientíficos, porque permiten realizar una valoración efectiva de las opciones de inversión en contextos donde hay irreversibilidad⁷⁷, incertidumbre, y las decisiones son estratégicas, permitiendo reconocer flexibilidades y los procesos de aprendizaje.

Luego se presentaron modelos estocásticos utilizados en la valuación de diferentes tipos de opciones reales. En particular se ha detallado el algoritmo numérico para la valuación de una opción de venta bermuda utilizando simulación de Montecarlo, lo cual es fundamental para valorar proyectos donde es posible abandonar. Esto será utilizado en el siguiente capítulo al valorar proyectos nanotecnológicos.

Por último este capítulo remarca el rol del aprendizaje en los proyectos de I+D, pues al realizar erogaciones de dinero se logra aprender y bajar la incertidumbre. Si la inversión es secuencial, en cada etapa se obtiene información que reduce la incertidumbre del valor del proyecto terminado. La erogación realizada en las primeras etapas permite recopilar información, añadiendo valor, pues aumenta la información al momento de decidir la continuación en una etapa futura. De forma que, aunque a priori el valor actual neto de todo el proyecto sea negativo, puede ser conveniente invertir en las primeras etapas para bajar la incertidumbre y lograr un proyecto rentable futuro.

El próximo capítulo utiliza lo desarrollado en éste para elaborar un modelo que contemple la rentabilidad de la inversión en conjunto con una visión gubernamental orientada al bien común.

⁷⁷ La irreversibilidad surge debido a que el capital involucrado en el proyecto no puede ser utilizado de manera productiva en otra inversión. Este carácter irreversible profundiza la exposición a diferentes riesgos: con respecto a los flujos de beneficios futuros, a las tasas de interés involucradas en el cálculo y al costo final de la inversión.

4 Valuación de proyectos nanotecnológicos

Introducción

Un activo intangible tecnológico se define como un recurso que no tiene una forma de realización física y cuya explotación industrial y económica otorga un beneficio futuro a su dueño (Lev, 2001). En particular, este trabajo se interesa en la valuación de activos tecnológicos, tales como patentes, procesos y conocimientos técnicos. Si bien, tradicionalmente, las valuaciones de este tipos de activos se basaban en flujos de caja descontados, en los últimos años, se ha puesto especial interés en la metodología de opciones reales (Serenó, 2006). La razón es que las herramientas tradicionales no tienen en cuenta la flexibilidad implícita en estas oportunidades de inversión ni los riesgos involucrados. En resumen, los proyectos de inversión en nuevas tecnologías requieren especial atención debido a la existencia de riesgos extremos, riesgos políticos y la incertidumbre tecnológica imponen un estudio detallado de los mismos.

Estos proyectos de inversión detallados, en muchas ocasiones requieren varios años para producir el bien comercializable, siendo necesario contar entonces con varias etapas de desarrollo⁷⁸. En general, la primera etapa del proyecto es la de investigación, en la que se requieren capitales que serán costos hundidos del proyecto. Luego, se evalúa si se continúa con la siguiente fase de desarrollo del producto (Paxson, 2003; Newton, DP, Paxson y Widdicks, 1996; Newton, D y Pearson, 1994).

El presente trabajo se concentra en aquéllos proyectos de inversión que involucran gran cantidad de recursos en actividades de investigación y desarrollo, por consiguiente, altamente estratégicos e inciertos. El enfoque de opciones reales permite modelizar explícitamente esta actividad estratégica de inversión en proyectos de investigación y desarrollo (I+D), extendiendo la visión estática

⁷⁸ Por su parte, Weitzman, Newey y Rabin (1981) consideran que los proyectos de I+D deben dividirse en diferentes etapas, asumiendo una volatilidad dinámica del proyecto.

tradicional mediante un proceso dinámico y multi-período. Asimismo, da cuenta de una gestión corporativa activa de oportunidades de inversión, adaptando sus estrategias de inversión en la medida que la incertidumbre se resuelve con el paso del tiempo.

Para valorar estos proyectos, la literatura tradicional utiliza modelos analíticos que provienen de los derivados financieros; la fórmula de Black y Scholes es el ejemplo paradigmático. Ahora bien, independientemente de la enorme importancia de estas fórmulas para la valoración de oportunidades reales, su falta de flexibilidad en la descripción de una amplia gama de decisiones de inversión en contextos complejos, dio lugar al desarrollo de modelos de valuación numéricos.

Un ejemplo, en el contexto de valuación de proyectos farmacéuticos, es el modelo desarrollado por Schwartz (2004), donde el autor desarrolla numéricamente (y lleva a la práctica) un modelo para la valuación de proyectos de I+D protegido por patentes. La innovación en la industria farmacéutica propone un debate de políticas públicas con respecto a la financiación de sus costos de investigación, la determinación del nivel de precios y el grado socialmente óptimo del uso de las patentes en cuestión⁷⁹.

Este capítulo analiza y modeliza la valuación de proyectos nanotecnológicos de inversión. Primeramente, analiza la problemática de la valuación de activos tecnológicos, repasando las técnicas tradicionales, pero con especial énfasis en la metodología de opciones reales. Luego, se estudia la valuación de proyectos en investigación y desarrollo analizando el modelo de Schwartz para la industria farmacéutica y un modelo de inversión conjunta en el mercado de nanomedicina. Para incluir al gobierno en el modelo propuesto, se modeliza y cuantifica el principio precautorio y se describen los diferentes modelos de incentivos gubernamentales. Por último, se elabora un modelo de evaluación de proyectos en el mercado nanotecnológico de inversiones que contempla las distintas etapas de investigación y desarrollo, la incertidumbre y la política de regulación.

⁷⁹ En particular, el desarrollo de un fármaco puede acarrear alrededor de diez años; dentro de este período, deben tenerse en cuenta las incertidumbres en los costos y futuros ingresos. Además, debe considerarse que una vez aprobado el proyecto, se plantea una incertidumbre sobre las ventas y los flujos efectivos que éste podría generar.

4.1 Valuación de activos tecnológicos.

En la literatura académica, así como en las prácticas corporativas, un activo intangible tecnológico se define como un recurso que no tiene una forma de realización física, y cuya explotación industrial y económica otorga un beneficio futuro a su propietario (Lev, 2001). La presente sección se centra en analizar la valuación de activos intangibles separables e identificables (Guatri, 1989). En particular, activos basados en la tecnología, tales como patentes, procesos y conocimientos técnicos. Estos activos basados en la tecnología pueden generar ingresos (y, por lo tanto, valor) a la compañía que los posee. En la literatura, hay varios artículos dedicados a la importancia de estos activos tecnológicos y el problema de su valorización. La valoración de este tipo de activos es fundamental para los accionistas de la compañía.

Los proyectos tecnológicos tienen como objetivo el registro de una patente, para luego, bajo su protección, comenzar la producción y comercialización de productos protegidos por la misma. Ahora bien, aquella es un derecho, no una obligación de hacer uso exclusivo de una invención a un precio predeterminado, por un período predeterminado de tiempo. Por consiguiente, la valuación de dichos proyectos tecnológicos, los cuales incluyen derechos de propiedad intelectual, es un desafío para los profesionales. Si bien, tradicionalmente, los enfoques se ha basado en flujos de caja descontados, en los últimos años se ha puesto especial interés en la metodología de opciones reales (Serenó, 2006). La justificación inmediata es que las herramientas tradicionales no tienen en cuenta los riesgos y la flexibilidad implícita en las oportunidades de inversión.

Las metodologías de valuación de activos tecnológicos se pueden clasificar en dos grupos principales (Mun, 2003). Por un lado los métodos tradicionales, tales como el de costo, de mercado y por ingreso; por el otro, los métodos innovadores, entre los cuales se destaca el método de opciones reales. Estas metodologías se difunden, no sólo en la literatura académica, sino, también, en la práctica empresarial (Mullen, 1999). Esta subsección primeramente describe brevemente

las metodologías tradicionales y sus limitaciones. Luego se presenta la metodología de opciones reales para valorar activos tecnológicos.

4.1.1 Metodologías tradicionales

Las metodologías tradicionales, habitualmente utilizadas, son la metodología de costos, la valuación de mercado y la valuación por ingresos. A continuación, se describirán brevemente cada una de ellas.

4.1.1.1 Metodología de costos

El método de costos evalúa el valor de los activos de la tecnología mediante la medición de los gastos necesarios para producir activos de tecnología. Se basa en el principio económico de la sustitución; un inversor prudente no pagaría más por un activo tecnológico de lo que costaría crear o adquirir un bien similar.

Chiesa y Chiaroni (2005) presentan diferentes definiciones posibles de costo. En primer lugar, se puede pensar el costo de evitar, el cual cuantifica el ahorro que el propietario de la tecnología (por ejemplo, patente) logra debido a contar con la propiedad de la misma. En segundo lugar, el costo histórico, donde los valores del desarrollo se cuantifican y se actualizan, utilizando un índice de inflación. En tercer lugar, el costo corriente, es decir, el costo tomado a precios actuales para desarrollar la tecnología en cuestión.

El método de valuación por costos incluye los costos hundidos de I+D para producir una patente, pero no tiene en cuenta la cantidad de beneficios económicos relacionados con la explotación de la misma. Asimismo, asume que los gastos siempre crean valor; esto es particularmente problemático para valorar inversiones de alto riesgo como la presente. Este método se utiliza, generalmente, cuando la aplicación está en una etapa temprana de desarrollo y se carece de información del posible mercado y, por ende, no se pueden estimar los futuros ingresos.

4.1.1.2 Valuación de mercado

Un modelo de valuación de la tecnología basada en el mercado estima que el precio de una tecnología es comparable con otra similar que esté, actualmente, en

el mercado (Pratt, Reilly y Schweih, 1998). Se mide el valor presente de los beneficios futuros, utilizando los precios de mercado disponibles hoy, de bienes similares. Este método de evaluación se basa en el principio económico de la competencia y asume equilibrio de mercado (Chiesa y Chiaroni, 2005). Para utilizar con éxito este método, se requiere que el mercado tenga una gran cantidad de transacciones de un bien similar y que la información sea pública. No contempla la posibilidad de transacciones únicas que surgen de una negociación puntual.

En general, si ya existe un mercado comparativo donde los activos se negocian activamente, y si la información sobre los costos de transacción ya está disponible, puede convertirse en un método práctico. En este sentido, si bien es eficaz para la evaluación de propiedades inmuebles, no es eficaz para evaluar los casos de activos intangibles de propiedad intelectual o cuando el mercado es incompleto (transacciones poco frecuentes o secretas).

4.1.1.3 Valuación por ingresos

El método de valuación por ingresos considera que el valor de un activo es el valor presente del flujo futuro de los beneficios financieros que se obtienen de su explotación. De esta manera, el valor de un activo es la suma de los valores actuales de los flujos de efectivo futuros. Esta metodología no tiene en cuenta los costes de desarrollo de la tecnología y determina el valor de la tecnología de acuerdo a sus posibilidades de creación de beneficios futuros esperados (Boer, 2000). Entre ellos, el método de flujo de caja descontado es el más utilizado. Se construye un flujo de fondos futuros neto de costos reversibles y, luego, se lleva al valor presente mediante una tasa de descuento apropiada.

Este método, mientras que es conveniente para las patentes, marcas registradas, derechos de autor y otras propiedades intelectuales que pueden crear un beneficio futuro, tiene la desventaja de no poder reflejar con precisión el valor de la tecnología que no genere un beneficio directo.

4.1.2 Limitaciones

El enfoque basado en el mercado determina el valor del proyecto tecnológico, mediante el uso de precios de activos comparables. La principal desventaja de esta metodología es que no siempre existen tecnologías similares en el mercado. Por su parte, el enfoque por ingresos se basa en el valor presente de los beneficios futuros hipotéticos que la tecnología en cuestión puede proveer. Sin embargo, no contempla decisiones estratégicas.

En general, los métodos basados en el descuento de flujos de fondos ciertos futuros desconocen la naturaleza incierta e irreversible de los proyectos tecnológicos. Estos proyectos contienen diversas formas de incertidumbre. Primeramente, sobre el éxito técnico de la etapa de I+D. En segundo lugar, acerca de la protección jurídica que la patente en cuestión pueda dar al inversor durante un período y, por último, sobre el éxito comercial, una vez que entre en el mercado competitivo.

La regla del valor presente no puede incorporar los riesgos y los diferentes escenarios estratégicos implícitos en las decisiones de un proyecto tecnológico ya que es un enfoque estático, y la decisión de inversión sólo se pueden tomar ahora o nunca. Si bien existen modificaciones que intentan dar cuenta del riesgo, por ejemplo, descontando a una tasa mayor, es difícil de justificar a qué nivel de la tasa de descuento se incorporan todos los riesgos futuros.

4.1.3 Valuación utilizando opciones reales de proyectos tecnológicos

La utilización de la metodología de opciones reales analizada en la sección anterior del presente trabajo permite superar algunas limitaciones de los métodos de valuación tradicionales. Es importante destacar dos características fundamentales de las inversiones en tecnología. Por un lado, el carácter estratégico de sus decisiones y, por otro, la necesidad de gestión de la incertidumbre. Ambas problemáticas se pueden abordar desde un enfoque de opciones reales.

En particular, los proyectos tecnológicos conllevan innovaciones, cuya introducción puede implicar grandes inversiones, generalmente, como costos hundidos. Asimismo, existe una gran incertidumbre sobre los beneficios futuros que evolucionan estocásticamente siguiendo al mercado. Otra idea importante de los proyectos tecnológicos es que durante el mismo existen decisiones estratégicas de invertir en la siguiente etapa o no; a las cuales el inversor responde en función de la realización de eventos favorables o no, durante el proceso del proyecto.

Además, otro tema importante es el momento en que se realiza la inversión. En la mayoría de los casos, la inversión puede ser pospuesta a la espera de nueva información. Por ejemplo, contar con una patente tecnológica crea una oportunidad de inversión irreversible que puede o no realizarse. En otras palabras, es una opción de compra americana (derecho, pero no la obligación de gastar el dinero ahora o en el futuro, a cambio de un activo). Dado que su valor futuro es incierto, hay un costo de oportunidad de invertir en la actualidad, lo cual se describe como una opción de esperar.

4.2 Valuación de proyectos de investigación y desarrollo

Dentro los proyectos tecnológicos, este trabajo se focaliza en analizar aquellos que involucren gran cantidad de recursos en actividades de investigación y desarrollo; por consiguiente, altamente estratégicos. El enfoque de opciones reales es el más adecuado pues permite modelizar explícitamente la actividad estratégica y la incertidumbre involucrada. Se extiende, entonces, la visión estática tradicional mediante un proceso dinámico y multi-período. Asimismo, se incorpora la idea de que las empresas gestionan activamente sus oportunidades de inversión, adaptando sus estrategias de inversión en la medida que la incertidumbre se resuelve con el paso del tiempo.

Los proyectos de I+D son proyectos largos, que contienen varias etapas y en los que el costo de la inversión es, al menos parcialmente, irreversible; todas características presentes, por ejemplo, en el modelo de Pindyck de opciones reales, anteriormente expuesto. En el mismo se representa la inversión en $I + D$

como un flujo de costos, que, de tener éxito, culminaría en la creación de un activo que podrá comercializarse en el mercado.

Desde el punto de vista metodológico, los proyectos de inversión que involucran investigación y desarrollo representan un desafío para la valuación financiera, pues incluyen múltiples fuentes de incertidumbre. Debido a que se requiere un proceso de aprendizaje, el costo total de la inversión es incierto. El tiempo necesario para desarrollar el producto en cuestión también es aleatorio. Se está aprendiendo, al mismo tiempo que se invierte. Por otra parte, cada etapa del desarrollo está sujeta a factores exógenos, tales como catástrofes técnicas, económicas o políticas, poniendo, visiblemente, en riesgo la terminación del proyecto en cuestión.

En otras palabras, el beneficio se obtiene luego de culminar el proceso de I + D. La posibilidad de éxito, claramente, se relaciona con la incertidumbre del proyecto durante su desarrollo. Primeramente, los precios de las materias primas necesarias para el proceso fluctúan con el mercado. En segundo lugar, cada etapa tiene una probabilidad de fracaso significativa, que está asociada a problemas tecno-científicos. Por último, durante el desarrollo, el proceso de precios del producto final (o de su competencia) fluctúa estocásticamente. En conclusión, la incertidumbre, impide conocer la duración y la posibilidad de éxito con certeza.

Inicialmente, se utilizaron para valuar estos proyectos, modelos analíticos que provienen de los derivados financieros, siendo la fórmula de Black y Scholes el ejemplo paradigmático. Ahora bien, independientemente de la enorme importancia de estas fórmulas analíticas para la valoración de oportunidades reales, su falta de flexibilidad en la descripción de una amplia gama de decisiones de inversión en contextos complejos, dio lugar al desarrollo de modelos de valuación numéricos. Un ejemplo, en el contexto de valuación de proyectos farmacéuticos, es el modelo de (Schwartz, 2004), donde el autor desarrolla un modelo numérico para la valuación de proyectos de I+D protegidos por patentes.

4.2.1 Modelo de Schwartz para la industria farmacéutica

La innovación en la industria farmacéutica propone un debate sobre las políticas públicas referido a la financiación de sus costos de investigación, sobre la determinación del nivel de precios y sobre el grado socialmente óptimo del uso de las patentes en cuestión. En particular, el desarrollo de un fármaco puede acarrear alrededor de diez años, siendo fundamental tener en cuenta las incertidumbres en los costos y en los futuros ingresos. Además, debe considerarse que, una vez aprobado el proyecto, plantea una incertidumbre sobre las ventas y los flujos efectivos que éste podría generar.

Esta sección desarrollará brevemente algunos aspectos del modelo de valuación de proyectos farmacéuticos propuesto por Schwartz (2004), el mismo es un enfoque discreto de simulación para determinar el valor de un proyecto en I+D, utilizando la metodología de opciones reales. Se asume un contexto incierto donde variables claves de la valuación son estocásticas: el costo para finalizar cada etapa, los flujos de efectivo futuros y la posibilidad de eventos adversos (técnico, económico, legal o político) que obliguen a abandonar el proyecto. Asimismo, se contempla la decisión estratégica de abandono cuando los costos sean mayores a los esperados o cuando el flujo de efectivo estimado sea menor al esperado.

4.2.1.1 El modelo

Formalmente, se propone valorar proyectos de I+D mediante una simulación basada en un enfoque de opciones reales discreta que contempla la incertidumbre en los costos de finalización del proyecto, la incertidumbre de los flujos efectivos del proyecto, y la posibilidad de eventos catastróficos que pudieran amenazar la finalización del proyecto. Asimismo, se permite abandonar el proyecto en caso de que los costos superen a los costos esperados o en el caso de que los flujos efectivos estimados resulten ser menor del esperado (Schwartz, 2004).

Considerando que la inversión se realiza en el tiempo, se asume que existe una tasa máxima a la que se puede invertir (I_m) y que en la medida que ingresan fondos al proyecto, el costo remanente (C) para completarlo se reduce. Este

costo se considera una variable aleatoria. Por otra parte muchas veces el proyecto puede fallar y no llegar a completarse, por lo que se asume una probabilidad de *Poisson* de que en el proyecto falle, llevando el valor del mismo a cero. A nivel estratégico, el inversor cuenta con la opción de abandono, para utilizar cuando los costos resultan ser superiores a los esperados o cuando el flujo de efectivo resulta ser menor al esperado. Por último, al finalizar el proyecto, el propietario comienza a recibir los beneficios de la inversión que viene representado por una tasa de flujo efectivo neto B (modelizado como un proceso estocástico).

Con respecto a la incertidumbre en los costos de inversión, el autor sigue el modelo de aprendizaje propuesto por Pindyck (detallado en el capítulo anterior), de forma que los costos remanentes siguen una dinámica descrita por un proceso de difusión de la forma:

$$dC = -I dt + \sigma(IC)^{1/2} dz \quad (4.1)$$

El primer término del proceso hace referencia al control del proceso de difusión. En la medida que la inversión avanza, el costo remanente estimado para completar el desarrollo del proyecto decrece. El segundo término corresponde a lo que Pindyck denomina incertidumbre técnica, y se encuentra relacionado con la dificultad física que conlleva completar el proyecto, siendo dz un incremento de un proceso browniano.

Por otro lado, la dinámica del flujo de beneficios netos futuros se modela mediante un movimiento browniano geométrico dado por:

$$dB = \alpha B dt + \sigma B dw \quad (4.2)$$

Donde dw es un incremento de un proceso de Wiener de Gauss, correlacionado con el portafolio de mercado y que puede ser correlacionado con la incertidumbre del costo esperado para completar el proyecto. La correlación entre el costo y los flujos efectivos permiten ver que costos superiores a los previstos se traducen en una reducción de los flujos efectivos esperados (es por esto que puede suponerse que existe entre estos una correlación negativa). Algo a tener en cuenta es que estos flujos comienzan a ser percibidos una vez que se ha completado la inversión, por lo que los flujos variarían a medida que se disminuye la

incertidumbre durante la inversión. Asimismo, y para observar los efectos de valoración ante un riesgo neutral, el autor utiliza la siguiente expresión de flujo ajustada por riesgo:

$$dB = (\alpha - e)Bdt + \sigma Bdw = \alpha^*Bdt + \sigma Bdw$$

donde e es la prima de riesgo asociada con el proceso.

