

**40 Jornadas Nacionales de Administración Financiera**  
Octubre 2020

# **Riesgo tecnológico y de mercado en inversiones de biotecnología**

## **Opciones secuenciales cuatrinomiales con volatilidad cambiante**

**Gastón S. Milanesi**

*Universidad Nacional del Sur*

### SUMARIO

1. Introducción
2. Marco teórico: desarrollo del modelo cuatrinomial y volatilidad cambiante
3. Análisis de caso: Opciones secuenciales y el desarrollo de una vacuna
4. Conclusiones

### *Resumen*

Las inversiones en biotecnologías para el desarrollo de vacunas implican un conjunto de etapas secuenciales, sujetas a incertidumbres tecnológicas y de mercado. La dimensión financiera es evaluada con árboles de decisión y opciones reales binomiales, conceptualmente erróneos por unificar las incertidumbres en una sola variable: la volatilidad del subyacente. El trabajo propone un modelo de valoración de opciones secuenciales cuatrinomial con volatilidad cambiante y fuentes de incertidumbre independientes. Es analizado un caso de opciones secuenciales comparando los modelos. Los resultados exponen las ventajas del modelo propuesto respecto del modelo binomial, en particular sobre valúa al resumir riesgos en una sola variable. Se concluye que los riesgos y objetivos de salud pública demandan de consorcios público privados para su motorización.

## **1. Introducción**

La valoración de proyectos motivados en estrategias de desarrollo de nuevas tecnologías o productos involucra un conjunto de pasos. En tal sentido, el planteo extensivo a través de árboles de decisiones o rejillas binomiales constituye una herramienta de suma utilidad para resolver analíticamente el problema de opciones secuenciales. A menudo, los desarrollos de nuevas tecnologías involucran varias fuentes de incertidumbre, que pueden resumirse en los riesgos que enfrenta toda inversión: mercado y tecnológico u operativo. Un caso típico lo constituye el desarrollo de nuevos fármacos como las vacunas. Su desarrollo, comenzando por el diseño en laboratorio, prototipo, autorizaciones, experimento de campo, validación, producción y distribución demanda tiempo, recursos y del éxito de cada una de las etapas. La comercialización del medicamento es la etapa final, la cual se alcanza, posterior a la resolución de las incertidumbres tecnológicas y de mercado propias del proyecto.

La toma de decisiones en condiciones de incertidumbre relativa a proyectos implica analizar un conjunto de indicadores y consecuencias derivadas de la inversión. Entre los indicadores se encuentran las medidas financieras donde el resultado surge a partir de la diferencia entre el valor actual esperado de los resultados y las inversiones secuenciales futuras; considerando riesgos tecnológicos y de mercado.

Los modelos de valuación utilizados tienen dos objetivos. Por un lado, modelar el comportamiento futuro de las variables que explican el valor económico de la inversión. Por otro simplificar la compleja información del modelo en parámetros para la toma de decisiones desde la perspectiva financiera. Valuar decisiones secuenciales requiere de herramientas que exceden a la simple aritmética del valor actual neto. Además de los conocidos árboles de decisiones, se encuentran los modelos de opciones reales. A partir del modelo binomial se han desarrollado un conjunto de métodos numéricos para la resolución de opciones secuenciales (Trigeorgis, 1995; Trigeorgis, 1997; Amram & Kulatilaka, 1998; Copeland & Antikarov, 2003; Shockley, Curtis, Jafari & Tibbs, 2003; Smit & Trigeorgis, 2004; Shockley, 2006; Graeme, 2009; Brandao & Dyer, 2009; Num, 2015; Salahaldin, 2016).

Los árboles de decisión presentan algunas inconsistencias al momento de valorar estrategias, ya que utilizan la misma tasa de costo de capital, para ajustar por riesgos

diferentes ramas, alternativas estratégicas o decisiones secuenciales contenidas en el proyecto (Smith & Nau, 1995; Copeland & Tufano, 2004). El modelo binomial resuelve el problema de la tasa mediante la estimación de coeficientes equivalentes ciertos. En su versión tradicional, presenta el inconveniente de englobar en una única cifra de volatilidad constante a todos los riesgos del proyecto, suponiendo distribución normal y estimada mediante técnicas de simulación (Smith, 2005; Chance, 2007; Haahtela, 2011; Brandao, Dyer & Hahn, 2012; Pareja Vasseur, Prada Sánchez & Moreno Escobar, 2019; Milanesi, 2019).

El trabajo propone un modelo de valoración de opciones reales secuenciales sobre la base del modelo cuatrinomial de opciones exóticas del tipo arco iris, o de múltiple fuente de incertidumbre, con volatilidad de mercado cambiante. El modelo supone fuentes de incertidumbre independientes relativas al riesgo de mercado y el riesgo tecnológico, con un modelo numérico cuatrinomial. El riesgo de mercado se supone variable en el tiempo, disminuyendo en la medida de obtener mayor información a través de la resolución de la incertidumbre tecnológica. Para ello se emplea el método de casos en administración, adaptando el ejemplo presentado por Shockley *et al.* (2003) y Brous (2011). Este versa sobre un proyecto para el desarrollo de una vacuna, donde las secuencias y protocolos demandan cinco etapas de decisión con exposición a incertidumbre tecnológica y de mercado. A su vez sirve para exponer la complejidad, tiempo e incertidumbres a las cuales se encuentra expuestas este tipo de proyecto; como plazos y pruebas a los cuales se encuentran sujetos. Por ello se presenta la alternativa acelerada de inversión para el desarrollo del medicamento, tal cual acontece en épocas de pandemias, donde la sociedad requiere respuestas a las necesidades prioritarias como la salud.

El caso es valorado empleando diferentes técnicas como árboles de decisión, enfoque binomial con opciones secuenciales, modelo cuatrinomial con volatilidad constante y finalmente el modelo cuatrinomial con volatilidad de mercado variable.

Analizando estrictamente los resultados obtenidos, el modelo binomial tiende a sobrevalorar este tipo de proyecto. El modelo cuatrinomial, desde lo analítico, aborda la valoración diferenciando riesgos y permitiendo variaciones en la volatilidad de mercado en función de la curva de aprendizaje y resolución de incertidumbre tecnológicas.

Desde el punto de vista financiero, se destaca la necesidad de apoyo financiero como legal del sector público al privado y académico en este tipo de proyecto, más aun en economías emergentes. Quizá la anatomía y estructura de inversiones y riesgos presentada en este caso permite reflexionar sobre la necesidad de políticas públicas sustentables en salud. En especial en economías emergentes, apoyando desde lo financiero y legal al sector privado y académico, en especial cuando se deben brindar respuestas rápidas a la sociedad.

El trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2, a partir del modelo binomial, se exponen los coeficientes equivalentes ciertos, probabilidades “reales”, el modelo cuatrinomial y la volatilidad cambiante en el modelo cuatrinomial. La sección 3 presenta el caso y la valoración con árboles de decisiones, binomial, cuatrinomial