Por último, cuando la inversión en el proyecto ha sido completada, el valor del proyecto dependerá de los flujos efectivos que generará el proyecto. Sea $V(B, t)$ el valor del proyecto en el momento “ t ”, con los flujos efectivos “ B ” y asumiendo que la patente del proyecto caduca en el momento “ T ”. También existe un valor residual del proyecto que está representado por el dinero en efectivo de los posibles flujos generados después de que expire la patente: $M \times B$. En este caso los argumentos estándares implican que el valor del proyecto debe cumplir con:

$$\frac{1}{2}\sigma^2 B^2 V_{BB} + \alpha^* B V_B + V_t - rV + B = 0 \quad (4.3)$$

s.a.

$$V(B, T) = M \cdot B$$

4.2.1.2 Valor de la oportunidad de inversión

Antes de que la inversión se complete, el valor del proyecto de I+D, $F(B, C, t)$, depende tanto de la tasa del flujo de caja proyectado (el cual se hace efectivo sólo si se completa el proyecto), del costo remanente y del tiempo. Asimismo, este valor debe satisfacer la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2}\varphi^2 B^2 F_{BB} + \frac{1}{2}\sigma^2 I C F_{CC} + \varphi\sigma\rho B\sqrt{IC} F_{BC} + \alpha^* B F_B - I F_C + F_t - (r - \lambda)T - I = 0 \quad (4.4)$$

s.a.

$$F(C, 0, te) = V(C, te)$$

La dificultad de la condición de frontera es que la fecha de realización de la inversión (te) es una variable aleatoria. El valor del proyecto de I+D al completarse depende no solo de los flujos de cajas de ese momento sino también

de la duración de la inversión (básicamente porque la duración de los flujos de caja se limita a la expiración de la patente).

4.2.1.3 Etapas de I+D

El modelo básico expuesto puede ser extendido para dar cuenta de las características que se presenten en el mercado de la industria farmacéutica, donde el proyecto se realiza en dos etapas. Una primera donde el objetivo es encontrar el compuesto químico que logre generar el efecto deseado y una segunda donde debe asegurarse que el compuesto encontrado es efectivo y seguro al administrarse en los seres humanos.

El proceso de desarrollo de las drogas es un proceso secuencial, por este motivo se deberá detallar en qué momento se puede abandonar el proyecto. Esta decisión dependerá de diferentes factores, tales como: los potenciales beneficios terapéuticos, la frecuencia esperada y la severidad de las reacciones adversas, el desarrollo adicional proyectado, el marketing, la distribución y los costos de producción y estimaciones de los ingresos futuros. De esta manera una vez que el compuesto sea candidato firme este deberá ser presentado a la FDA.

Treinta días después de esta presentación deberá comenzarse con las pruebas de fase clínicas en humanos. Estas pruebas se producen durante tres fases diferentes: en la fase I la prueba se realiza en un pequeño grupo de gente en general totalmente sana, básicamente para obtener el grado de toxicidad y seguridad de dosis en seres humanos. En la fase II es administrado a un grupo mayor de personas a los cuales se los considera como aquellos que necesitan la droga para una posterior recuperación. Esto se hace para ver el grado de eficacia y la información adicional en cuanto a seguridad de la misma. En la etapa III la administración es masiva, por el hecho de encontrar un grado de eficacia definitivo y las posibles reacciones adversas. Una vez que se ha completado la fase clínica y se puede llegar a considerar que la droga puede ser aprobada, se presenta ante la FDA para su posterior aprobación, de manera que la revisión que realiza la FDA para la aprobación de la droga puede considerarse como una cuarta fase del ciclo del proyecto.

El enfoque de simulación del modelo propuesto por (Schwartz, 2004) puede adaptarse a diferentes fases de inversión “ i ”. Por lo que la dinámica de los costos esperados para la finalización del proyecto viene dado por:

$$dC_i = -I_i dt + \vartheta_i \sqrt{I_i C_i} dZ_i$$

4.2.2 Valuación de inversiones conjuntas en el mercado de nanomedicina

Esta sección captura tres características principales de las inversiones en nanomedicina, dentro de un modelo de valuación de inversiones conjuntas: (a) La cooperación necesaria entre dos empresas (una especialista en nano y una farmacéutica con llegada al mercado global); (b) la incertidumbre del mercado debido a la tecnología y a la política de regulación; (c) incentivos gubernamentales a la nanomedicina. En particular, se analiza la interacción comercial entre una empresa especializada en desarrollo de patentes nano y una farmacéutica con llega al mercado global de medicamentos. La primera empresa desarrolla la investigación base y realiza los testeos *In vitro/in vivo* para lograr el patentamiento y la segunda tiene la capacidad de producir en forma global el producto a comercializar. Esta interacción se modela utilizando teoría de juegos y la valuación del proyecto conjunto se realiza mediante opciones reales.

4.2.2.1 El modelo

La economía consta de dos compañías. La primera es una pequeña empresa especializada en desarrollos de nanomedicina pero sin acceso al mercado de consumo de medicamentos. La segunda es una empresa farmacéutica con experiencia en el mercado de medicamentos. Para poder lanzar un nuevo producto que permita suministrar una droga específicamente en un lugar del organismo humano, se necesitan mutuamente.

Al momento inicial las empresas discuten el proyecto conjunto y acuerdan invertir (K_N, K_F) respectivamente. Específicamente, al momento inicial, la empresa nano (N) invierte K_N en desarrollar la nanomolécula, patentarla y testearla. Para el momento $t=1$ cuenta con una patente, por lo que invita a la empresa farmacéutica (F) a invertir K_F para comenzar la producción conjunta.

Esto les permite esperar un ingreso medio “ Y ” al finalizar el proyecto. Asimismo acuerdan que el resultado final se divida entre las empresas. Nanotech recibe αY y la farmacéutica el resto $(1-\alpha)Y$.

Debido a la incertidumbre del Mercado (por ejemplo la posibilidad que otro par de empresas logren un producto que compita) el ingreso final del proyecto en $t = 2$ puede ser mayor del esperado ($u.Y$) o menor que el mismo ($d.Y$). Para tomar en cuenta esto, se asume que el ingreso final sigue un movimiento browniano, los agentes tiene aversión al riesgo cero y el proyecto tiene una probabilidad de éxito p (Hull, 2006; Luenberger, 1998). Para asegurar que la valuación inicial es consistente con los supuestos (y realizando una aproximación de primer orden), los valores de u y d son los siguientes:

$$u = 1 + \sigma \sqrt{\frac{1-p}{p}} ; \quad d = 1 - \sigma \sqrt{\frac{p}{1-p}} \quad (4.5)$$

La estructura básica del problema se resume en la gráfico 4.1. En el momento inicial, Nanotech calcula el valor presente del proyecto (utilizando un factor de descuento β) y decide si invertir o no. Si decide investigar y obtener la patente aprobada, la tecnología está lista para la etapa de producción en $t=1$. También en el momento inicial la farmacéutica evalúa el proyecto y decide si invertirá K_F en $t = 1$ (acordando pagar a Nanotech una fracción α del resultado del proyecto en el momento 2). Asimismo, el proyecto está sujeto a incertidumbre, representada por la probabilidad p y una volatilidad σ , lo cual determina dos escenarios en $t=2$.

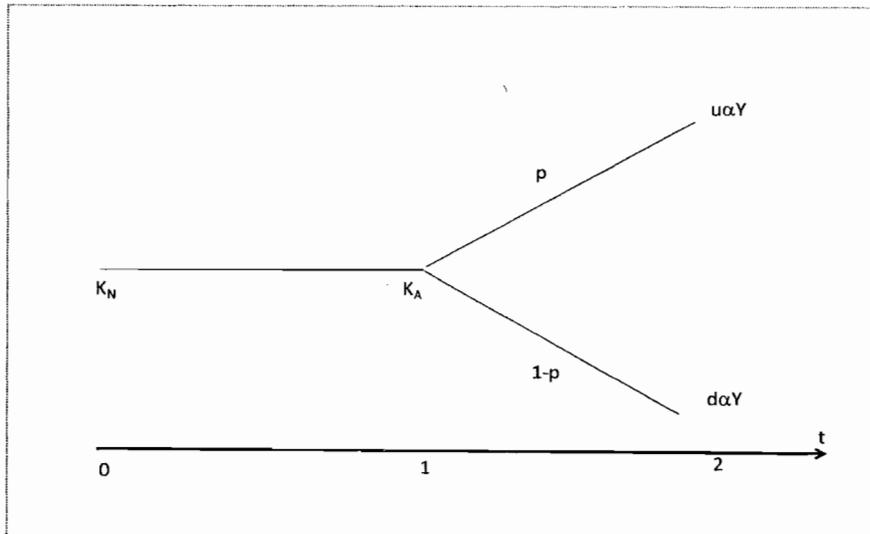


Gráfico 4.1: Línea de tiempo y pago a la empresa Nano

4.2.2.2 Condiciones para que se realice la inversión conjunta

Como se ha mencionado anteriormente, cada uno de los agentes evalúa la inversión conjunta desde su propio punto de vista. Nanotech recibirá una fracción α del resultado, por lo que se descuenta este valor dos períodos y se lo compara con la inversión inicial requerida al momento inicial. La farmacéutica, por su parte, descuenta su participación final un periodo para comparar con la inversión que se le pide.

Ahora bien, para participar en el proyecto conjunto ambas empresas deben recibir al final un valor que supere (o iguale) la inversión actualizada. Por lo que las dos condiciones que deben cumplirse para que el proyecto conjunto se realice son:

$$\text{Nano} \quad \beta^2 [p u Y \alpha + (1 - p) d Y \alpha] \geq K_N \quad (4.6)$$

$$\text{Farmacéutica} \quad \beta [p u Y (1 - \alpha) + (1 - p) d Y (1 - \alpha)] \geq K_F \quad (4.7)$$

De estas ecuaciones surge en forma inmediata que α impacta en las ganancias de ambas empresas. Si $\alpha = 1$, Nanotech recibe la ganancia máxima, mientras que la farmacéutica pierde todo el capital invertido. Por el contrario, si $\alpha = 0$, la farmacéutica es quien recibe la ganancia máxima (ver gráfico 4.2). Resumiendo, mientras el proyecto conjunto sea rentable, Nanotech participará si la

participación es mayor que un determinado valor ($\alpha \geq \alpha^d$) y el productor lo hará si $\alpha \leq \alpha^u$; por lo que la inversión será exitosa si $\alpha \in [\alpha^d, \alpha^u]$.

Asumiendo que la farmacéutica tiene mayor poder de negociación, podría imponer un $\alpha = \alpha^d$ y maximizar su rentabilidad. Ahora bien, si presiona en exceso forzando un $\alpha < \alpha^d$, la inversión no tendrá lugar (Nanotech se retira al no satisfacer su restricción). La siguiente sección analiza como el gobierno puede sostener la inversión conjunta, asumiendo que el proyecto presenta externalidad positivas para la sociedad.

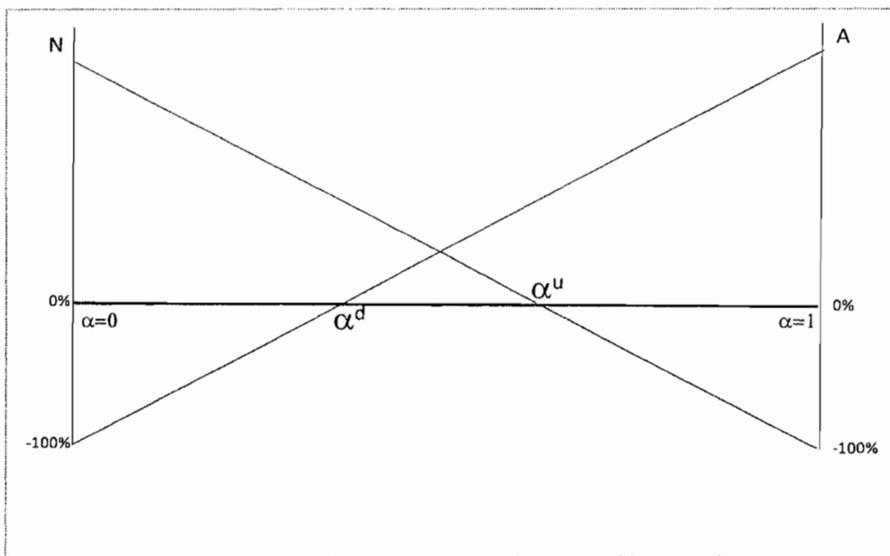


Gráfico 4.2: Valor presente de la ganancia como función de α

4.3 Modelización y cuantificación de la política gubernamental nano

Esta sección analiza el rol del gobierno en el mercado de nanomedicina. Anteriormente en este trabajo, se ha remarcado que el paradigma europeo de regulación es claramente precautorio en temas nano. Ahora bien, para operacionalizarlo y poder tomar decisiones gubernamentales, es fundamental cuantificarlo.

La primera parte de esta sección modeliza y cuantifica el principio precautorio. En la segunda parte, se detallan los incentivos gubernamentales posibles y se analiza las ventajas y desventajas de cada uno.

4.3.1 Modelización y cuantificación del principio precautorio

Si bien existe mucha literatura sobre el principio precautorio, resulta difícil operacionalizarlo para tomar decisiones gubernamentales. Esta sección lo formaliza, siguiendo a Scott Farrow (2004), para permitir evaluar proyectos de inversión como parte de la toma de decisiones gubernamentales.

El modelo articula técnicas de evaluación de riesgos, el análisis costo-beneficio de proyectos y la valuación de inversiones irreversibles bajo incertidumbre. De esta forma presenta un modelo que cuantifica, frente a la posibilidad de llevar adelante un proyecto de I+D, el valor social de la “precaución”. La propuesta es evaluar socialmente si realizar un proyecto determinado ahora es óptimo o es preferible esperar, llevando a la práctica gubernamental lo que la literatura de riesgos denomina “principio precautorio”.

El desafío es utilizar un método que incorpore la incertidumbre y la irreversibilidad en los criterios de gestión de riesgos que se utilizan para el análisis de políticas de regulación públicas. De forma de superar la metodología estándar de costo-beneficio que simplemente propone llevar adelante una acción cuando los beneficios netos esperados son positivos. Sin embargo, si se contempla la incertidumbre y la irreversibilidad del proyecto, este umbral es superior a cero.

4.3.1.1 El modelo

Siguiendo la propuesta de Farrow (2004), se asimila el valor de la precaución frente a una propuesta de proyectos de inversión, al de una opción de esperar (Dixit y Pindyck, 1994).

En particular, cualquier proyecto conlleva un costo social irreversible (C), y seguramente, beneficios sociales (B); los cuales se modelizan mediante su valor presente neto de costos reversibles.

El costo social irreversible es un valor determinado por los especialistas, mientras que los beneficios sociales se modeliza como un proceso browniano geométrico:

$$dB(t) = \alpha B(t)dt + \sigma B(t)dz \quad (4.8)$$

Formalmente, si la tasa de descuento es ρ , la ecuación recursiva de Bellman correspondiente al valor de la opción de esperar (F) al momento "t" es:

$$F(B(t)) = \text{Max} \left(B(t) - C, e^{-\rho dt} E \left(F(B(t + dt)) \right) \right) \quad (4.9)$$

Donde $F(B(t))$ es la cuantificación del principio precautorio desde el punto de vista del gobierno encargado de regular la actividad en cuestión.

A continuación se analiza la regla de decisión que permite decidir en que momento es óptimo invertir. Para ello, al momento "t", se compara el valor del proyecto si se ejecuta hoy: $[B(t) - C]$, con el valor de esperar: $e^{-\rho dt} E \left(F(B(t + dt)) \right)$.

Matemáticamente, la resolución del problema consiste en convertir el problema en uno de parada óptima, para encontrar el valor crítico del beneficio social (B^*) que separa la región donde es óptimo esperar ($B < B^*$), de la cual en donde conviene comenzar el proyecto en forma inmediata ($B > B^*$). De forma que la regla de decisión viene dada por:

$$\text{Si } B < B^* \Rightarrow F_E(B(t)) = e^{-\rho dt} E \left(F_E(B(t + dt)) \right)$$

$$\text{Si } B > B^* \Rightarrow F_D(B(t)) = B(t) - C$$

$$\text{Si } B = B^* \Rightarrow F_E(B^*) = F_D(B^*) \text{ (Continuidad de la función } F)$$

$$\frac{dF_E}{dv}(B^*) = \frac{dF_D}{dv}(B^*) \text{ (Continuidad de la primera derivada).}$$

Asimismo, se requiere que se cumpla la condición de monotonía para F_D y F_E y para $B(t+dt)$ dado $B(t)$. Por lo que, en la región donde es óptimo esperar se cumple que:

$$F_E(B(t)) = e^{-\rho dt} E \left(F_E(B(t + dt)) \right)$$

Multiplicando ambos miembros por $e^{\rho dt}$,

$$e^{\rho dt} F_E(B(t)) = E \left(F_E(B(t + dt)) \right)$$

Restando $F_E(B(t))$

$$(e^{\rho dt} - 1) F_E(B(t)) = E \left(F_E(B(t + dt)) - F_E(B(t)) \right)$$

Dividiendo por Δt

$$\frac{(e^{\rho \Delta t} - 1)}{\Delta t} F_E(B(t)) = \frac{E \left(F_E(B(t + \Delta t)) - F_E(B(t)) \right)}{\Delta t}$$

Si $\Delta t \rightarrow 0$

$$\rho F_E(B) = \frac{E \left(dF_E(B) \right)}{dt}$$

Por otro lado como sabemos que B sigue un movimiento browniano geométrico, podemos escribir, utilizando el lema de Ito, el proceso de $dF_E(B)$ de la siguiente forma:

$$dF_E(B) = \left(F'_E(B)\alpha B + \frac{1}{2} F''_E(B)\sigma^2 B^2 \right) dt + F'_E(B)\sigma B dz$$

Y la esperanza es:

$$E \left(dF_E(B) \right) = \left(F'_E(B)\alpha B + \frac{1}{2} F''_E(B)\sigma^2 B^2 \right) dt$$

Por lo que

$$\rho F_E(B) = \frac{E \left(dF_E(B) \right)}{dt} = F'_E(B)\alpha V + \frac{1}{2} F''_E(B)\sigma^2 B^2$$

Convirtiendo el problema original en una ecuación diferencial ordinaria sujeta a restricciones:

$$\frac{1}{2} \sigma^2 B^2 F''_E(B) + \alpha B F'_E(B) - \rho F_E(B) = 0 \quad (4.10)$$

$$\text{s.a.} \quad F_E(0) = 0, F_E(B^*) = B^* - C, F'_E(B^*) = 1$$

Se propone la forma de la solución: $F_E(B) = C B^v$, por lo que la ecuación característica es: $\frac{1}{2}\sigma^2 v(v-1) + \alpha v - \rho = 0$

Resolviendo la ecuación cuadrática:

$$v_1 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} + \sqrt{\left[\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right]^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} > 1 \quad ; \quad v_2 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} - \sqrt{\left[\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right]^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} < 0$$

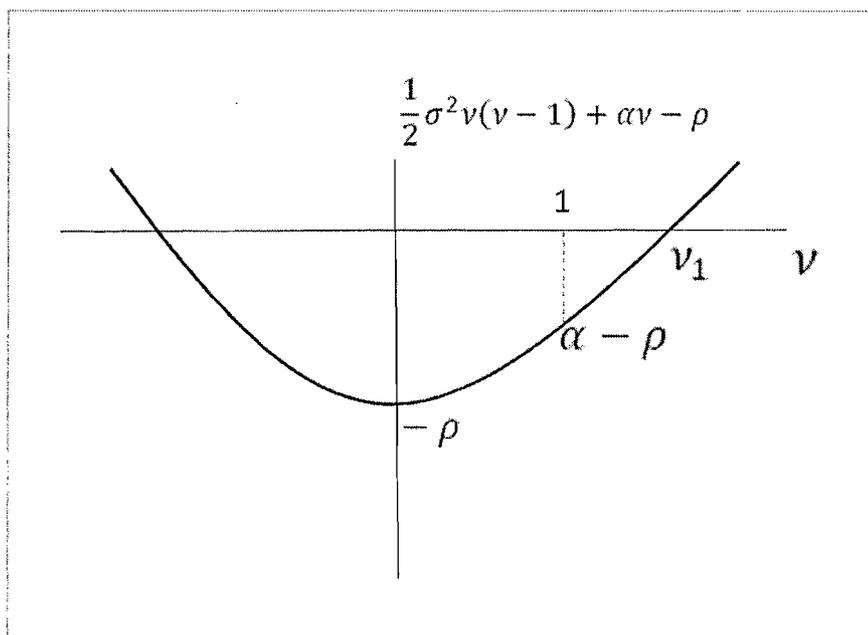


Gráfico 4.3. Solución de la cuadrática. Fuente: (Dixit, AK y Pindyck, 1994)

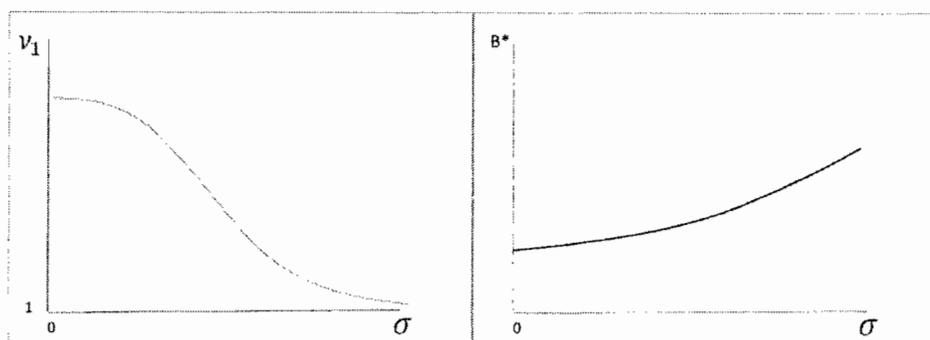
Resumiendo, la forma general de la solución es $F_E(B) = D_1 B^{v_1} + D_2 B^{v_2}$. Ahora bien, la restricción $F_E(0) = 0$ nos impone que el término con el exponente negativo no puede existir, por lo que $D_2 = 0$. Asimismo, las otras restricciones nos imponen que $B^* = \frac{v_1}{(v_1-1)} C$ y $D_1 = \left(\frac{v_1-1}{C}\right)^{v_1-1} v_1^{-v_1}$.

Lo anterior implica que la opción de esperar (si $B < B^*$) está dada por:

$$F_E(B) = D_1 B^{v_1}$$

A mayor volatilidad, menor v_1 , por lo que es mayor el umbral crítico

$$\frac{\partial v_1}{\partial \sigma} = 2 \frac{\alpha}{\sigma^3} + \frac{1}{2} \left(\left[\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2} \right)^{-1/2} \left(-4 \frac{\alpha^2}{\sigma^5} + 2 \frac{\alpha}{\sigma^3} - 2 \frac{2\rho}{\sigma^3} \right) < 0 \Rightarrow \frac{v_1}{(v_1-1)} \uparrow \Rightarrow B^* \uparrow$$



4.4. La raíz v_1 y el beneficio crítico (B^*) en función de la volatilidad del proceso.

4.3.1.2 La decisión gubernamental

En primer lugar, el umbral de decisión planteado es más prudente que el tradicional donde se requiere solamente que el valor presente de los beneficios netos sea igual al costo social irreversible del proyecto ($B=C$). Utilizando el principio precautorio, se demora el proyecto hasta que los beneficios superen significativamente los costos, de forma de contemplar el aspecto irreversible de los costos y la posibilidad de que el beneficio neto observado hoy sea optimista (Farrow, 2004).

Ahora bien, el gobierno evalúa los beneficios netos analizando los beneficios sociales esperados pero contemplando los riesgos para la sociedad que conlleva permitir la innovación. Si al momento de la evaluación, el beneficio esperado no es suficientemente mayor que el costo irreversible, el gobierno prefiere mantener su opción precautoria y no autorizar el proyecto.

El procedimiento propuesto para lograr una decisión gubernamental se detalla a continuación. Primeramente, al gobierno se le presenta un proyecto que debe autorizar y acuerda el sector privado los siguientes valores:

- El costo social irreversible que el proyecto causará: C
- El valor presente del beneficio neto de costos reversibles futuros al momento inicial $B(0)$
- Se estiman los parámetros del proceso que seguirá ese beneficio neto B (α y σ)
- Tasa de descuento: ρ

Se procede entonces al cálculo del valor crítico anteriormente mencionado de B^* :

- Cálculo de v_1 en base los parámetros: $v_1 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} + \sqrt{\left[\frac{\alpha}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right]^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}}$
- $B^* = \frac{v_1}{(v_1-1)} C$

Por lo que la regla de decisión gubernamental es: Si $B(0) \leq B^*$ se debe esperar y no debe autorizarse el comienzo del proyecto de inversión.

4.3.2 Diseño de Incentivos gubernamentales

En el ámbito de la formulación de políticas públicas para fomentar el desarrollo de vacunas farmacéuticas, la literatura reconoce dos categorías principales de incentivos: *push* y *pull*. En esta sección se evalúan ambas propuestas para financiar proyectos de nanomedicina en base al costo del financiamiento gubernamental y a su contribución social (Hsu y Schwartz, 2008).

Un programa gubernamental de incentivos *push* es aquel que impulsa el desarrollo contribuyendo con parte del costo del desarrollo. Este subsidio puede ser otorgado a personas (becas o premios de investigación) o a empresas. Por otro lado, un programa *pull* estimula la investigación mediante el aumento de los ingresos generados por el producto desarrollado. El subsidio puede consistir en un plan de compromiso de compra o una extensión de la patente. Hsu y Schwartz (2008) también consideran planes híbridos de incentivos que combinan la subvención de ingresos futuros con subvención de los gastos.

Hsu y Schwartz (2008) desarrollan una medida del costo unitario por individuo que se beneficia del descubrimiento, ponderando los costos y beneficios de un determinado subsidio:

$$\frac{\text{Valor Actual (Costo gubernamental)}}{E[Q(\tau).q.T]} \quad (4.11)$$

donde Q es la eficacia del nuevo producto, q son las unidades suministradas por año, y T es el número de años del contrato de subvención. Los autores no contemplan los problemas de agencia que surgen de la información asimétrica entre el desarrollador de la vacuna y el patrocinador, ni los temas de contratación.

Asimismo no se considera que los programas de subvenciones obliguen a la transferencia de la titularidad de la vacuna al gobierno, pues los organismos públicos carecen de los conocimientos a poseer, administrar y distribuir los recursos farmacéuticos efectivamente.

Por su parte, Kremer (2002) concluye que los programas de subvenciones *pull* son más efectivos porque eliminan en gran medida los problemas de agencia entre el promotor y el desarrollador. Dentro las políticas *pull*, la extensión de patentes es el más utilizado de los formatos para fomentar la innovación en general. Algunos economistas y activistas de la política han sostenido que el fortalecimiento de la protección de patentes o prolongación de la vida de patentes para productos farmacéuticos en los países subdesarrollados aumenta el incentivo empresarial para llevar a cabo investigaciones sobre enfermedades específicas de los países en desarrollo (Kremer, 2002). Desde el punto de vista empresarial, el aumento de la protección de las patentes permite a la empresa tener un mercado monopolístico por más tiempo, lo cual aumenta sus ingresos.

Por otro lado, dentro de las alternativas *pull*, algunos gobiernos prefieren optar por un plan de subsidio a los precios o directamente un compromiso de compra de una determinada cantidad. Para evitar que, la empresa que tiene una venta asegurada produzca un producto de baja calidad, el gobierno monitorea permanentemente el desarrollo y establece pautas para el control de calidad. Dado que la calidad del producto desarrollado es observada en τ , en el marco del plan de compromiso de compra, el contrato establece las unidades socialmente óptimas para la compra. De esta forma, la cantidad que la compañía vende al gobierno depende sólo de $Q(\tau)$.

La característica distintiva del plan de compromiso de compra es que el gobierno decide cuánto y cómo se distribuye el descubrimiento. La empresa renuncia a su derecho a obtener una renta de monopolio, a cambio de un compromiso de compra a un precio acordado. En otras palabras, el gobierno contrata a la empresa para suministrar la cantidad socialmente eficiente.

El plan de subsidio de costo compartido fomenta la innovación en el desarrollo de vacunas mediante la reducción del costo de la investigación y la ampliación de la

producción. Si se utiliza un plan de subvención de los gastos, la empresa opta por suministrar la cantidad monopólica que surge de la función inversa de la demanda.

4.3.2.1 *Contratos híbridos*

Se pueden combinar contratos de compra con compromiso de subsidio de costo compartido para crear contratos híbridos, los cuales combinan los atributos positivos de ambos tipos de subvenciones.

El mecanismo mediante el cual se subvenciona la empresa en un régimen de subvenciones de costo compartido es más eficaz en el fomento de las actividades de I+D, pero ineficaz para fomentar una cantidad eficiente de suministro al mercado una vez que se cuenta con una vacuna. Esto claramente puede ser aliviado si se combinan, un subsidio de costo compartido, con un compromiso de compra dentro del marco de contrato híbrido.

4.3.2.2 *Intervención gubernamental en el modelo de integración entre la empresa Nano y la farmacéutica*

A los fines de ejemplificar, esta sección analiza la situación en la cual la farmacéutica utiliza su poder de mercado para exigir una participación alta en los ingresos del negocio (forzando a la empresa Nano a abandonar el proyecto).

Una forma de intervención es prometer un incentivo *Pull*, el gobierno promete pagar X al finalizar el proyecto a Nanotech. El valor de X es tal que pone a la empresa Nano indiferente y deja la ganancia de la farmacéutica intacta (Ver Gráfico 4.5). Las restricciones que deben cumplirse para que ambas empresas sean parte del proyecto son:

$$\begin{aligned} \text{Nano} \quad \beta^2 [p \max(u Y \alpha, X) + (1 - p) \max(d Y \alpha, X)] \\ \geq K_N \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\text{Farmacéutica} \quad \beta [p u Y (1 - \alpha) + (1 - p) d Y (1 - \alpha)] \geq K_F \quad (4.13)$$

De la restricción de la empresa Nano surge que el valor mínimo que tiene que tener la promesa estatal es $X > \frac{K_N}{\beta^2}$ (Ver gráfico 4.6).

Es importante destacar que el incentivo se paga al final. Claramente, esto es una política contracíclica. El gobierno puede de esta forma incrementar el empleo tecnológico en tiempos de recesión sin necesidad de efectivo. Es más, si es que goza de credibilidad, puede vender la opción en el mercado. Este modelo puede ser utilizado por los gobernantes para analizar incentivos en el sector de nanotecnología. La principal característica de la propuesta es que no requiere aporte estatal al comienzo del proyecto.

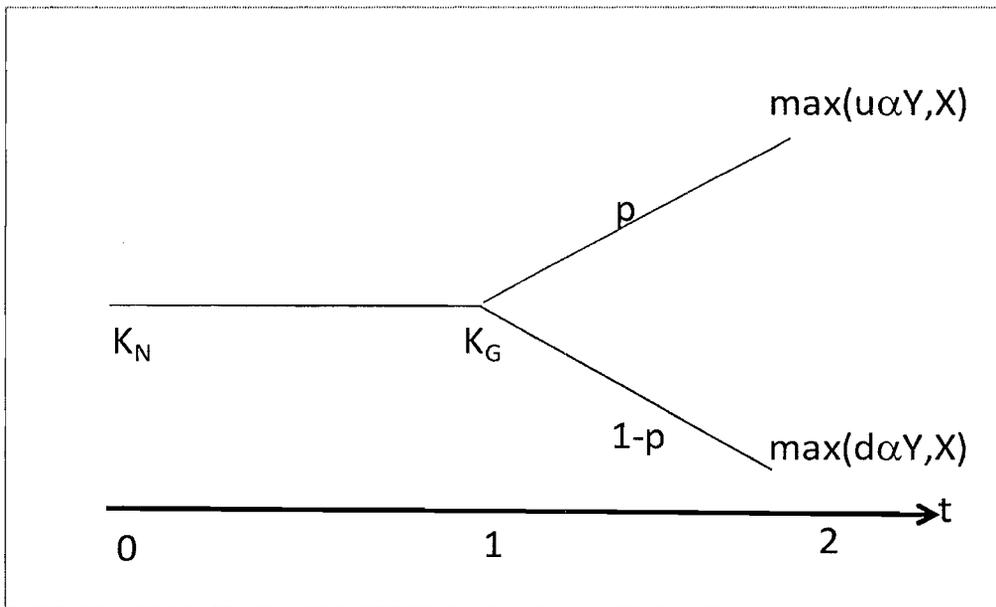


Gráfico 4.5: Pago a Nanotech con intervención estatal

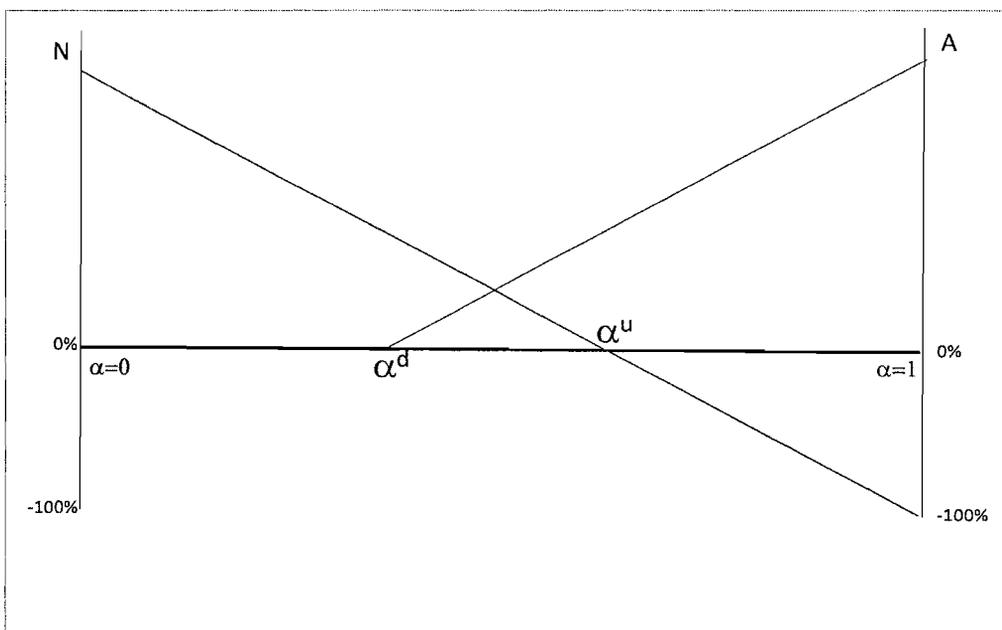


Gráfico 4.6: Valor presente de la ganancia como función de α (intervención gubernamental)

4.4 Modelo integrado

Como se ha mencionado previamente, el objetivo del presente trabajo es elaborar un modelo de valuación de proyectos en el mercado de nanotecnológico que contemple su dinámica científica, su dinámica industrial y su regulación. Esta sección desarrolla un modelo de valuación de proyectos en el mercado nanotecnológico de inversiones que contemple las distintas etapas de investigación y desarrollo, la incertidumbre del mercado debido a la tecnología y a la política de regulación, y las regulaciones e incentivos gubernamentales.

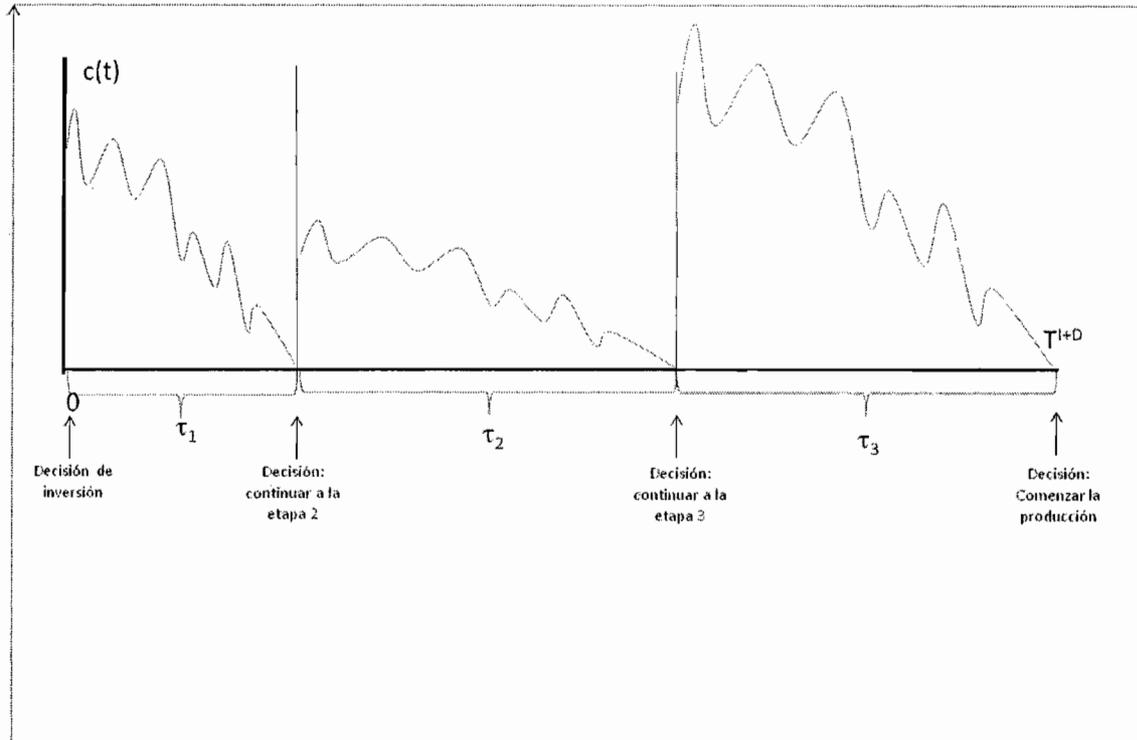
Primeramente se modeliza el costo remanente de inversión en cada etapa, explicitando las fuentes de incertidumbre. Luego presenta el proceso estocástico durante la etapa de instalación para la producción a escala comercial, dando lugar al análisis del ciclo de vida del producto en cuestión. A continuación se presenta el procedimiento de solución numérica del modelo propuesto. Por último se analizan los impactos de las diferentes políticas gubernamentales en la valuación presentada.

4.4.1 Etapas de I+D

Cualquier proyecto de I+D, y en particular uno de nanomedicina, es un proceso de inversiones secuenciales. Esto permite a la inversora abandonar en cualquier momento que se requiera un nuevo aporte. La regla de decisión es: se realiza la inversión subsiguiente si el valor presente del proyecto esperado es mayor que el aporte necesario para costear la etapa.

Formalmente dividimos la duración del proyecto que va desde el comienzo hasta tener el producto terminado, en etapas. Cada una de ellas involucra tareas a realizar que en forma agregada generan un costo total de la etapa esperado (C_i^e). Asimismo cada etapa tiene una tasa de inversión máxima que se puede realizar. En la medida que se invierte, se reduce el costo remanente para concluir $c_i(t)$, que se modeliza como un proceso estocástico con valor inicial igual al costo total esperado ($c_i(0) = C_i^e$).

Cuando el costo llega a cero, la etapa se considera terminada, siendo entonces la duración de la etapa una variable aleatoria (τ_i), que comienza en $t^{i-1} = \sum_{j=1}^i \tau_j$ y termina en $t^i = \sum_{j=1}^i \tau_j$.



4.7. Línea de tiempo para 3 etapas.

4.4.1.1 Proceso estocástico del costo remanente en la etapa "i"

El costo remanente de la etapa "i" evoluciona a partir de un valor inicial $C_i^e = c_i(0)$ siguiendo un proceso descrito por (Pindyck, 1993):

$$dc_i(t) = -A dt + \sigma_i \sqrt{Ac_i(t)} dz_i + \gamma c_i(t) dy \quad (4.14)$$

$$\text{donde } A = \begin{cases} 0 & t < t^{i-1} \\ I_i & t^{i-1} \leq t \leq t^i \end{cases}$$

El primer y segundo términos del proceso son cero fuera de la etapa. Dentro de la misma, el primero muestra como el costo remanente decrece con el tiempo debido a la inversión realizada y el segundo término corresponde a lo que Pindyck (1993) denomina incertidumbre técnica. Por otro lado, el último término corresponde a la incertidumbre sobre los precios de las materias primas y la mano

de obra, que se asume igual para todas las etapas. Una vez que llega a cero el proceso se detiene dando por finalizada la etapa en cuestión.

El producto se encuentra terminado cuando todas las etapas han sido concluidas. De forma que $t^n = \sum_{i=1}^n \tau_i$ es la variable aleatoria que representa el tiempo necesario de investigación y desarrollo para terminar el producto.

Asimismo, en cada etapa existe la posibilidad de fracaso técnico que se modeliza utilizando una distribución de *Poisson* de parámetro λ_i . Siguiendo lo planteado por Schwartz (2004), se descuenta a la tasa $(r - \lambda_i)$ porque cada etapa tiene una probabilidad de evento extremo que puede hacer fracasar el proyecto.

4.4.1.2 Decisión de abandono

Los momentos de decisión en los cuales se puede abandonar el proyecto son los comienzos de cada etapa. En esos momentos se compara el valor esperado del proyecto (en base al futuro) con el costo total esperado de la etapa.

4.4.1.3 Resumen de variables involucradas

C_i^e	Costo total de la etapa esperado
$c_i(t)$	Costo remanente de la etapa "i"
I_i	Tasa de inversión etapa "i"
σ_i	Volatilidad costo remanente etapa "i"
dz_i	Proceso browniano etapa "i"
τ_i	Duración etapa "i"
λ_i	Parámetro de poisson asociado a la posibilidad de fracaso de la etapa
t^n	tiempo necesario total esperado para terminar la "n" etapas de I+D $t^n = \sum_{i=1}^n \tau_i$
r	Tasa libre de riesgo

4.4.2 Instalación para la producción a escala comercial

Luego de terminar el desarrollo del producto, se requiere invertir en una instalación que permita la producción a escala comercial.

4.4.2.1 Proceso de costo remanente de instalación

El costo remanente evoluciona a partir de un valor inicial C_{n+1}^e (en $t = t^n$) y siguiendo un proceso similar al de las etapas de desarrollo, donde $i = n + 1$.

$$dc_{n+1}(t) = -Adt + \sigma_{n+1}\sqrt{A c_{n+1}(t)} dz_{n+1} + \gamma c_{n+1}(t) dy_c \quad (4.15)$$

$$\text{donde } A = \begin{cases} 0 & t < t^n \\ I_{n+1} & t^n \leq t \leq t^{n+1} \end{cases}$$

El primer y segundo términos del proceso son cero fuera de la etapa de instalación. Dentro de la misma, el primero muestra como el costo remanente decrece con el tiempo debido a la inversión realizada y el segundo término corresponde a lo que Pindyck (1993) denomina incertidumbre técnica. El último término corresponde a la incertidumbre sobre los precios de las materias primas y la mano de obra vinculados a la construcción de la fábrica de producción a escala comercial.

4.4.2.2 Regla de decisión

Antes de comenzar la instalación se evalúa si es conveniente continuar o abandonar el proyecto de inversión. Se compara el valor esperado del proyecto (en base al futuro de ventas) con el costo total esperado de instalación.

4.4.2.3 Resumen de variables involucradas

C_{n+1}^e	Costo total de la instalación esperada
$c_{n+1}(t)$	Costo remanente para terminar la instalación
I_{n+1}	Tasa de inversión

σ_{n+1}	Volatilidad costo remanente
dz_{n+1}	Proceso browniano asociado a la etapa de instalación
τ_{n+1}	Duración de la instalación
λ_{n+1}	Parámetro de Poisson asociado a la posibilidad de fracaso de la instalación de la fábrica
T	tiempo total esperado para vender el producto $T = \sum_{i=1}^n \tau_i + \tau_{n+1}$
r	Tasa libre de riesgo

4.4.3 Comercialización: Ciclo de vida del producto

Una vez desarrollado el producto e instalada la fábrica para su producción masiva, se inicia la etapa de comercialización del mismo. Claramente, durante el proceso de desarrollo, la inversión está expuesta a incertidumbre sobre la demanda y sobre la oferta (mercado monopolístico, duopolio o competencia perfecta). Todo esto en un contexto donde se tiene una fecha de vencimiento establecida de la patente, por consiguiente se sabe cuándo la empresa entrará en competencia perfecta.

4.4.3.1 Interacciones competitivas en el mercado I+D

La posibilidad de que aparezcan productos de la competencia que apunten al mismo mercado debe ser tenida en cuenta en la toma de decisiones durante la fase de desarrollo. Las interacciones competitivas en la fase de desarrollo pueden llevar a algunas empresas a abandonar su proyecto antes de completar su desarrollo.

El aspecto de la competencia ya fue considerado por Schaubroeck and Williams (1993). Los autores analizan el impacto de la competencia sobre la opción de

invertir, concluyendo que una perfecta coordinación entre los inversores en competencia llega a un equilibrio (por lo que requiere cooperación para ser alcanzado). Por su parte Huisman y Kort (1999) analizan el problema de coordinar el comportamiento de la inversión en un contexto no-cooperativo.

Miltersen y Schwartz (2004) presentan un modelo que permite analizar proyectos de I+D protegidos por patentes combinando elementos de la teoría de opciones reales con los conceptos de equilibrio de la teoría de juegos. En el modelo de Miltersen y Schwartz, las decisiones de inversión de un jugador dependen fundamentalmente de las decisiones de los otros jugadores tanto en la fase de desarrollo como durante la comercialización. La posibilidad de un mercado monopolístico (o en competencia) a futuro afecta a las decisiones adoptadas por los jugadores en la fase de desarrollo. Técnicamente, en la situación de monopolio el inversor puede suponer que la distribución de probabilidad del subyacente es exógena, mientras que en la situación de oligopolio las decisiones de los jugadores afectan la distribución referida, siendo por consiguiente una variable endógena y tomada en cuenta para el cálculo del equilibrio de mercado.

En particular, se consideran dos empresas que están desarrollando dos medicamentos diferentes que curan la misma enfermedad, por lo que si ambas tienen éxito, tendrán que compartir el mercado en duopolio. Esto implica que durante la fase de desarrollo, cada empresa tendrá en cuenta no sólo su propia situación, sino también la situación de su competidor. En el modelo, el costo necesario para finalizar el producto sigue un proceso estocástico propio de cada empresa donde se incorporan dos fuentes de incertidumbre: problemas técnicos, que son propios de cada empresa, y la incertidumbre de los costos de los insumos, que son comunes a ambas. Además, como en el caso monopolístico de Schwartz (2004), durante la fase de desarrollo hay una probabilidad de eventos catastróficos modelizada por una distribución de *Poisson*.

En el contexto planteado, la firma que primero desarrolle el producto empieza a recibir los beneficios del monopolio en la venta de la droga hasta que la otra empresa entra en el mercado. El modelo asume que la demanda de la droga

también es estocástica⁸⁰. Las estrategias de inversión de equilibrio y de producción de ambas empresas se calculan entonces en un contexto de mercado *Cournot-Nash*. Dado que no existe una solución analítica, los autores resuelven el problema mediante métodos numéricos de simulación aplicando una versión extendida del método propuesto por Longstaff y Schwartz (2001).

Miltersen y Schwartz (2004) exponen resultados que tienen implicancias políticas importantes. Por un lado concluyen que el valor del proyecto para el monopolista es mayor que el valor total de los proyectos de ambos duopolistas. Sin embargo, la cantidad producida es en promedio más alta en el caso del duopolio. Por lo tanto, si el objetivo de los reguladores es promover la producción de la mayor cantidad posible de medicamentos al menor precio posible en el menor periodo de tiempo, es necesaria la competencia.

4.4.3.2 Proceso de difusión del volumen de ventas

Estudios econométricos en la industria de la salud muestran que los productos tienen un ciclo de vida (Grabowski, H y Vernon, 1990; Grabowski, H, Vernon y DiMasi, 2002; Grabowski, HG y Vernon, 1992, 1994). A los fines de formalizar el proceso de difusión de las ventas, el presente modelo se inspira en los trabajos de Frank Bass (Bass, Frank, 1969; Bass, FM, 2004).

Los productos nanomédicos tienen un ciclo de vida que es especialmente sensible a la duración de la patente. Al comenzar el ciclo, las ventas empiezan a subir desde un valor inicial con beneficios netos anuales bajos. Si bien la competencia es baja (o nula) en el comienzo, el mercado se empieza a construir a partir de campañas de marketing y de algunos clientes iniciales. Luego, el beneficio neto anual crece relativamente rápido en un contexto protegido por una patente hasta que llega a un máximo durante la etapa de madurez. Por último, comienza a bajar debido a un contexto de creciente competencia.

Desde su introducción a la comercialización en la década de 1960 (Robertson, 1967), la teoría de difusión de la innovación ha contribuido enormemente para

⁸⁰ Las perturbaciones sobre la demanda siguen un movimiento browniano geométrico.

entender el comportamiento del consumidor y poder desarrollar una eficiente gestión de marketing. Diversos autores han contribuido al desarrollo de modelos analíticos que describen la difusión de una innovación en un mercado. El impulso principal que subyace a estas contribuciones es un modelo de producto nuevo crecimiento propuesto por Bass (1969). El mismo se ha utilizado para la previsión de difusión de la innovación en diferentes mercados (entre los cuales se encuentra el farmacéutico) (Dodds, 1973).

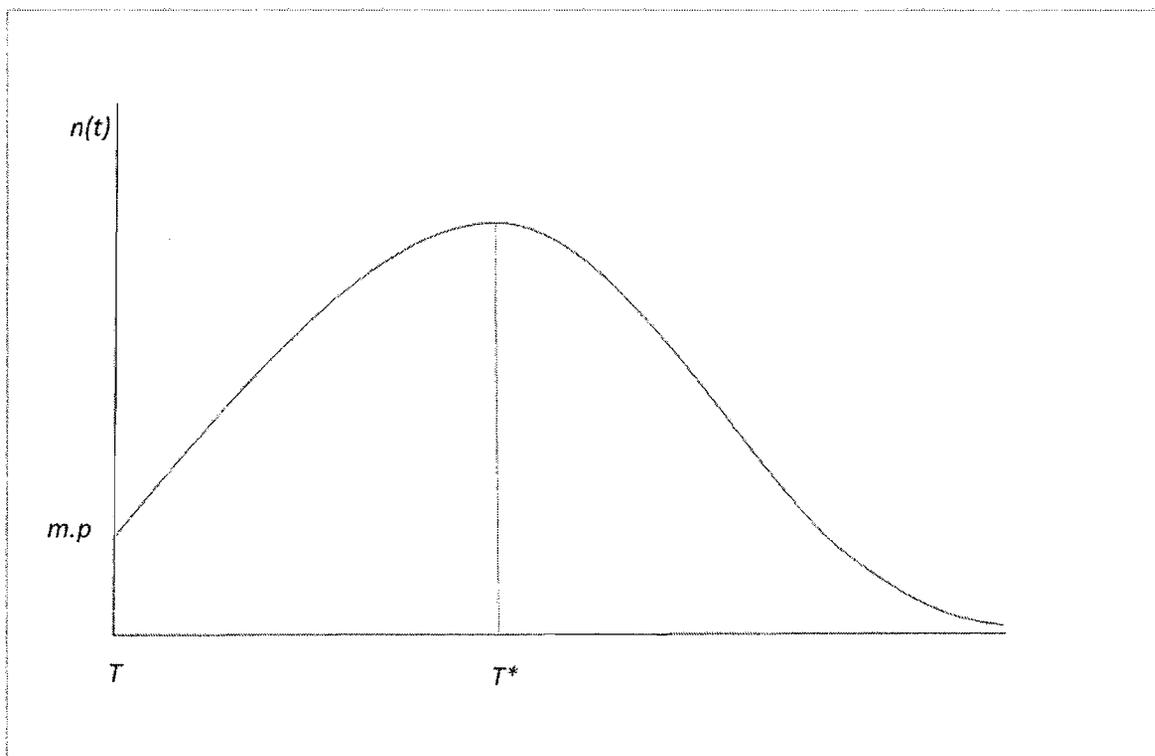
El modelo de Bass asume que los compradores de un producto innovador se ven influidos tanto por los medios masivos como por la comunicación boca a boca. Formalmente, se asume que los compradores constituyen dos grupos claramente diferentes: los innovadores y los imitadores. El modelo conceptual asume que los innovadores están presentes en cualquier etapa del proceso de difusión. La distribución supone una compra inicial fija y desde ahí crece hasta un punto máximo desde donde desciende.

Siguiendo a Bass, el volumen de ventas (n) inicial es igual al total esperado (m) por un coeficiente que representa la tasa de adopción independiente (p). Luego crece debido a la adopción por imitación hasta llegar a un máximo en el momento del fin de la patente T^* , a partir de ahí decrece. Para calcular el parámetro (q) del modelo de Bass se utiliza la expresión que vincula el vencimiento de la patente con los parámetros del mismo:

$$T^* - T = -\frac{1}{p + q} \ln\left(\frac{p}{q}\right) \quad (4.16)$$

Por lo que, a partir de los valores de m , p y T^* se obtiene q y se puede escribir entonces el proceso del volumen de ventas como:

$$n(t) = m \left[\frac{p(p + q)^2 e^{-(p+q)(t-T)}}{(p + q e^{-(p+q)(t-T)})^2} \right] \quad (4.17)$$



4.8. Ciclo de vida

Estrategia de precios

Siguiendo a Shlomo Kalish (1983), se asume que el productor utiliza la estrategia de precios *market-skimming*. El precio decrece con el tiempo. Durante la vigencia de la patente se coloca un precio alto debido al poder monopolístico que contempla la demanda. Frente a la caducidad de la patente, el mercado es en competencia, por lo que el productor se ve forzado a reducir su precio.

Por simplicidad se asume al precio de monopolio como un valor fijo durante la vigencia de la patente (P^M) que impactará negativamente sobre el total de ventas durante el ciclo de vida $m(P^M)$. De forma que:

$$m'(P^M) < 0$$

Una vez vencido el plazo de vigencia de la patente, el mercado entra lentamente en competencia y el precio comienza a descender tendiendo asintóticamente a cero:

$$P(t) = \begin{cases} P^M & T < t \leq T^* \\ P^M(1 - e^{\xi(T^*-t)}) & t > T^* \end{cases}$$

Donde $\xi > 0$ es la velocidad con que el precio se acerca a cero, pues:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\xi P^M e^{\xi(T^*-t)} \quad t > T^*$$

Asimismo se asume que el total de ventas depende inversamente del precio durante el monopolio. De forma que el volumen de ventas al momento t está ahora descrito por:

$$n(t, P^M) = m(P^M) \left[\frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)(t-T)}}{(p+q e^{-(p+q)(t-T)})^2} \right]$$

Con estas fórmulas, se puede deducir que el beneficio neto por unidad de tiempo viene dado por:

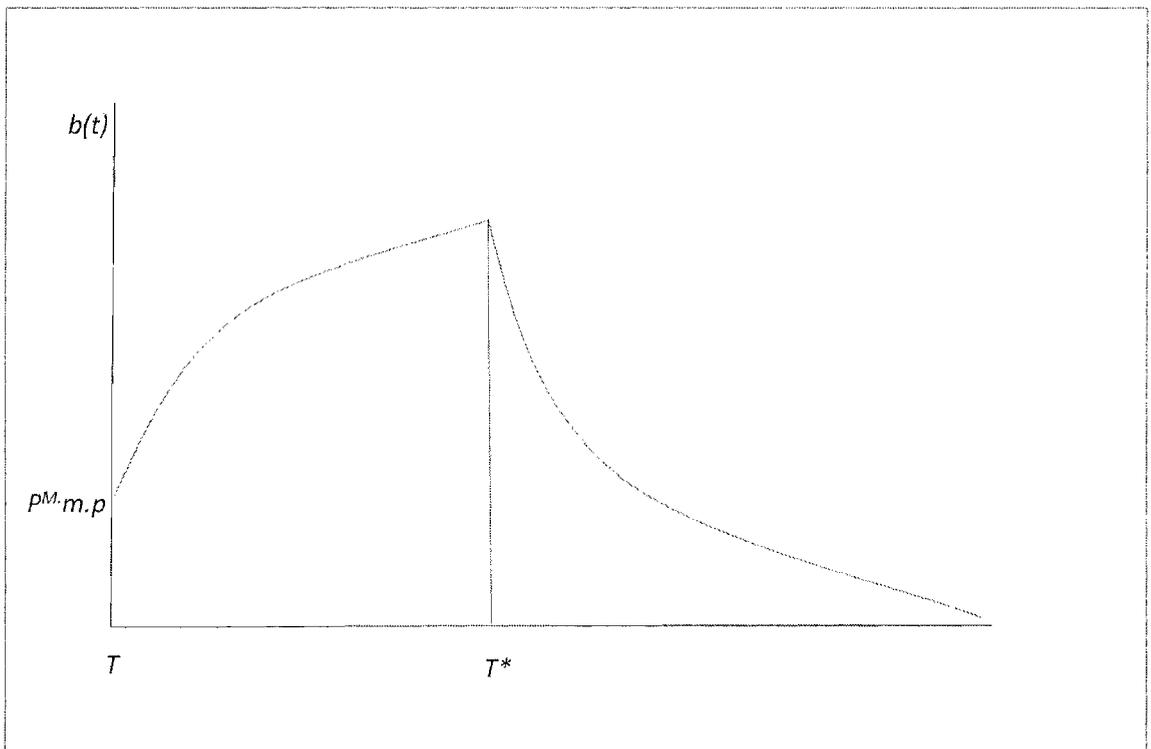
$$b(t, P^M) = (P(t) - c_V) * n(t, P^M) - C_F \quad t > T \quad (4.18)$$

donde

c_V : Costo unitario variable por unidad producida

C_F : Costo fijo de producción por unidad de tiempo

Condición final: $\lim_{t \rightarrow \infty} b(t, P^M) = 0$



4.9. Beneficio neto en función del tiempo

El valor presente del beneficio neto futuro al momento T es:

$$VPB(T) = \int_T^{\infty} b(t, P^M) \cdot e^{-rt} dt \quad (4.19)$$

4.4.4 Precio de monopolio esperado

Si bien el beneficio comenzará a ser percibido una vez finalizado el desarrollo, la necesidad de una valuación al momento inicial obliga a estimar el precio que podrán imponer en monopolio durante la vigencia de la patente. Este precio es tal que maximiza el valor presente del flujo neto futuro proveniente de un ciclo de vida del producto en cuestión, sujeto a condiciones de mercado (especialmente oferta y regulación) en un contexto monopólico.

El proceso de precios mencionado evoluciona durante el desarrollo del producto, a medida que la inversión avanza y aparece nueva información del mercado futuro. Se asume que sigue un movimiento browniano geométrico (Schwartz, 2004):

$$dP^M(t) = \alpha_P P^M(t)dt + \sigma_P P^M(t)dw_P \quad (0 \leq t < T)$$

El primer término representa la tendencia del proceso y el segundo su incertidumbre. En particular, dw_P representa un incremento de un proceso browniano estándar correlacionado con el portafolio de mercado y con la incertidumbre del costo esperado para completar el proyecto. Para observar los efectos de valoración ante un riesgo neutral se utilizará el concepto de prima de riesgo, por lo que el proceso neutral al riesgo del precio del producto es (Schwartz, 2004):

$$dP^M(t) = \alpha_P^* P^M(t)dt + \sigma_P P^M(t)dw_P \quad (0 \leq t < T)$$

$$\text{donde } \alpha_P^* = \alpha_P - u$$

4.4.5 Algoritmo iterativo de solución del modelo⁸¹

El procedimiento utiliza inducción retrospectiva y se realiza por simulación siguiendo los lineamientos del trabajo de Longstaff y Schwartz (2001) presentado en el capítulo anterior de este trabajo.

4.4.5.1 Caminos de simulación y las variables de estado

Primeramente se simulan M caminos independientes de las variables de estado: $j = 1 \dots M$. Cada uno de estos caminos tiene $n+1$ nodos: $i = 0 \dots n$, uno por cada etapa del proyecto. El nodo $i = 0$, corresponde a la decisión inicial de invertir en el proyecto; los $i: 0 < i < n$ corresponden a momentos de decisión previos a las correspondientes etapas y por último, $i = n + 1$ denota la decisión de invertir en llevar a escala comercial el producto terminado.

Partiendo de los valores iniciales de los costos remanentes $c_i(0)$ y simulando los procesos correspondientes, se obtiene para cada camino “ j ” los siguientes valores:

t_j^i	instancia de la variable aleatoria “momento en que se termina la etapa “ i ” simulada en el camino “ j ”
$c_j^i(t_j^{i-1})$	Costo remanente al comienzo de la etapa “ i ” simulado en el camino “ j ”

4.4.5.2 Decisión de abandono en t^i

Siguiendo a Hsu y Schwartz (2008), $v(t)$ es el valor presente del proyecto previo a la decisión de abandono y $V(t)$ es el valor con la opción incluida.

$$v(t^{i-1}) = E \left[V(t^i) e^{-(r+\lambda_i)\tau_i} - \int_0^{\tau_i} I_i e^{-(r+\lambda_i)t} dt \mid c_i(t^{i-1}) \right] \quad (4.20)$$

Es una esperanza condicional en función del costo total esperado al principio de la etapa.

⁸¹ Basado en (Longstaff y Schwartz (2001) y Hsu y Schwartz (2008).

4.4.5.3 Inducción retrospectiva

Al momento de salir a vender el valor del proyecto viene dado por:

$$V(t^{n+1}) = VPB(T)$$

Para un nodo arbitrario “i” de un camino “j” se calcula un punto de la esperanza condicional previamente mencionada:

$$\tilde{v}(t_j^{i-1}) = E \left[V(t_j^i) e^{-(r+\lambda_i)(t_j^i - t_j^{i-1})} - \int_0^{(t_j^i - t_j^{i-1})} I_i e^{-(r+\lambda_i)t} dt \right] \quad (4.21)$$

Para construir una función que estime $v(t^{i-1})$, se realiza una regresión del conjunto de valores $\tilde{v}(t_j^{i-1})$ sobre un conjunto de funciones elementales de la variable de estado $c_j^i(t_j^{i-1})$

Mediante la regresión se obtienen los parámetros y podemos entonces contar con la función estimada $\hat{v}(c_j^i(t_j^{i-1}))$ que permite calcular para cada camino el valor del proyecto sabiendo el costo remanente al comienzo de la etapa.

La regla de decisión es entonces: Continuar (realizar la inversión requerida en la siguiente etapa “i” si: $\hat{v}(c_j^i(t_j^{i-1})) > 0$, en caso contrario abandonar el proyecto. Esto se realiza en todas las etapas en forma retrospectiva.

4.4.5.4 Valor del proyecto en $t = 0$

Una vez definidas las reglas de decisión (continuar o abandonar) para cada nodo, es posible evaluar el valor del proyecto de I + D.

Cada camino es un flujo de ingresos y egresos futuros que deberá ser descontado hasta llegar al momento cero. Se recorre desde la decisión de abandono (o desde el nodo final), descontando hasta llegar al inicio el valor del proyecto y se le resta las inversiones realizadas para llegar al nodo en cuestión. De forma que se cuenta con n instancias del valor inicial del proyecto, conformando una distribución discreta del mismo.

4.4.6 Impacto de los subsidios gubernamentales

4.4.6.1 Pull

La presencia de un subsidio “Pull” por parte del gobierno que aporte una fracción $0 \leq \eta \leq 1$ de la inversión total necesaria de la etapa “i”, permite que la privada se vea reducida a $\bar{I}_i = (1 - \eta)I_i$.

En función de la inversión privada (\bar{I}_i), el costo remanente para terminar la etapa “i” de I+D sigue ahora un proceso estocástico determinado por:

$$dc_i(t) = -A dt + \sigma_i \sqrt{Ac_i(t)} dz_i + \gamma c_i(t) dy \quad (4.22)$$

$$\text{donde } A = \begin{cases} 0 & t < t^{i-1} \\ -\frac{\bar{I}_i}{(1-\eta)} & t^{i-1} \leq t \leq t^i \end{cases}$$

4.4.6.2 Push

El gobierno se compromete a comprar una cantidad n^G a un precio P^G . Esta acción por un lado otorga un flujo de efectivo a la compañía, pero reduce su venta futura. Por simplicidad asumimos que esa compra se realiza en T , un instante después de instalada la fábrica. Esto impulsa a la empresa que logra un producto exitoso, pues ve reducido el costo de instalación.

Formalmente, se modifica el valor presente del beneficio neto futuro al momento T que ahora es:

$$VPB(T) = \int_T^\infty b(t, P^M) \cdot e^{-rt} dt + (P^G - c_V) n^G \quad (4.23)$$

Sin embargo, este subsidio tiene un efecto negativo para la rentabilidad empresaria. La venta futura esperada (m) se ve reducida, pues parte de la demanda potencial ha sido satisfecha por la compra gubernamental. Afectando el ciclo de vida del producto final, en particular el parámetro “ m ” que ahora está dado por:

$$m^* = m - \psi n^G, \quad 0 \leq \psi \leq 1$$

Conclusión

Este capítulo ha destacado dos características fundamentales de las inversiones en tecnología: su carácter estratégico e incierto. Además, se ha analizado como abordar estas problemáticas desde una metodología de opciones reales. En particular se ha mostrado como una patente tecnológica crea una oportunidad de inversión irreversible, que puede o no realizarse y puede ser interpretada como una opción de compra americana.

Ahora bien, para el desarrollo de una patente tecnológica es necesario realizar previamente tareas de investigación y desarrollo. Se ha presentado la valuación de estos proyectos dando cuenta de múltiples fuentes de incertidumbre y del proceso de aprendizaje involucrado. Cada etapa del desarrollo se ha modelizado sujeta a factores exógenos, tales como catástrofes técnicas, económicas o políticas que ponen en riesgo la terminación del proyecto en cuestión.

En línea con el objetivo del presente trabajo, luego se ha analizado la valuación de proyectos en la industria farmacéutica que se constituyen en el modelo base para construir un modelo de valuación de proyectos en nanomedicina. El modelo propuesto se divide en etapas y da cuenta de las incertidumbres en los costos y en los futuros ingresos. Asimismo, se ha presentado un enfoque discreto de simulación para determinar el valor de un proyecto en I+D, utilizando la metodología de opciones reales. Se asume un contexto incierto donde variables claves de la valuación son estocásticas y se contempla la decisión estratégica de abandono cuando los costos sean mayores a los esperados o cuando el flujo de efectivo estimado sea menor al esperado.

A continuación, se ha desarrollado un modelo que analiza la interacción comercial entre una empresa especializada en desarrollo de patentes nano y una farmacéutica con llegada al mercado global de medicamentos. La primera empresa desarrolla la investigación base y realiza los testeos *In vitro/in vivo* para lograr el patentamiento y la segunda tiene la capacidad de producir en forma global el producto a comercializar. Esta interacción se modeliza utilizando teoría de juegos, y la valuación del proyecto conjunto se realiza mediante opciones reales.

El análisis concluye que, mientras el proyecto conjunto sea rentable, la empresa Nanotecnológica se comprometerá. Para que esto ocurra, la participación debe mayor que un determinado valor, en particular ($\alpha \geq \alpha^d$). La empresa farmacéutica lo hará si $\alpha \leq \alpha^u$; por lo que la inversión será exitosa si $\alpha \in [[\alpha^d, \alpha^u]]$. Asumiendo que la farmacéutica tiene mayor poder de negociación, podría imponer un $\alpha = \alpha^d$ y maximizar su rentabilidad. Ahora bien, si presiona en exceso forzando un $\alpha < \alpha^d$, la inversión no tendrá lugar (Nanotech se retira al no satisfacer su restricción).

Luego de plantear la problemática de valuación de inversiones en el mercado, el capítulo se vuelca a analizar el rol gubernamental. En primer lugar se operacionaliza, por medio de la metodología de opciones reales, el principio precautorio a los fines de contar con un instrumento de toma de decisiones públicas. Se han articulado técnicas de evaluación de riesgos, el análisis costo-beneficio de proyectos y la valuación de inversiones irreversibles bajo incertidumbre. De esta forma se ha presentado un modelo que cuantifica, frente a la posibilidad de llevar adelante un proyecto de I+D, el valor social de la “precaución”. La propuesta es evaluar socialmente si realizar un proyecto determinado ahora es óptimo o es preferible esperar, llevando a la práctica gubernamental lo que la literatura de riesgos denomina “principio precautorio”. El gobierno evalúa los beneficios netos analizando los beneficios sociales esperados pero contemplando los riesgos que, para la sociedad, conlleva permitir la innovación. El umbral de decisión planteado es más prudente que el tradicional donde se requiere solamente que el valor presente de los beneficios netos sea igual al costo social irreversible del proyecto ($B=C$). Es más, se aconseja demorar los proyectos hasta que los beneficios superen significativamente los costos, de forma de contemplar el aspecto irreversible de los costos y la posibilidad de que el beneficio neto que actualmente se observa del proyecto sea fruto de una situación inusualmente optimista.

A continuación se ha analizado la intervención del estado en el mercado, por medio de subsidios a empresas. Estos subsidios pueden otorgarse al comienzo del proyecto (push) o ser una promesa en caso de finalizar exitosamente el mismo (pull). Se concluye que los programas de subvenciones *pull* son más efectivos

porque eliminan en gran medida los problemas de agencia entre el promotor y el desarrollador. Sin embargo su uso excesivo puede provocar desincentivos en investigación y desarrollo innovadores. Dentro de las políticas *pull*, la extensión de patentes es la más utilizado. Esto produce en los países subdesarrollados un aumento del incentivo empresarial para llevar a cabo investigaciones sobre enfermedades específicas de los países en desarrollo. El problema de estos incentivos es que pueden terminar creando monopolios. Por otro lado, dentro de las alternativas *pull*, algunos gobiernos prefieren optar por un plan de subsidio a los precios o directamente un compromiso de compra de una determinada cantidad. Se puede combinar los contratos de compra con compromiso de subsidio de costo compartido para crear contratos híbridos, los cuales combinan los atributos positivos de ambos tipos de subvenciones. Se concluye que los contratos híbridos son preferibles a los contratos de compra compromiso que a su vez son preferibles a los contratos de subvención de costos compartidos.

En la parte final del capítulo se articula todo lo expuesto en un modelo de valuación. Los proyectos de inversión en nanomedicina son procesos de inversión secuenciales en donde se permite abandonar en cualquier momento que se requiera una nueva inversión. La regla de decisión es: realiza la inversión subsiguiente si el valor presente del proyecto esperado es mayor que la inversión necesaria en la etapa.

Conclusión

La presente tesis elaboró una propuesta de modelo de valuación de proyectos de inversión en el mercado nanotecnológico contemplando su dinámica científica, su dinámica industrial y su regulación. Para ello, el primer capítulo analizó cómo la práctica tecnocientífica, la industria y la sociedad interactúan, conformando un mercado donde se constituyen nuevos riesgos y beneficios. En el segundo capítulo, se analizó el papel del marco regulatorio en la constitución del mercado nanotecnocientífico, extendiendo el enfoque tradicional de equilibrio económico e incorporando los intereses sociales y ambientales. Esto permite empezar a recorrer un camino hacia una nanogobernanza sustentable económica y socialmente. El tercer capítulo examinó la literatura sobre valuación de inversiones, con especial énfasis en la problemática de los contextos inciertos, donde las decisiones son estratégicas y las inversiones son irreversibles. El último capítulo, en base a lo anterior, elaboró un modelo de valuación de proyectos en el mercado nanotecnológico de inversiones que contempla las distintas etapas de investigación y desarrollo, la incertidumbre del mercado debido a la tecnología, y las regulaciones e incentivos gubernamentales.

En el primer capítulo se realizaron dos aportes al analizar la práctica nanotecnocientífica. En primer lugar, se propuso utilizar la teoría del Actor-Red para analizar el proceso de formación y la dinámica de la práctica nanotecnocientífica⁸². Los investigadores nano no tienen como objetivo encontrar una teoría sobre la realidad nano, sino que se trabaja dentro de un contexto complejo situado entre la teoría física clásica y la cuántica, donde se busca construir artefactos mediante un uso ecléctico de varias teorías. Se trata de una forma ingenieril de hacer ciencia que busca producir innovaciones sin una preocupación ontológica o epistemológica. Asimismo, los investigadores provienen de diferentes formaciones básicas, por lo que, habitualmente, difieren en qué teorías utilizan para trabajar, pero todos coinciden en qué instrumentos y qué programas de computadoras utilizan. Estos artefactos se transforman en los referentes comunes en la comunidad y adquieren gran importancia en la dinámica

⁸² Siguiendo a Nordmann (2006) se utilizó el concepto “Nanotecnociencia” para dar cuenta de un modo de investigación en el cual confluyen lo científico y lo técnico.

de la propia práctica. Esta interacción entre agentes humanos, una teoría ecléctica, materiales y artefactos se constituye como práctica.

En segundo lugar, y utilizando el concepto de mercado en proceso de formación presentado por Callon (2009) para el mercado del carbono, se realizó un análisis del mercado nano y como éste interactúa con su práctica científica. Conocer el proceso de constitución del mercado nanotecnológico puede permitir una mejor información tanto para los futuros inversores como para el gobierno que, buscando maximizar el beneficio social, debe regularlo. Para entender el mercado, en lugar de utilizar como punto de partida la idea abstracta del mismo como una macro-estructura dada, se describieron y analizaron las transacciones concretas. En particular se describió el proceso de objetivación como bien transable de los nanotransportadores (y sus respectivas patentes).

El segundo capítulo analizó la gobernanza de las innovaciones nanotecnológicas y realizó dos aportes a la presente tesis. En primer lugar, se examinó como el riesgo nanotecnológico es co-constituido con su práctica y su mercado (por lo tanto manufacturado). Particularmente, se analizaron los riesgos de la nanotecnología para el ser humano y para el medio ambiente. Asimismo, y con el fin de caracterizar el proceso de evaluación de riesgos que se lleva a cabo, actualmente, en diversas empresas del sector nano y que cuenta con la aprobación gubernamental (y de las compañías de seguros), se analizaron los riesgos asociados con el proceso de producción de cinco nanomateriales. Se concluye que esta gestión de riesgos corporativa no es suficiente para contemplar lo social y lo ambiental.

En segundo lugar, se examinó la regulación de facto existente en muchos países, donde los técnicos controlan la gestión de los riesgos, deja de lado toda práctica participativa⁸³. Frente a esta realidad, y luego de realizar un análisis crítico de las doctrinas de regulación tecnocientíficas norte-americana y europea, se argumentó que, para que el modelo técnico de evaluación y gestión de estos riesgos nanotecnológicos se reconcilie con los valores democráticos, es fundamental incorporar el principio precautorio y la participación ciudadana en la

⁸³ Es más, en muchos países se construye un discurso que transforma, narrativamente, los riesgos potenciales en “oportunidades” de negocios.

gestión de los mismos. De forma de, superando la perspectiva de equilibrio económico, contemplar la interacción entre los especialistas, los agentes del mercado, los gobiernos, y el público general.

El tercer capítulo analizó la valuación de proyectos de inversión innovadores y realizó dos aportes al presente trabajo. En primer lugar, propuso utilizar la metodología de opciones reales como herramienta indispensable para la valuación de proyectos de inversión nano. Si bien los métodos tradicionales de valuación son fáciles de aplicar, tienen la desventaja de no reflejar la complejidad de los fenómenos sociales y económicos implicados en las inversiones nano. Frente a estas limitaciones, esta tesis propuso utilizar la teoría de opciones reales para valorar estos proyectos, la cual permite realizar una valoración efectiva de las opciones de inversión en contextos donde hay irreversibilidad, incertidumbre, y las decisiones son estratégicas, permitiendo reconocer flexibilidades.

En segundo lugar, se ha remarcado el rol del aprendizaje en estos proyectos innovadores, pues al realizar erogaciones de dinero se logra aprender y bajar la incertidumbre. En los proyectos nano, la inversión es secuencial. La erogación realizada en las primeras etapas permite recopilar información, añadiendo valor, pues aumenta la información al momento de decidir la continuación en una etapa futura. De forma que, aunque a priori el valor actual neto de todo el proyecto sea negativo, puede ser conveniente invertir en las primeras etapas para bajar la incertidumbre y lograr un proyecto rentable futuro.

El cuarto capítulo analizó las técnicas de valuación de proyectos nanotecnológicos realizando tres aportes a la tesis. En primer lugar, se detalló como una patente tecnológica crea una oportunidad de inversión irreversible que puede o no realizarse, y puede ser interpretada como una opción de compra americana. Asimismo, se explicitó como cada etapa del desarrollo del proyecto de inversión está sujeta a riesgos endógenos, tales como incertidumbre técnica y a riesgos exógenos, tales como catástrofes económicas o políticas.

En segundo lugar, y siendo el aporte más sustantivo de la presente tesis, se construyó un modelo de valuación de inversiones en el mercado de nanomedicina que supera la mera formulación ingenieril o económica, incluyendo aspectos

sociales y ambientales en coordinación con políticas gubernamentales de regulación.

En otras palabras, este modelo integrado de valuación de proyectos en nanomedicina contempla el contexto de gobernanza sustentable expuesto en el segundo capítulo, se divide en etapas y da cuenta de las incertidumbres en los costos y en los futuros ingresos. Se asume un contexto incierto donde variables claves de la valuación son estocásticas, tales como el costo para finalizar cada etapa, los flujos de efectivo futuros y la posibilidad de que un evento adverso (técnico, económico, legal o político) se interponga en la posibilidad de no finalizar el proyecto. Se contempla la decisión estratégica de abandono cuando los costos sean mayores a los esperados o cuando el flujo de efectivo estimado sea menor al esperado.

En tercer lugar, se incorporó el rol del gobierno en el modelo integrado propuesto. Para ello, se operacionalizó el principio precautorio a los fines de contar con un instrumento de toma de decisiones públicas; y se analizaron las alternativas de intervención estatal en el mercado. Estos subsidios a empresas pueden otorgarse al comienzo del proyecto (*push*) o ser una promesa en caso de finalizar exitosamente el mismo (*pull*). Se concluye que la mejor política de estímulo gubernamental son los contratos híbridos (de *Pull* y *Push*), pues permiten obtener, socialmente, lo mejor de cada una de las alternativas.

Existen diferentes líneas de investigación y trabajo futura posibles. En primer término, es importante realizar estudios cualitativos de casos para entender cómo se constituyen las empresas en el sector y como es su negocio. En segundo término, es significativo analizar en detalle los riesgos nanotecnológicos y el rol de las compañías de seguro. En tercer lugar, resulta fundamental examinar las políticas públicas de diferentes países para aprender a la hora de proponer un nuevo marco. En cuarto lugar, y desde un punto de vista técnico, es relevante incorporar al modelo la posibilidad de valuar empresas que cuenten con más de un producto en proceso. En quinto lugar, y desde un punto de vista práctico, sería útil contar con un aplicativo informático que permita que el modelo propuesto pueda ser utilizado por los agentes del mercado y por el gobierno.

Referencias

- Abel, AB (1983), 'Optimal investment under uncertainty', *The American Economic Review*, vol. 73, no. 1, pp. 228-33.
- (1984), 'The effects of uncertainty on investment and the expected long-run capital stock', *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 7, no. 1, pp. 39-53.
- (2002), *The effects of a baby boom on stock prices and capital accumulation in the presence of social security*, National Bureau of Economic Research Cambridge, Mass., USA.
- Abel, AB y Eberly, JC (1995), *A unified model of investment under uncertainty*, National Bureau of Economic Research Cambridge, Mass., USA.
- (1999), 'The effects of irreversibility and uncertainty on capital accumulation', *Journal of Monetary Economics*, vol. 44, no. 3, pp. 339-77.
- Abernathy Kim, B y William, J (1985), 'Innovation: Mapping the winds of creative destruction', *Research policy*, vol. 14, no. 1, pp. 3-22.
- Abernathy, WJ y Utterback, JM (1978), 'Patterns of industrial innovation', *Technology review*, vol. 80, no. 7, pp. 40-7.
- Adam, B y Van Loon, J (2000), 'Introduction: repositioning risk; the challenge for social theory', en B Adam, U Beck y J Van Loon (eds), *The risk society and beyond: critical issues for social theory*, Sage, London, pp. 1-31.
- Arnall, AH (2003), 'Future Technologies, Today's Choices: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies', *B. Greenpeace Environmental Trust*, vol. 69.
- Arrow, K (1963), 'Uncertainty and the welfare economics of health care', *American Economic Review*, vol. 53, no. 5, pp. 940-73.
- Ayres, I y Braithwaite, J (1992), *Responsive Regulation: Transcending the Deregulation Debate*, Oxford University Press, USA.
- Barrett, S y Brunk, C (2001), 'Elements of Precaution: Recommendations for the Regulation of Food Biotechnology in Canada', *The Royal Society of Canada, Ottawa*, vol. 245.
- Barrow, JD (1999), *Impossibility: The limits of science and the science of limits*, Oxford University Press, USA.

- Barry, A y Slater, D (2002), 'Technology, politics and the market: an interview with Michel Callon', *Economy and Society*, vol. 31, no. 2, pp. 285-306.
- Bass, F. (1969). A new product growth model for consumer durables', *Management Science*, vol. 15, no. 5, pp. 215-27.
- Bass, FM (2004), 'Comments on" A New Product Growth for Model Consumer Durables": The Bass Model', *Management science*, vol. 50, no. 12, pp. 1833-40.
- Bastani, B, Mintarno, E, Akers, J y Fernandez, D (2004), 'Technology Transfer in Nanotechnology: Licensing Intellectual Property from Universities to Industry', *Nanotechnology Law & Business*, vol. 1, p. 166.
- Bawa, R (2007), 'Patents and nanomedicine', *Nanomedicine*, vol. 2, no. 3, pp. 351-74.
- Bawarski, WE, Chidlowsky, E, Bharali, DJ y Mousa, SA (2008), 'Emerging nanopharmaceuticals', *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, vol. 4, no. 4, pp. 273-82.
- Beck, U (1992), *Risk Society: Towards a New Modernity*, Sage.
- (1995), *Ecological politics in an age of risk*, Polity Press, Cambridge, UK.
- (1999), *World risk society*, Blackwell Malden, MA.
- (2000), *What is globalization?*, Polity.
- (2006), 'Risk society revisited', *The Sociology of Risk And Gambling Reader*, p. 61.
- Belting, H (1994), *Likeness and Presence: A History of the Image before the Era of Art*, University Of Chicago Press.
- Benhabib, S (1986), *Critique, norm, and utopia: A study of the foundations of critical theory*, Columbia University Press.
- (2002), *The claims of culture: Equality and diversity in the global era*, Princeton University Press.
- Bernanke, BS (1983), 'Irreversibility, uncertainty, and cyclical investment', *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 98, no. 1, p. 85.
- Bhattacharya, A (2007), 'Nano-Manufacturing: Government and Firm Incentives', *Nanotechnology Law & Business*, vol. 4, no. 2, p. 199.
- Bijker, WE y Law, J (1992), *Shaping Technology/building Society: Studies in Sociotechnical Change*, Mit Press.
- Black, F y Scholes, M (1973a), 'The pricing of options and corporate liabilities', *The Journal of Political Economy*, vol. 81, no. 3, pp. 637-54.

- (1973b), 'The pricing of options and corporate liabilities', *Journal of political economy*, vol. 81, no. 3.
- Bloom, N (2009), 'The impact of uncertainty shocks', *Econometrica*, vol. 77, no. 3, pp. 623-85.
- Bloom, N, Bond, S y Van Reenen, J (2007), 'Uncertainty and investment dynamics', *Review of Economic Studies*, vol. 74, no. 2, pp. 391-415.
- Bloor, D (1999), 'Anti-Latour', *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 30, no. 1, pp. 81-112.
- Boer, FP (2000), 'Valuation of technology using" real options"', *Research-Technology Management*, vol. 43, no. 4, pp. 26-30.
- Bokulich, A (2006), 'Heisenberg Meets Kuhn: Closed Theories and Paradigms*', *Philosophy of Science*, vol. 73, no. 1, pp. 90-107.
- Bonaccorsi, A (2008), 'Search regimes and the industrial dynamics of science', *Minerva*, vol. 46, no. 3, pp. 285-315.
- Borup, M, Brown, N, Konrad, K y Van Lente, H (2006), 'The sociology of expectations in science and technology', *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 18, no. 3, pp. 285 - 98.
- Bourdieu, P (2005), *The social structures of the economy*, Polity Pr.
- Bowman, DM y Hodge, GA (2006), 'Nanotechnology: Mapping the wild regulatory frontier', *Futures*, vol. 38, no. 9, pp. 1060-73.
- Bozeman, B, Larédo, P y Mangematin, V (2007), 'Understanding the emergence and deployment of “nano” S&T', *Research Policy*, vol. 36, no. 6, pp. 807-12.
- Brennan, MJ y Schwartz, ES (1985), 'Evaluating natural resource investments', *The Journal of Business*, vol. 58, no. 2, pp. 135-57.
- Broadie, M y Glasserman, P (2004), 'A stochastic mesh method for pricing high-dimensional American options', *Journal of Computational Finance*, vol. 7, pp. 35-72.
- Buchwald, JZ (1995), *Scientific practice: theories and stories of doing physics*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Bueno, O (2004), 'Von Neumann, Self-Reproduction and the Constitution of Nanophenomena', in D Baird, A Nordmann y J Shummer (eds), *Discovering The Nanoscale*, IOS Press, Amsterdam, pp. pp.101-15.
- Bulow, J y Roberts, J (1989), 'The simple economics of optimal auctions', *The Journal of Political Economy*, vol. 97, no. 5, pp. 1060-90.
- Burlando, RM y Guala, F (2005), 'Heterogeneous agents in public goods experiments', *Experimental Economics*, vol. 8, no. 1, pp. 35-54.

- Burmeister, E (1980), *Capital theory and dynamics*, Cambridge University Press.
- Caballero, RJ (1991), 'On the sign of the investment-uncertainty relationship', *The American Economic Review*, vol. 81, no. 1, pp. 279-88.
- Çalışkan, K y Callon, M (2010), 'Economization, part 2: a research programme for the study of markets', *Economy and Society*, vol. 39, no. 1, pp. 1-32.
- Callon, M (1986), 'Some elements of a sociology of translation: domestication of the scallops and the fishermen of StBrieuc Bay', *Power, Action and Belief: A New Sociology of Knowledge*, vol. 32, pp. 196–233.
- (1998), *The law of the markets*, Oxford: Blackwell.
- (1999a), 'Actor-network theory—the market test', *Actor Network Theory and After*.
- (1999b), 'Actor-Network Theory: The Market Test', in J Law y J Hassard (eds), *Actor Network Theory and After*, pp. 181-95.
- (2009), 'Civilizing markets: Carbon trading between in vitro and in vivo experiments', *Accounting, Organizations and Society*, vol. 34, no. 3-4, pp. 535-48.
- Callon, M, Lascoumes, P y Barthe, Y (2001), *Agir dans un monde incertain: essai sur la démocratie technique*, Seuil, Paris.
- Callon, M y Latour, B (1992), 'Don't throw the baby out with the Bath school! A reply to Collins and Yearley', in A Pickering (ed.), Chicago: Chicago University Press, pp. pp.343-68.
- Callon, M y Law, J (1997), 'After the individual in society: Lessons on collectivity from science, technology and society', *Canadian Journal of Sociology/Cahiers canadiens de sociologie*, vol. 22, no. 2, pp. 165-82.
- (2005), 'On qualculation, agency, and otherness', *Environment and Planning D*, vol. 23, no. 5, p. 717.
- Callon, M y Muniesa, F (2003), 'Les marchés économiques comme dispositifs collectifs de calcul', *Réseaux*, vol. 122, no. 2003/6, pp. 189-233.
- (2005), 'Peripheral Vision Economic Markets as Calculative Collective Devices', *Studies*, vol. 26, no. 8, pp. 1229-50.
- Carriere, J (1996), 'Valuation of the early-exercise price for options using simulations and nonparametric regression', *Insurance: mathematics and Economics*, vol. 19, no. 1, pp. 19-30.
- Cartwright, N (2007), *Hunting causes and using them: approaches in philosophy and economics*, Cambridge Univ Pr.
- Castel, R (1991), 'From dangerousness to risk', in G. Burchell, C Gordon y P Miller (eds), *The Foucault Effect: Studies in Governmentality*, Harvester Wheatsheaf, London, pp. 281-98.

- Casti, JL y Karlqvist, A (1996), *Boundaries and barriers: on the limits to scientific knowledge*, Addison-Wesley.
- Clément, E, Lamberton, D y Protter, P (2002), 'An analysis of the Longstaff-Schwartz algorithm for American option pricing', *Finance and Stochastics*, vol. 6, no. 4, p. 449—71.
- Colvin, VL (2003), 'The potential environmental impact of engineered nanomaterials', *Nature Biotechnology*, vol. 21, no. 10, pp. 1166-70.
- Collins, HM (1974), 'The TEA Set: Tacit Knowledge and Scientific Networks', *Science Studies*, vol. 4, no. 2, pp. 165-86.
- Cooley, TF y LeRoy, SF (1985), 'Atheoretical macroeconometrics: a critique', *Journal of Monetary Economics*, vol. 16, no. 3, pp. 283-308.
- Cournot, AA (1838), *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses/par Augustin Cournot*, L. Hachette.
- Crichton, M (2002), *Prey*, HarperCollins.
- Cui, D, Tian, F, Ozkan, CS, Wang, M y Gao, H (2005), 'Effect of single wall carbon nanotubes on human HEK293 cells', *Toxicol.Lett.*, vol. 155, pp. 73-85.
- Chamberlin, EH (1948), 'An experimental imperfect market', *The Journal of Political Economy*, vol. 56, no. 2, pp. 95-108.
- Chan, VSW (2006), 'Nanomedicine: an unresolved regulatory issue', *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 46, no. 3, pp. 218-24.
- Chen, Z, Meng, H, Xing, G, Chen, C, Zhao, Y, Jia, G, Wang, T, Yuan, H, Ye, C y Zhao, F (2006), 'Acute toxicological effects of copper nanoparticles in vivo', *Toxicology Letters*, vol. 163, no. 2, pp. 109-20.
- Chiesa, V y Chiaroni, D (2005), *Industrial clusters in biotechnology: driving forces, development processes, and management practices*, Imperial College Pr.
- Christ, CF (1994), 'The Cowles Commission's contributions to econometrics at Chicago, 1939-1955', *Journal of Economic Literature*, pp. 30-59.
- Daemmrich, AA (2004), *Pharmacopolitics: drug regulation in the United States and Germany*, The University of North Carolina Press.
- Darby, MR y Zucker, LG (2003), 'Grilichesian breakthroughs: inventions of methods of inventing and firm entry in nanotechnology', *NBER working paper W9825*.
- Davis, ME (2008), 'Nanoparticle therapeutics: an emerging treatment modality for cancer', *Nature Reviews Drug Discovery*, vol. 7, no. 9, pp. 771-82.

- Dean, M (1999), 'Risk, calculable and incalculable', in D Lupton (ed.), *Risk and Sociocultural Theory: New Directions and Perspectives*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 131-59.
- Deleuze, G y Guattari, F (1998), *A thousand plateaus: capitalism and schizophrenia*, Athlone, London.
- Dixit, A (1989), 'Entry and exit decisions under uncertainty', *The Journal of Political Economy*, vol. 97, no. 3, pp. 620-38.
- Dixit, AK y Pindyck, RS (1994), *Investment under uncertainty*, vol. 15, Princeton University Press Princeton, NJ.
- Dodds, W (1973), 'An application of the Bass model in long-term new product forecasting', *Journal of Marketing Research*, vol. 10, no. 3, pp. 308-11.
- Dorbeck-Jung, BR (2007), 'What can Prudent Public Regulators Learn from the United Kingdom Government's Nanotechnological Regulatory Activities?' *NanoEthics*, vol. 1, no. 3, pp. 257-70.
- Doubleday, R (2007), 'Risk, public engagement and reflexivity: Alternative framings of the public dimensions of nanotechnology', *Health, Risk & Society*, vol. 9, no. 2, pp. 211-27.
- Douglas, M (1966), *Purity and danger. An analysis of the concepts of pollution and danger*, London: Routledge and Kegan Paul.
- Drexler, KE (1986), *Engines of creation:[the coming era of nanotechnology]*, Doubleday/Anchor Press.
- (1992), *Nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- (2004), 'Nanotechnology: From Feynman to Funding', *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, no. 1, p. 21.
- Dupuy, JP (2007), 'Some Pitfalls in the Philosophical Foundations of Nanoethics', *Journal of Medicine & Philosophy*, vol. 32, no. 3, p. 237.
- Dupuy, JP y Grinbaum, A (2004), 'Living with Uncertainty: Toward the Ongoing Normative Assessment of Nanotechnology', *Techné*, vol. 8, pp. 4-25.
- Echeverría, J (2005), 'Gobernanza de las nanotecnologías', *Documento de Ciencia, Tecnología y Sociedad, Instituto de Filosofía, CSIC*.
- Eigler, D (1999), 'From the bottom up: building things with atoms', in GL Timp (ed.), *Nanotechnology*, Springer, pp. 425-35.
- Eigler, DM y Schweizer, EK (1990), 'Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope', *Nature*, vol. 344, no. 6266, pp. 524-6.
- Farrow, S (2004), 'Using Risk Assessment, Benefit Cost Analysis, and Real Options to Implement a Precautionary Principle', *Risk Analysis*, vol. 24, no. 3, pp. 727-35.

- Felt, U y Wynne, B (2007), 'Taking European knowledge society seriously. Report to the Expert Group on Science and Governance to the Science', *Economy and Society Directorate, Directorate-General for Research, European Commission. Brussels: European Commission.*
- Feynman, RP (1959), 'Plenty of Room at the Bottom', *Presentation to American Physical Society, Dec*, vol. 29.
- Fiorino, DJ (1989), 'Technical and Democratic Values in Risk Analysis 1', *Risk Analysis*, vol. 9, no. 3, pp. 293-9.
- (1990), 'Citizen participation and environmental risk: A survey of institutional mechanisms', *Science, Technology & Human Values*, vol. 15, no. 2, p. 226.
- Franklin, A (1986), *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press.
- Galison, P (1988), 'How Experiments End', *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 39, no. 4, pp. 411-4.
- (1997), *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*, University Of Chicago Press.
- (2006), *The Pyramid and the Ring*, Lecture at Brookhaven Lab on the History of Physics, Harvard University, US, November 3. Disponible en <http://publicuniversityonline.com/RecordResourceDownload.ashx?LectureId=40875669-86ce-4f36-83de-99065ebc68cf&resource=http://real.bnl.gov/ramgen/bnl/galison2.rm>.
- Ghannadian, FF y Goswami, G (2004), 'Developing economy banking: the case of Islamic banks', *International Journal of Social Economics*, vol. 31, no. 8, pp. 740-52.
- Glasserman, P (2004), *Monte Carlo methods in financial engineering*, Springer Verlag.
- Gordon, C, Burchell, G y Miller, P (1991), *The Foucault effect: studies in governmentality*, Wheatsheaf, London.
- Grabowski, H y Vernon, J (1990), 'A new look at the returns and risks to pharmaceutical R&D', *Management science*, vol. 36, no. 7, pp. 804-21.
- Grabowski, H, Vernon, J y DiMasi, JA (2002), 'Returns on research and development for 1990s new drug introductions', *Pharmacoeconomics*, vol. 20, no. S3, pp. 11-29.
- Grabowski, HG y Vernon, JM (1992), 'Brand loyalty, entry, and price competition in pharmaceuticals after the 1984 Drug Act', *Journal of Law and Economics*, vol. 35, no. 2, pp. 331-50.
- (1994), 'Returns to R&D on New Drug Introductions in the 1980s', *Journal of Health Economics*, vol. 13, no. 4, pp. 383-406.

- Granger, CWJ (1990), *Modelling economic series: readings in econometric methodology*, Oxford University Press.
- Granger, CWJ y Newbold, P (2001), 'Spurious regressions in econometrics', *Essays in Econometrics: Collected Papers of Clive WJ Granger*, vol. 2, p. 109.
- Granovetter, M (1978), 'Threshold models of collective behavior', *American journal of sociology*, vol. 83, no. 6, p. 1420.
- (1985), 'Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness', *American journal of sociology*, vol. 91, no. 3, p. 481.
- Grobstein, C (1977), 'The recombinant-DNA debate', *Scientific American*, vol. 237, no. 1, pp. 22-33.
- Guala, F (2002), 'Models, simulations, and experiments', *Model-based reasoning: Science, technology, values*, pp. 59-74.
- Guatri, L (1989), 'Il differenziale fantasma: i beni immateriali nella determinazione del reddito e nella valutazione delle imprese', *Finanza, Marketing e Produzione*.
- Guesnerie, R (2006), *L'économie de marché*, Le Pommier, Paris.
- Guyer, J (2009), 'Composites, fictions and risk: Towards an ethnography of price.' in CM Hann y K Hart (eds), *Market and society The great transformation today*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Guyer, JI (2004), *Marginal gains : monetary transactions in Atlantic Africa*, The Lewis Henry Morgan lectures, University of Chicago Press, Chicago.
- Hacking, I (1983), *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press.
- (2006), *The Emergence of Probability: A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference*, Cambridge University Press.
- Hansen, SF, Maynard, A, Baun, A y Tickner, JA (2008), 'Late lessons from early warnings for nanotechnology', *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 8, pp. 444-7.
- Harré, R (2003), 'The Materiality of Instruments in a Metaphysics for Experiments', in H Radder (ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Dover Publications, pp. pp.19-38.
- Harris, DL y Graffagnini, MJ (2007), 'Nanomaterials in Medical Devices: A Snapshot of Markets, Technologies and Companies', *Nanotechnology Law & Business*, vol. 4, no. 4, p. 415.

- Harrison, J y Kreps, D (1979), 'Martingales and arbitrage in multiperiod securities markets', *Journal of economic theory*, vol. 20, no. 3, pp. 381-408.
- Hartman, R (1972), 'The effects of price and cost uncertainty on investment', *Journal of economic theory*, vol. 5, no. 2, pp. 258-66.
- He, H y Pindyck, RS (1992), 'Investments in Flexible Production Capacity', *V Journal of Economics Dynamics and Control*, vol. 16.
- Heisenberg, W (1971), *Physics and beyond: encounters and conversations*, Harper & Row, New York.
- Hennig, J (2006), 'Changes In The Design Of Scanning Tunneling Microscopic Images From 1980 To 1990', in J Schummer y D Baird (eds), *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society*, World Scientific, pp. 143-63.
- Hermerén, G (2004), 'Nano Ethics Primer', in THACPDGoTE Commission (ed.), *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop*, European Commission Community Health and Consumer Protection, Brussels 1–2 March 2004.
- Hett, AR (2004), 'Nanotechnology - From the insurers' perspective ', in THACPDGoTE Commission (ed.), *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop*, European Commission Community Health and Consumer Protection, Brussels On 1–2 March 2004.
- Hirschman, AO (1977), *The passions and the interests: Political arguments for capitalism before its triumph*, Princeton Univ Pr.
- Hoover, KD (2001), *The methodology of empirical macroeconomics*, Univ Press, Cambridge.
- Hsu, JC y Schwartz, ES (2008), 'A model of R&D valuation and the design of research incentives', *Insurance: Mathematics and Economics*, vol. 43, no. 3, pp. 350-67.
- Huisman, KJM, Kort, PM y Center for Economic Research at, A (1999), *Effects of strategic interactions on the option value of waiting*, Center for Economic Research, Tilburg University.
- Hull, J (2006), *Options, Futures. and Other Derivative Securities (6e)*, New York: Prentice-Hall. Englewood Clis.
- Hume, D, Green, TH y Grose, TH (1889), *Essays: moral, political, and literary*, Longmans, Green.
- Huw Arnall, A (2003), *Future Technologies, Today's Choices: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; a Technical, Political and Institutional Map of Emerging Technologies*, Greenpeace Environmental Trust.

- Ingersoll, JE y Ross, SA (1992), 'Waiting to invest: Investment and uncertainty', *The Journal of Business*, vol. 65, no. 1, pp. 1-29.
- Johnson, A (2006), 'The Shape Of Molecules To Come', *Sociology of the sciences*, vol. 25, p. 25.
- Joskow, PL y Pindyck, RS (1979), 'Synthetic fuels: should the government subsidize nonconventional energy supplies', *Regulation;(United States)*, vol. 3, no. 5.
- Joy, B (2000), 'Why the Future Doesn't Need Us', *Wired Magazine*, vol. 8, no. 4.
- Kahane, B y Mangematin, V (2007), '«Nanotechnologies: un modèle de développement économique à inventer»', *Technology Review France*, vol. 1, no. 1, pp. 18-25.
- Kalish, S (1983), 'Monopolist pricing with dynamic demand and production cost', *Marketing Science*, vol. 2, no. 2, pp. 135-59.
- Kemp, R, Parto, S y Gibson, RB (2005), 'Governance for sustainable development: moving from theory to practice', *International Journal of Sustainable Development*, vol. 8, no. 1, pp. 12-30.
- Kester, WC (1984), *Turning growth options into real assets*, Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Kimbrell, GA (2006), 'Nanomaterial Consumer Products and FDA Regulation: Regulatory Challenges and Necessary Amendments', *Nanotechnology Law and Business*, vol. 3, no. 3, p. 329.
- Kittel, B (2006), 'A Crazy Methodology?: On the Limits of Macro-Quantitative Social Science Research', *International Sociology*, vol. 21, no. 5, p. 647.
- Kline, SJ (1995), *Conceptual foundations for multidisciplinary thinking*, Stanford Univ Pr.
- Klinke, A, Dreyer, M, Renn, O, Stirling, A y Van Zwanenberg, P (2006), 'Precautionary Risk Regulation in European Governance', *Journal of Risk Research*, vol. 9, no. 4, pp. 373-92.
- Kremer, M (2002), 'Pharmaceuticals and the developing world', *The Journal of Economic Perspectives*, vol. 16, no. 4, pp. 67-90.
- Kumaraswamy, A (1996), 'A real options perspective of firms' R&D investments', *Unpublished doctoral dissertation, New York University*.
- Lam, CW, James, JT, McCluskey, R y Hunter, RL (2004), 'Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation', *Toxicol Sci*, vol. 77, pp. 126-34.
- Laredo, P (2009), 'Nanotechnology: the source of a new industry or a 'general purpose technology' ? ' paper presented to 2nd Manchester International

Workshop on Nanotechnology, Society and Policy, Manchester Institute of Innovation Research

- Larédo, P, Rieu, C, Villard, L, Kahane, B, Delemarle, A, Genet, C y Mangematin, V (2009), 'Emergence Des Nanotechnologies: Vers Un Nouveau "Modele Industriel"', in J Leresche, P Larédo y K Weber (eds), *Internationaliser la recherche et l'enseignement supérieur. France, Suisse et Union européenne dans une perspective comparée*, PPUR (in Press).
- Latour, B (1987), *Science in action: how to follow scientists and engineers through society*, Harvard University., Cambridge, Massachusetts.
- (1996), 'On actor-network theory', *Soziale Welt, Jg*, vol. 47, pp. 369-81.
- (1999a), 'Give me a laboratory and I will raise the world', *The science studies reader*, pp. 258-75.
- (1999b), *Politiques de la nature: comment faire entrer les sciences en démocratie*, La Découverte, Paris.
- (2004), *Politics of Nature: How to Bring the Sciences Into Democracy*, Harvard University Press.
- (2005), *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory*, Oxford University Press, USA.
- Latour, B y Woolgar, S (1986), *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts*, Princeton University Press.
- Law, J (1992), 'Notes on the theory of the actor-network: Ordering, strategy, and heterogeneity', *Systemic Practice and Action Research*, vol. 5, no. 4, pp. 379-93.
- Leahy, JV (1993), 'Investment in competitive equilibrium: The optimality of myopic behavior', *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 108, no. 4, p. 1105.
- Lee, LL, Chan, CK, Ngaim, M y Ramakrishna, S (2006), *Nanotechnology patent landscape 2006*, Nano.
- Lepinay, VA y Callon, M (2009), 'Sketch of Derivations in Wall Street and Atlantic Africa', *Accounting, Organizations, and Institutions: Essays in Honour of Anthony Hopwood*, p. 259.
- Lev, B (2001), *Intangibles: Management, measurement, and reporting*, Brookings Inst Pr.
- Leydesdorff, L y Zhou, P (2007), 'Nanotechnology as a field of science: Its delineation in terms of journals and patents', *Scientometrics*, vol. 70, no. 3, pp. 693-713.
- Lin, XS (2006), *Introductory stochastic analysis for finance and insurance*, vol. 557, Wiley-Interscience.

- Longstaff, F y Schwartz, E (2001), 'Valuing American options by simulation: A simple least-squares approach', *Review of Financial Studies*, vol. 14, no. 1, p. 113.
- Lucas Jr, RE y Prescott, EC (1971), 'Investment under uncertainty', *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 659-81.
- Luenberger, DG (1998), *Investment science*, Oxford University Press New York.
- Lloyd (2007), *Nanotechnology Recent Development, Risks and Opportunities*, Lloyd, London, available at <http://www.lloyds.com>.
- MacKenzie, D (2009), 'Making things the same: Gases, emission rights and the politics of carbon markets', *Accounting, Organizations and Society*, vol. 34, no. 3-4, pp. 440-55.
- MacKenzie, D y Millo, Y (2003), 'Constructing a market, performing theory: the historical sociology of a financial derivatives exchange', *American journal of sociology*, pp. 107-45.
- Maebius, S y Jamison, D (2008), 'Editorial: Realizing the Opportunities of NanoMedicine', *Nanotechnology Law & Business*, vol. 5, no. 2.
- (2009), 'Ten Lessons Learned By the First Generation of Nanotech Entrepreneurs', *Nanotechnology Law & Business* vol. 6, no. 3, pp. 442-5.
- Majd, S y Pindyck, RS (1987), 'Time to build, option value, and investment decisions', *Journal of Financial Economics*, vol. 18, no. 1, pp. 7-27.
- Malinowski, B (1954), 'Magic, Science and Religion and Other Essays', *Garden City, NY (1st.)*.
- Manne, AS (1961), 'Capacity expansion and probabilistic growth', *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 632-49.
- Marchant, GE, Sylvester, DJ y Abbott, KW (2008), 'Risk Management Principles for Nanotechnology', *NanoEthics*, vol. 2, no. 1, pp. 43-60.
- Matten, D (2004), 'The impact of the risk society thesis on environmental politics and management in a globalizing economy—principles, proficiency, perspectives', *Journal of Risk Research*, vol. 7, no. 4, pp. 377-98.
- Mayntz, R (2004), 'Mechanisms in the analysis of social macro-phenomena', *Philosophy of the social sciences*, vol. 34, no. 2, p. 237.
- (2007), 'The Architecture of Multi-level Governance of Economic Sectors', Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, 07/13.
- McCarthy, E y Kelty, C (2010), 'Responsibility and nanotechnology', *Social Studies of Science*, vol. 40, no. 3, p. 405.
- McDonald, R y Siegel, D (1986a), 'The value of waiting to invest', *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 101, no. 4, pp. 707-27.

- (1986b), 'The value of waiting to invest', *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 101, no. 4, p. 707.
- Medley, T y Walsh, S (2007), *NANO Risk Framework. Environmental Defense–DuPont Nano Partnership: Washington, DC. June.*
- Mehta, MD (2002), 'Nanoscience and Nanotechnology: Assessing the Nature of Innovation in These Fields', *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 22, no. 4, p. 269.
- (2004), 'From Biotechnology to Nanotechnology: What Can We Learn from Earlier Technologies?' *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, no. 1, p. 34.
- Meyer, DE, Curran, MA y Gonzalez, MA (2009), 'An examination of existing data for the industrial manufacture and use of nanocomponents and their role in the life cycle impact of nanoproducts', *Environmental science & technology*, vol. 43, no. 5, p. 1256.
- Miltersen, KR y Schwart, ES (2004), 'R&D investments with competitive interactions', *Review of Finance*, vol. 8, no. 3, p. 355.
- Mitchell, WJT (2005), *What Do Pictures Want?: The Lives and Loves of Images*, University Of Chicago Press.
- Monteiro-Riviere, NA y Inman, AO (2006), 'Challenges for assessing carbon nanomaterial toxicity to the skin', *Carbon*, vol. 44, no. 6, pp. 1070-8.
- Mullen, PM (1999), 'Public involvement in health care priority setting: an overview of methods for eliciting values', *Health Expectations*, vol. 2, no. 4, pp. 222-34.
- Muller, J, Huaux, F, Moreau, N, Misson, P, Heilier, JF, Delos, M, Arras, M, Fonseca, A, Nagy, JB y Lison, D (2005), 'Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes', *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 207, no. 3, pp. 221-31.
- Mun, J (2003), *Real options analysis course: business cases and software applications*, Wiley.
- Muniesa, F (2003), *Des marchés comme algorithmes: sociologie de la cotation électronique à la Bourse de Paris*, PhD thesis. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris., Paris.
- Muniesa, F y Callon, M (2007a), 'Economic experiments and the construction of markets', *Do economists make markets? On the performativity of economics*.
- (2007b), 'Economic experiments and the construction of markets', *Do economists make markets*, p. 163 a 189.
- Myers, SC (1977), 'Determinants of corporate borrowing', *Journal of Financial Economics*, vol. 5, no. 2, pp. 147-75.

- Myerson, RB (1981), 'Optimal auction design', *Mathematics of operations research*, vol. 6, no. 1, p. 58.
- Mythen, G (2004), *Ulrich Beck: A Critical Introduction to the Risk Society*, Pluto Press, London.
- Newton, D y Pearson, A (1994), 'Application of option pricing theory to R&D', *R&D Management*, vol. 24, pp. 83-.
- Newton, DP, Paxson, DA y Widdicks, M (1996), *Real r&d options*, Manchester Business School.
- Nickell, SJ (1978), 'Fixed costs, employment and labour demand over the cycle', *Economica*, vol. 45, no. 180, pp. 329-45.
- Nordmann, A (2004a), 'Converging Technologies—Shaping the Future of European Societies (Brussels: European Commission)'.
 ——— (2004b), 'Molecular disjunctions: staking claims at the nanoscale', *Discovering the Nanoscale*, pp. 51–62.
 ——— (2006), 'Theories of nanotechnoscience', *Ethical and Social Implications of the Nano-Bio-Info-Cogno Convergence*, vol. December 2006. Disponible en <http://ica.stanford.edu/france/conferences/workingpapersseries/ethics>.
- Nozick, R (1993), *The Nature of Rationality*, Princeton University Press.
- Olivé, L (2004), 'Riesgo, ética y participación pública', in J Luján y J Echeverría (eds), *Gobernar los riesgos. Ciencia y valores en la sociedad del riesgo*, , editorial Biblioteca Nueva-OEI, Madrid, pp. 289-309.
- Paradise, J, Diliberto, G, Tisdale, A y Kokkoli, E (2008), 'Exploring emerging nanobiotechnology drugs and medical devices', *Food & Drug Law Journal*, vol. 63, no. 2, pp. 407-20.
- Paxson, D (2003), 'Selective review of real R&D options literature', *Real R&D Options Oxford*, pp. 291-323.
- Pickering, A (1993), 'The Mangle of Practice: Agency and Emergence in the Sociology of Science', *American Journal of Sociology*, vol. 99, no. 3, p. 559.
- Pindyck, RS (1988), 'Irreversible Investment, Capacity Choice, and the Value of the Firm', *The American Economic Review*.
 ——— (1991), 'Irreversibility, uncertainty, and investment', *Journal of economic literature*, vol. 29, no. 3, pp. 1110-48.
 ——— (1993), 'Investments of uncertain cost', *Journal of Financial Economics*, vol. 34, no. 1, pp. 53-76.
- Polanyi, K (1957), 'The great transformation', *Boston: Beacon Press*.

- Pratt, SP, Reilly, RF y Schweih, RP (1998), *Valuing small businesses and professional practices*, McGraw-Hill Professional.
- Project on Emerging Nanotechnologies (2008), *An inventory of nanotechnology-based consumer products currently on the market*, Woodrow Wilson International Center for Scholars and the Pew Charitable Trusts. <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>.
- Rafols, I, Van Zwanenberg, P, Morgan, M, Nightingale, P y Smith, A (2009), 'The missing link in nanomaterials governance: industrial dynamics and downstream policies', *Arxiv preprint*.
- RCEP (2008), *Novel materials in the environment: The case of nanotechnology*, Royal Commission on Environmental Pollution, UK.
- Reed, MA, Zhou, C, Muller, CJ, Burgin, TP y Tour, JM (1997), 'Conductance of a Molecular Junction', *Science*, vol. 278, no. 5336, p. 252.
- Renn, O y Roco, MC (2006), 'Nanotechnology and the need for risk governance', *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 8, no. 2, pp. 153-91.
- Rip, A (2009), *De facto governance of nanotechnologies*, Unpublished.
- Rip, A y Van Amerom, M (2009), 'Emerging De Facto Agendas Surrounding Nanotechnology: Two Cases Full of Contingencies, Lock-outs, and Lock-ins', in *Governing Future Technologies*, Springer Netherlands, p. 131.
- Roberts, K y Weitzman, ML (1981), 'Funding criteria for research, development, and exploration projects', *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 1261-88.
- Robertson, TS (1967), 'The process of innovation and the diffusion of innovation', *The Journal of Marketing*, vol. 31, no. 1, pp. 14-9.
- Robichaud, CO, Tanzil, D, Weilenmann, U y Wiesner, M (2005), 'Relative Risk Analysis of Several Manufactured Nanomaterials: An Insurance Industry Context', *Environmental Science and Technology*, vol. 39, pp. 8985-94.
- Robinson, DKR (2009), 'Co-evolutionary scenarios: An application to prospecting futures of the responsible development of nanotechnology', *Technological Forecasting & Social Change*.
- Roco, MC (2004), 'Nanoscale Science and Engineering: Unifying and Transforming Tools', *AIChE Journal*, vol. 50, no. 5, pp. 890-7.
- (2007), 'National Nanotechnology Initiative—past, present, future', *Handbook on Nanoscience, Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 3.1-3.26.
- Roco, MC y Bainbridge, WS (2001), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Kluwer Academic Publishers.

- (2005), 'Societal implications of nanoscience and nanotechnology: Maximizing human benefit', *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13.
- Rogers-Hayden, T y Pidgeon, N (2008), 'Developments in nanotechnology public engagement in the UK: 'upstream' towards sustainability?' *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 8-9, pp. 1010-3.
- Rose, N y Miller, P (2008), *Governing the present: administering economic, social and personal life*, Polity Pr.
- Rosenberg, N (1976), 'On Technological Expectations', *Economic Journal*, vol. 86, no. 343, p. 523—35.
- Roth, AE (1984), 'The evolution of the labor market for medical interns and residents: a case study in game theory', *The Journal of Political Economy*, vol. 92, no. 6, pp. 991-1016.
- (2002), 'The economist as engineer: Game theory, experimentation, and computation as tools for design economics', *Econometrica*, pp. 1341-78.
- (2008), 'What have we learned from market design?' *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, vol. 3, no. 1, pp. 119-47.
- Roukes, M (2001), 'Room Plenty', *Scientific American*, no. September, pp. pp. 48-57.
- Roure, F (2004), 'Promoting and strengthening a multilateral approach ', en THACPDGoTE Commission (ed.), *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop*, European Commission Community Health and Consumer Protection, Brussels On 1–2 March 2004.
- Ruelle, D (1993), *Chance and chaos*, Princeton Univ Pr.
- Say, JB (1841), *Traité d'économie politique ou simple exposition de la manière dont se forment, se distribuent et se consomment les richesses*, vol. 9, Guillaumin.
- Schaubroeck, J y Williams, S (1993), 'Type A behavior pattern and escalating commitment', *Journal of Applied Psychology*, vol. 78, no. 5, p. 862.
- Schummer, J (2007), 'Identifying Ethical Issues of Nanotechnologies', *Nanotechnology: Science, Ethics and Policy Issues, Paris (UNESCO Series in Ethics of Science and Technology)*, pp. 79-98.
- Schwartz, ES (2004), 'Patents and R&D as real options', *Economic Notes*, vol. 33, no. 1, pp. 23-54.
- Seguin, E (2000), 'Bloor, Latour, and the field', *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 31, no. 3, pp. 503-8.
- Seguin, È (1996), 'L'analyse politique de la science. Technocratie versus discours scientifique', *Politix*, vol. 9, no. 36, pp. 181-93.

- Seguin, EVE (2001), 'Narration and Legitimation: The Case of in Vitro Fertilization', *Discourse & Society*, vol. 12, no. 2, p. 195.
- Selin, C (2007), 'Expectations and the Emergence of Nanotechnology', *Science, Technology & Human Values*, vol. 32, no. 2, p. 196.
- Sennett, R (1998), *The corrosion of character: The personal consequences of work in the new capitalism*, WW Norton & Co Inc.
- Sereno, L (2006), *Valuing R&D Investments with a Jump-diffusion Process*, Università degli Studie, Dipartimento di Scienze Economiche.
- Serrano, T y Humanidades, U (2001), 'Lo uno y lo múltiple: la estructura de la explicación económica en Walras y Marshall', *Materia (s)*, vol. 450011, p. 340000.
- Shalleck, AB (2009) 'Nanosphere, Inc.: An Evaluation and Projection'.
- Shrader-Frechette, K (1996), 'Calculated risks', *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 11, no. 3, pp. 144-.
- (1998), 'First Things First: Balancing Scientific and Ethical Values in Environmental Science', *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 88, no. 2, pp. 287-9.
- (2005), 'Property rights and genetic engineering: Developing nations at risk', *Science and Engineering Ethics*, vol. 11, no. 1, pp. 137-49.
- Shrader-Frechette, KS (1991), *Risk and rationality*, University of California Press Berkeley.
- (1994), 'Science, environmental risk assessment, and the frame problem', *Bioscience*, vol. 44, no. 8, pp. 548-52.
- Shvedova, AA, Castranova, V, Kisin, ER, Schwegler-Berry, D, Murray, AR, Gandelsman, VZ, Maynard, A y Baron, P (2003), 'Exposure to carbon nanotube material: assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cells', *J.Toxicol.Environ.Health A*, vol. 66, pp. 1909-26.
- Simon, HA (1981), 'The sciences of the artificial (ed.)', *Cambridge, MA*.
- (1982), 'Models of Bounded Rationality. Volume I', *Economic analysis and public policy*, vol. 2.
- Slovic, P (1987), 'Perception of risk', *Science*, vol. 236, no. 4799, pp. 280-5.
- Smith, VL (1962), 'An experimental study of competitive market behavior', *The Journal of Political Economy*, vol. 70, no. 2, pp. 111-37.
- (1989), 'Theory, experiment and economics', *The Journal of Economic Perspectives*, vol. 3, no. 1, pp. 151-69.
- (1994), 'Economics in the Laboratory', *The Journal of Economic Perspectives*, vol. 8, no. 1, pp. 113-31.

- Stark, D (2009), *The Sense of Dissonance: Accounts of worth in economic life*, Princeton Univ Pr.
- Stewart, J (2005), 'The Nanotech University Spinout Company: Strategies for Licensing, Developing, Commercializing and Financing Nanotechnology', *Nanotechnology Law and Business*, vol. 2, no. 4, p. 365.
- Stix, G (2001), 'Little Big Science Nanotechnology is all the rage. But will it meet its ambitious goals? And what the heck is it?' *Scientific American*, vol. 285, pp. 32-7.
- Strathern, M (2000), *Audit cultures: anthropological studies in accountability, ethics, and the academy*, Routledge.
- Swiss Re (2005), 'Nanotechnology', *Small matter, many unknowns* <http://www.swissre.com/INTERNET/pwswpspr.nsf/fmBookMarkFrameSet>.
- Tahan, C (2007), 'Identifying Nanotechnology in Society', in M Zelkowitz (ed.), *Advances in Computers*, Elsevier.
- Taniguchi, N (1974), 'On the Basic Concept of Nanotechnology', *Proc. Int. Conf. Prod. Eng*, pp. 18-23.
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering (2004), *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, Plymouth, UK.
- Tourney, CP (2006), 'Narratives for Nanotech: Anticipating Public Reactions to Nanotechnology', *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society*.
- Trigeorgis, L (1993), 'Real options and interactions with financial flexibility', *Financial Management*, vol. 22, no. 3, pp. 202-24.
- (1996), *Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation*, the MIT Press.
- Tsitsiklis, J y Van Roy, B (1999), 'Optimal stopping of Markov processes: Hilbert space theory, approximation algorithms, and an application to pricing high-dimensional financial derivatives', *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 10.
- US Environmental Protection Agency (2007), *Nanotechnology White Paper*, Science Policy Council, Environmental Protection Agency
- Van Kasteel, M (2009), 'Nanoparticle Technologies for Patient-Centered Diagnosis', *IVD Technology*, no. April, pp. 33-7.
- Van Lente, H (1993), *Promising technology: the dynamics of expectations in technological developments*, Ph. D. diss. Universiteit Twente, The Netherlands.

- Van Lente, H y Rip, A (1998), 'Expectations in Technological Developments: An Example of Prospective Structures to be Filled in by Agency', in C Disco y Bvd Meulen (eds), *Getting New Technologies Together: Studies in Making Sociotechnical Order*, Walter de Gruyter, pp. 203–29.
- Van Loon, J (2002), *Risk and technological culture: towards a sociology of virulence*, Routledge.
- Varian, HR (1992), 'Microeconomic analysis'.
- Vermaas, PE (2006), 'The physical connection: engineering function ascriptions to technical artefacts and their components', *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 37, no. 1, pp. 62-75.
- Vickery, W (1961), 'Counterspeculation, Auctions and Competitive Scaled Agents', *Journal of Finance*, vol. 16, pp. 8-37.
- Weber, M (1978 [1922]), *Economy and society: An outline of interpretive sociology*, University of California Press.
- Weitzman, ML, Newey, W y Rabin, M (1981), 'Sequential R&D strategy for synfuels', *The Bell Journal of Economics*, vol. 12, no. 2, pp. 574-90.
- Wiek, A, Zemp, S, Siegrist, M y Walter, AI (2007), 'Sustainable governance of emerging technologies—Critical constellations in the agent network of nanotechnology', *Technology in Society*, vol. 29, no. 4, pp. 388-406.
- Wilson, R (1992), 'Strategic analysis of auctions', *Handbook of game theory*, vol. 1, p. 228 79.
- (2002), 'Architecture of power markets', *Econometrica*, vol. 70, no. 4, pp. 1299-340.
- Winsberg, E (2006), 'Handshaking Your Way to the Top: Simulation at the Nanoscale', *Philosophy of Science*, vol. 73, no. 5, pp. 582-94.
- Wu, G (2009), 'Uncertainty, Investment and Capital Accumulation: What Do We Know and What Do We Not Know', in Tesis doctoral, Nuffield College, Oxford.
- Zucker, LG y Darby, MR (2005), 'Socio-economic impact of nanoscale science: initial results and nanobank', *NBER working paper*.

A. Apéndice matemático

A.1. Relación de parámetros para que $S(t)$ sea martingala

Para que el proceso descrito por la ecuación sea martingala, se debe cumplir que:

$$E\left\{\frac{S(s)}{S(t)} \middle| S(t)\right\} = 1$$

Claramente esto ocurrirá solamente si se verifica una cierta relación entre parámetros. Operando,

$$E\left\{\frac{S(0) \cdot e^{as+bW(s)}}{S(0) \cdot e^{at+bW(t)}} \middle| S(t)\right\} = 1 \Rightarrow$$

$$e^{a(s-t)} \times E\left\{e^{b(W(s)-W(t))} \middle| S(t)\right\} = 1 \tag{A.1}$$

Por otro lado, por definición del proceso browniano, $[W(s)-W(t)]$ tiene distribución normal con media 0 y varianza $(s-t)$. Por lo tanto $(W(s)-W(t))b$ tiene distribución normal con media 0 y varianza $(s-t)b^2$ y la variable $e^{b(W(s)-W(t))}$ tiene entonces distribución lognormal y su esperanza viene dada por⁸⁴:

$$E\left\{e^{b(W(s)-W(t))} \middle| S(t)\right\} = e^{\frac{1}{2}b^2(s-t)} \tag{A.2}$$

Reemplazando la expresión (A.2) en (A.1), obtenemos:

$$E\left\{\frac{S(s)}{S(t)} \middle| S(t)\right\} = e^{a(s-t)} \times e^{\frac{1}{2}b^2(s-t)} = e^{\left(a+\frac{1}{2}b^2\right)(s-t)}$$

Ahora bien, para que esta expresión sea igual a 1, es necesario que:

⁸⁴ Por propiedad de la distribución lognormal: si $\ln(Y) \sim N(\mu, \sigma)$ entonces $E(Y) = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}$

$$e^{\left(a+\frac{1}{2}b^2\right)(s-t)} = 1 \Rightarrow a + \frac{1}{2}b^2 = 0$$

A.2. Función de distribución de τ_u

A continuación se deriva la función de distribución de τ_u que permitirá calcular el precio buscado. Derivar la función de distribución de τ_u requiere trabajar con un proceso $Z(t)$ construido de manera tal que sea martingala. Luego se aplica el teorema de muestreo óptimo sobre esta martingala y por último se asocian los resultados obtenidos con la transformada de Laplace para así entender la forma de la función de densidad de acuerdo a la relación biunívoca que existe entre la transformada de Laplace de una variable aleatoria y su función de distribución.

Siguiendo a Lin (2006), como primer paso se construye el proceso $Z(t)$ que será martingala para un cierto valor del parámetro ξ :

$$Z(t) = e^{-zt} [S(t)]^\xi \text{ para } z \geq 0$$

Reemplazando con la definición de $S(t)$,

$$Z(t) = e^{-zt} [S(0) \cdot e^{\mu t + \sigma W(t)}]^\xi = e^{-zt} S(0)^\xi \cdot e^{\mu \xi t + \sigma \xi W(t)} = S(0)^\xi \cdot e^{(\mu \xi - z)t} \cdot e^{\sigma \xi W(t)}$$

Utilizando la relación de parámetros encontrada en el apartado anterior:

$$(\mu \xi - z) + \frac{1}{2}(\sigma \xi)^2 = 0$$

Y resolviendo la ecuación cuadrática para el valor positivo de ξ :

$$\xi = \frac{-\mu + \sqrt{\mu^2 + 2\sigma^2 z}}{\sigma^2} = \frac{-\mu + \mu \sqrt{1 + 2\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)z}}{\sigma^2} = \frac{\mu}{\sigma^2} \times \left(-1 + \sqrt{1 + 2z \frac{\sigma^2}{\mu^2}}\right) \quad (\text{A.3})$$

Encontramos el valor de ξ para que $Z(t)$ sea martingala.

Por otro lado

$$Z(t) = e^{-zt} [S(t)]^\xi \Rightarrow Z(0) = S(0)^\xi \quad (\text{A.4})$$

y

$$E\{Z(\tau_u)\} = E\{e^{-z\tau_u} [S(\tau_u)]^\xi\} = E\{e^{-z\tau_u} U^\xi\} = U^\xi \times E\{e^{-z\tau_u}\} \quad (\text{A.5})$$

Sabiendo que el proceso $Z(t)$ es martingala y se encuentra acotado, podemos aplicar el teorema de muestreo óptimo⁸⁵ al mismo (Lin, 2006), por lo que:

$$E\{Z(\tau_u)\} = E\{Z(0)\} = Z(0)$$

Lo cual nos permite igualar las expresiones (A.4) y (A.5):

$$S(0)^\xi = U^\xi \times E\{e^{-z\tau_u}\}$$

$$E\{e^{-z\tau_u}\} = \left(\frac{S(0)}{U}\right)^\xi$$

Esta última expresión puede reescribirse tomando $a = \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)$:

$$E\{e^{-z\tau_u}\} = e^{-a\xi}$$

Teniendo en cuenta lo obtenido en (A.3) puede reemplazarse el valor de ξ para obtener la transformada de Laplace de la variable aleatoria τ_u

$$E\{e^{-z\tau_u}\} = e^{-a\left(\frac{\mu}{\sigma^2} \times \left(-1 + \sqrt{1 + 2z\frac{\sigma^2}{\mu^2}}\right)\right)}$$

⁸⁵ Establece que si un proceso $\{X(t)\}$ es una martingala entonces el proceso $\{X(\tau \wedge t), t \geq 0\}$ es también martingala y que si $|X(\tau \wedge t)| \leq K$ $t \geq 0$ entonces: $E\{X(\tau)\} = E\{X(0)\}$

Si hacemos $\alpha = a \frac{u}{\sigma^2}$ y $\beta = \frac{u^2}{\sigma^2}$ se verifica que τ_U tiene distribución Gaussiana

Inversa con los parámetros descriptos. La transformada de Laplace de una función gaussiana inversa es:

$$\tilde{f}_{IG}(z) = e^{\alpha \times \left(1 - \sqrt{1 + 2 \times \frac{z}{\beta}}\right)} \quad (\text{A.6})$$

A.3. Cálculo de $E(I_{\{\tau_U \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_U})$

$$\begin{aligned} E(I_{\{\tau_U \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_U}) &= \int_0^T e^{-r \times t} \times \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-(\beta t - \alpha)^2 / 2\beta t} dt \\ &= \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\left(\frac{(\beta t - \alpha)^2}{2\beta t} + r \times t^2 \times 2\beta\right) \times \frac{1}{2\beta t}} dt \\ &= \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\left(\beta^2 t^2 - 2\beta\alpha t + \alpha^2 + r \times t^2 \times 2\beta\right) \times \frac{1}{2\beta t}} dt \end{aligned}$$

Si se trabaja sobre la potencia de la exponencial es posible reescribir la expresión anterior.

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2\beta t} (\beta^2 t^2 - 2\beta t \alpha + \alpha^2 + 2r\beta t^2) &= -\frac{1}{2\beta t} \left((\beta^2 + 2r\beta) \times t^2 + \alpha^2 - 2\beta t \alpha \right) \\ &= -\frac{1}{2\beta t} \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right)^2 + \alpha^2 - 2\beta t \alpha \right) \\ &= -\frac{1}{2\beta t} \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right)^2 + \alpha^2 - 2\beta t \alpha - 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) + 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) \right) \end{aligned}$$

Separando los términos:

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2\beta t} \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right)^2 + \alpha^2 - 2\beta t \alpha - 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) + 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) \right) = \\
& = -\frac{1}{2\beta t} \times \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right)^2 - 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) + \alpha^2 \right) + \frac{1}{2\beta t} \times \left(2\beta t \alpha - 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) \right) \\
& = -\frac{1}{2\beta t} \times \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) - \alpha \right)^2 + \frac{1}{2\beta t} \times \left(2\beta t \alpha - 2 \times \alpha \times \left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) \right) \\
& = -\frac{1}{2\beta t} \times \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) - \alpha \right)^2 + \frac{\alpha}{\beta} \times \left(\beta - \sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \right)
\end{aligned}$$

Pudiéndose reescribir:

$$\begin{aligned}
E\left(I_{\{\tau_u \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_u}\right) &= \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\left(\beta^2 t^2 - 2\beta\alpha t + \alpha^2 + r \times t^2 \times 2 \times \beta^2\right) \times \frac{1}{2\beta t}} dt \\
&= \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\frac{1}{2\beta t} \times \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) - \alpha \right)^2 + \frac{\alpha}{\beta} \times \left(\beta - \sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \right)} dt \\
&= e^{\frac{\alpha}{\beta} \times \left(\beta - \sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \right)} \times \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\frac{1}{2\beta t} \times \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) - \alpha \right)^2} dt \\
E\left(I_{\{\tau_u \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_u}\right) &= e^{\frac{\alpha}{\beta} \times \left(\beta - \sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \right)} \times \int_0^T \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi\beta t^3}} \times e^{-\frac{1}{2\beta t} \times \left(\left(\sqrt{\beta^2 + 2r\beta} \times t \right) - \alpha \right)^2} dt \quad (A.7)
\end{aligned}$$

De acuerdo a la forma de la función de densidad puede verse que la integral

corresponde al caso en donde $\alpha^* = \frac{\alpha \sqrt{\beta + 2r}}{\sqrt{\beta}}$ y $\beta^* = \beta + 2r$

Por lo tanto

$$\alpha^* = \frac{\alpha \times \frac{\mu}{\sigma^2} \sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r}}{\frac{\mu}{\sigma}} = \frac{\alpha}{\sigma} \times \sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} ; \quad \beta^* = \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 + 2r \quad (A.8)$$

La integral correspondiente a (A.7) no es ya una esperanza condicionada sino que constituye la función de distribución de una variable gaussiana inversa con los parámetros descritos en (A.8).

Esto permite escribir:

$$E\left(I_{\{\tau_U \leq T\}} \times e^{-r \times \tau_U}\right) = e^{\frac{\alpha}{\beta} \times [\beta - \sqrt{\beta^2 + 2\beta r}]} \cdot P(x \leq T)$$

Para la variable gaussiana inversa con los parámetros descritos en (A.8) es posible reescribir las funciones de distribución en base a la distribución normal:

$$P(X \leq x) = N\left(\frac{\beta^* x - \alpha^*}{\sqrt{\beta^* x}}\right) + e^{2\alpha^*} N\left(-\frac{\beta^* x + \alpha^*}{\sqrt{\beta^* x}}\right) \quad (\text{A.9})$$

Asumiendo que $a = \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)$:

$$\alpha^* = \frac{a}{\sigma} \times \sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} = \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right) \times \sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} \times \frac{1}{\sigma}$$

$$\beta^* = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 + 2r$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \frac{\beta^* t - \alpha^*}{\sqrt{\beta^* t}} &= \frac{\left(\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 + 2r\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right) \times \sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} \times \frac{1}{\sigma}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 + 2r\right) \times t}} \\ &= \left(\sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right) \times \frac{1}{\sigma}\right) \times \frac{1}{\sqrt{t}} \end{aligned}$$

Y, volviendo a la definición de los parámetros originales, se tiene:

$$\frac{\alpha}{\beta} \times \left[\beta - \sqrt{\beta^2 + 2\beta r} \right] = \left(\ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{\mu}{\sigma^2} \right) \times \frac{\sigma^2}{\mu^2} \times \left[\left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 - \sqrt{\left(\left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \right)^2 + 2 \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 r} \right]$$

Como la valuación es independiente de las preferencias de riesgo del individuo, puede elegirse el valor de μ tal que facilite trabajar en la valuación dado que este valor no va a modificar el precio final de la opción. Resulta conveniente en este caso considerar la valuación neutral a riesgo. En un contexto de valuación neutral a riesgo se considera que el rendimiento que se exige temporalmente al activo es la tasa libre de riesgo.

Como en el movimiento geométrico browniano el componente tendencia es igual

$$\text{a } \mu + \frac{1}{2}\sigma^2 \text{ puede expresarse: } \mu + \frac{1}{2}\sigma^2 = r \Rightarrow \mu = r - \frac{1}{2}\sigma^2$$

Esto puede reemplazarse en cada una de las expresiones trabajadas anteriormente.

$$\begin{aligned} \frac{\beta^* t - \alpha^*}{\sqrt{\beta^* t}} &= \left(\sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} \times t - \ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{1}{\sigma} \right) \times \frac{1}{\sqrt{t}} \\ &= \left(\sqrt{\frac{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2 \right)^2}{\sigma^2} + 2r} \times t - \ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{1}{\sigma} \right) \times \frac{1}{\sqrt{t}} \\ &= \left(\sqrt{\frac{\left(r^2 - r \times \sigma^2 + \sigma^4 \right) + 2 \times r \times \sigma^2}{\sigma^2}} \times t - \ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{1}{\sigma} \right) \times \frac{1}{\sqrt{t}} \\ &= \left(\sqrt{\frac{r^2 + r \times \sigma^2 + \sigma^4}{\sigma^2}} \times t - \ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{1}{\sigma} \right) \times \frac{1}{\sqrt{t}} \end{aligned}$$

$$\frac{\beta^* t - \alpha^*}{\sqrt{\beta^* t}} = \left(\left(r + \frac{1}{2}\sigma \right) \times t - \ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \right) \times \frac{1}{\sigma \sqrt{t}} \quad (\text{A.10})$$

De manera similar:

$$-\frac{\beta^* t + \alpha^*}{\sqrt{\beta^* t}} = -\left(\left(r + \frac{1}{2} \sigma \right) \times t + \ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \right) \times \frac{1}{\sigma \sqrt{t}} \quad (\text{A.11})$$

Finalmente:

$$\frac{\alpha}{\beta} \times \left[\beta - \sqrt{\beta^2 + 2\beta r} \right] = \left(\ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{\left(r - \frac{1}{2} \sigma^2 \right)}{\sigma^2} \right) \frac{\sigma^2}{\left(r - \frac{1}{2} \sigma^2 \right)^2} \left[\left(\frac{\left(r - \frac{1}{2} \sigma^2 \right)}{\sigma} \right)^2 - \sqrt{\left(\frac{\left(r - \frac{1}{2} \sigma^2 \right)}{\sigma} \right)^2} \right] + 2 \left[\left(\frac{\left(r - \frac{1}{2} \sigma^2 \right)}{\sigma} \right)^2 \right] r$$

$$\frac{\alpha}{\beta} \times \left[\beta - \sqrt{\beta^2 + 2\beta r} \right] = \left(\ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \times \frac{1}{\left(r - \frac{1}{2} \sigma^2 \right)} \right) \left[\frac{-r\sigma^2 + \frac{1}{2} \sigma^4}{\sigma^2} \right] = -\ln \left(\frac{U}{S(0)} \right)$$

Entonces:

$$\frac{\alpha}{\beta} \times \left[\beta - \sqrt{\beta^2 + 2\beta r} \right] = -\ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \quad (\text{A.12})$$

Además, debe considerarse el valor de α^* en base a la valuación neutral a riesgo:

$$\alpha^* = a \times \sqrt{\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 2r} \times \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma^2} \times \left(r + \frac{1}{2} \sigma^2 \right) = \left(\frac{r}{\sigma^2} + \frac{1}{2} \right) \times \left(\ln \left(\frac{U}{S(0)} \right) \right)$$

Estos últimos desarrollos nos permiten reemplazar en la ecuación (A.9) los valores obtenidos en (A.10)(A.11)(A.12):

$$P(X \leq T) = N \left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) + e^{2 \times \left(\frac{r}{\sigma^2} + \frac{1}{2}\right) \times \left(\ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)\right)} N \left(-\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right)$$

$$P(X \leq T) = N \left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) + \left(\frac{U}{S(0)}\right)^{2 \times \left(\frac{r}{\sigma^2} + \frac{1}{2}\right)} N \left(-\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right)$$

$$P(X \leq T) = N \left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) + \left(\frac{U}{S(0)}\right)^{\left(\frac{2r}{\sigma^2} + 1\right)} N \left(-\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right)$$

Usando también el resultado de la expresión (A.12) puede hallarse el precio de la opción binaria:

$$\text{Precio} = E\left(I_{\{x_U \leq T\}} \times e^{-r \times t_U}\right) = e^{\frac{\alpha}{\beta} \times [\beta - \sqrt{\beta^2 + 2\beta r}]} \cdot P(x \leq T)$$

$$= e^{-\ln(U/S(0))} \times \left(N \left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) + \left(\frac{U}{S(0)}\right)^{\left(\frac{2r}{\sigma^2} + 1\right)} N \left(-\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) \right)$$

$$= \frac{S(0)}{U} \times N \left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) + \left(\frac{U}{S(0)}\right)^{\left(\frac{2r}{\sigma^2} + 1\right) - 1} \times N \left(-\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right)$$

$$\text{Precio} = \frac{S(0)}{U} \times N \left(\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t - \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right) + \left(\frac{U}{S(0)}\right)^{\left(\frac{2r}{\sigma^2}\right)} N \left(-\frac{\left(r + \frac{1}{2}\sigma\right) \times t + \ln\left(\frac{U}{S(0)}\right)}{\sigma\sqrt{t}} \right)$$

A.4. Valuación de un Call Europeo

$$Call(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \max \left(S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) + \sigma \times \sqrt{T-t} y} - K; 0 \right) \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

Haciendo un cambio de variable $y = -x \Rightarrow dy = -dx$

$$Call(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{+\infty}^{-\infty} -\max \left(S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t} y} - K; 0 \right) \times e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Además:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(y) dy = \int_{\infty}^{-\infty} -f(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(-x) dx$$

Por lo cual puede escribirse:

$$Call(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \max \left(S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t} x} - K; 0 \right) \times e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (A.13)$$

La integral toma valor cero para todos los valores que hacen que la expresión siguiente sea menor a cero: $S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t} x} - K$. Por lo tanto es posible integrar, en lugar de sobre todo el dominio, únicamente sobre los valores de la integral positivos. Se busca entonces el valor de x que hace que la expresión comience a ser positiva:

$$S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t} x} = K \Rightarrow$$

$$x = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}} \quad (A.14)$$

Dado que la relación entre el subyacente y el valor que toma x se plantea como decreciente, la expresión (A.14) muestra el máximo valor de x para el cual

$$S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t}x} - K$$

es mayor a cero.

Integrando en el dominio en el cual la expresión toma un valor mayor a cero es posible escribir la ecuación (A.13):

$$Call(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} \left(S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t}y} - K \right) \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

Separando en términos la integral:

$$Call(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t}y} \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy -$$

$$- \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} K \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

$$Call(S, t) = \frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t}y} \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy -$$

$$- K \times e^{-r(T-t)} \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (A.15)$$

La integral del segundo término de la expresión se corresponde con la probabilidad de que una variable normal estándar tome un valor inferior o igual al

calculado en la expresión (18):
$$\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}$$

A fines de nomenclatura llamaremos d_2 a este valor.

El segundo término de la expresión (A.15) se simplifica entonces como:
 $-K \times e^{-r(T-t)} \times N(d_2)$ siendo esto último la probabilidad acumulada de una normal estándar para el valor d_2 .

A continuación se trabaja con el primer término de la expresión (A.15)

$$\frac{e^{-r(T-t)}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}} S \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma\sqrt{T-t}x} \times e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Considerando toda la expresión dentro de la integral:

$$\int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}} S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma\sqrt{T-t}x - r(T-t)} \times e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Realizando un cambio de variable $y = x + \sigma\sqrt{T-t} \Rightarrow dy = dx$ debe reescribirse la expresión dentro de la integral y la constante de integración superior.

Modificación de la constante de integración

$$\text{Si } x = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}} \Rightarrow y = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}} + \sigma\sqrt{T-t}$$

$$y = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) + \sigma^2(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}} = \frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) + \left(r + \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}} \quad (\text{A.16})$$

Modificación de la función dentro de la integral

$$S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma\sqrt{T-t}x - r(T-t)} \times e^{-\frac{x^2}{2}} \Rightarrow S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma\sqrt{T-t} \times (y - \sigma\sqrt{T-t}) - r(T-t)} \times e^{-\frac{(y - \sigma\sqrt{T-t})^2}{2}}$$

Trabajando dentro del exponente de esta expresión:

$$\begin{aligned}
 S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t} \times y + \sigma^2 \times (T-t) - r(T-t)} \times e^{-\frac{(y^2 - 2 \times y \times \sigma \sqrt{T-t} + \sigma^2(T-t))}{2}} &= \\
 S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\left(-\frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t) - \sigma \times \sqrt{T-t} \times y + \sigma^2 \times (T-t)} \times e^{-\frac{y^2}{2} + (y \times \sigma \sqrt{T-t}) - \frac{1}{2} \times \sigma^2(T-t)} &= \\
 = S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{y^2}{2}} & \quad \text{(A.17)}
 \end{aligned}$$

Reemplazando (A.16) y (A.17) en la ecuación (A.15) conjuntamente con la expresión a la que se había llegado para el segundo término es posible escribir:

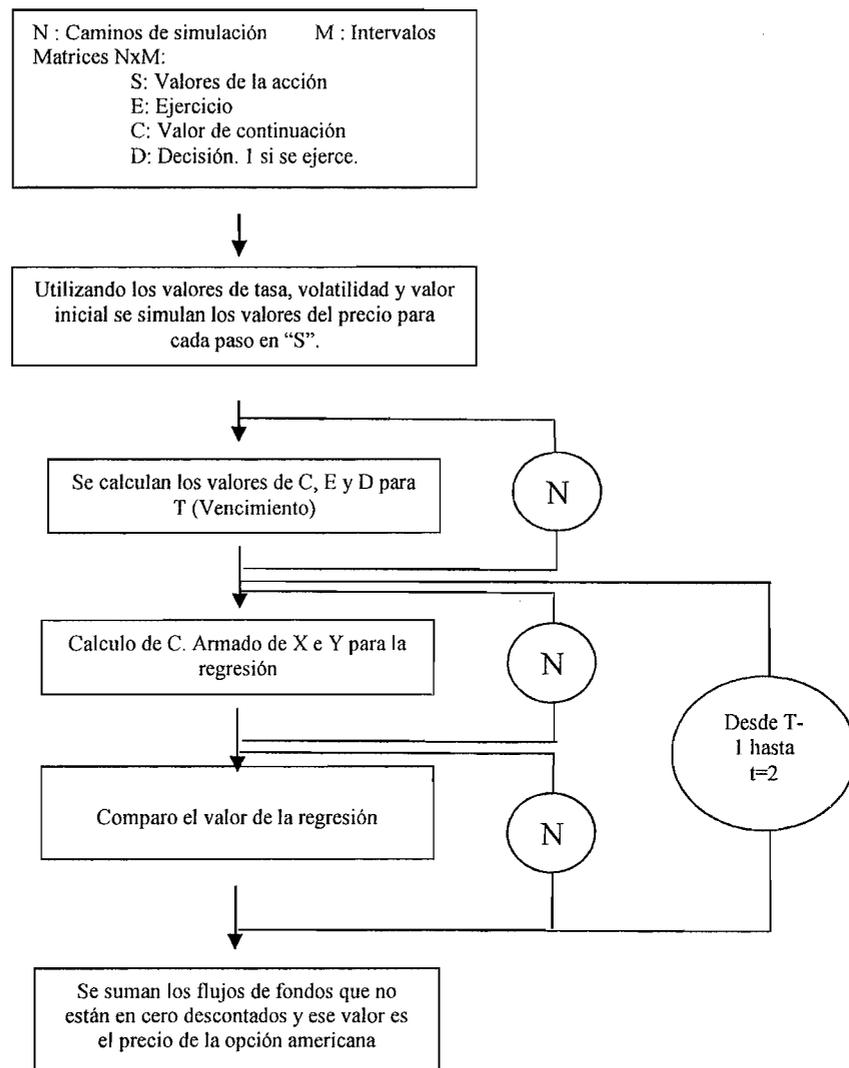
$$\begin{aligned}
 Call(S,t) &= \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) - \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} S \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy - K \times e^{-r(T-t)} \times N(d2). \\
 Call(S,t) &= S \times \int_{-\infty}^{\frac{\ln\left(\frac{K}{S}\right) - \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(T-t)}{\sigma \times \sqrt{T-t}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{y^2}{2}} dy - K \times e^{-r(T-t)} \times N(d2)
 \end{aligned}$$

Llamando $d1$ a la expresión hallada en (A.16) se interpreta a la primera integral como la probabilidad de que una variable normal estándar tome un valor menor o igual a $d1$.

Por lo tanto, se ha encontrado la fórmula de valuación de Black & Scholes para un call sobre una acción:

$$Call(S,t) = S \times N(d1) - K \times e^{-r(T-t)} \times N(d2) \quad \text{(A.18)}$$

A.5. Algoritmo numérico de solución de una opción americana de venta



El algoritmo propuesto ha sido codificado en VBA para poder ser utilizado. Las próximas secciones calculan el valor de la opción americana para diferentes valores de los parámetros. Se ha presentado un método numérico basado en técnicas de MonteCarlo para el cálculo de una opción americana. Se ha detallado el algoritmo del método de regresión de mínimos cuadrados propuesto por Longstaff and Schwartz (2001).

A.6. Solución bajo incertidumbre técnica ($\gamma = 0$)

En este caso, dado que $\gamma = 0$, la ecuación diferencial propuesta se reduce a:

$$\frac{1}{2}\beta^2 IC \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} - I \frac{\partial F}{\partial C} - I = r F \quad (\text{A.19})$$

En este caso, C sólo puede cambiar cuando la inversión se está llevando a cabo, por lo tanto si $C > C^*$ y la firma no invierte $F(C) = 0$. De esta forma, las condiciones de contorno (a) y (c) no se alteran pero la condición (b) es reemplazada por $F(C^*) = 0$.

Cuando $r = 0$ la expresión (A.19) posee la siguiente solución analítica:

$$F(C) = V - C + \beta^2 \left(\frac{V}{2}\right)^{\frac{2}{\beta^2}} \left(\frac{C}{\beta^2 + 2}\right)^{\frac{\beta^2 + 2}{\beta^2}} \quad (\text{A.20})$$

Asimismo el valor crítico C^* es $C^* = \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right)V$.

La interpretación que podemos darle a (A.20) es la siguiente: con una tasa de interés igual a cero, $(V - C)$ representaría el valor de la oportunidad de inversión si no existiese la posibilidad de abandonar el proyecto una vez comenzado. El último término de la expresión (A.20) es el valor de una opción put.

Sin embargo, cuando la tasa de interés es positiva, la expresión (A.19) no posee solución analítica y debe ser resuelta por métodos numéricos para distintos valores de β .

A.7. Solución bajo incertidumbre en el costo de los inputs

En el caso cuando $\beta = 0$, la ecuación diferencial se reduce a:

$$\frac{1}{2}\gamma^2 C^2 \frac{\partial^2 F}{\partial C^2} - I \frac{\partial F}{\partial C} - \phi \gamma C \frac{\partial F}{\partial C} - I = r F \quad (\text{A.21})$$

Sujeto a las condiciones (a) y (b) pero en este caso la condición (c) sería reemplazada por:

$$F_C(C^*) = -1$$

En este caso, C puede cambiar si la inversión se realiza o no. De esta forma, al igual que una opción put, $F(C) > 0$ para cualquier C finito.

Si $\gamma > 0$ y $r = 0$ la expresión (A.21) no tiene solución porque no tendría sentido invertir. Siempre será preferible esperar hasta que C tienda a cero para que el payoff de invertir sea significativo. Si $I = 0$, \tilde{K} se distribuye lognormalmente. Entonces γ puede ser interpretado como el desvío estándar del cambio porcentual por período en K .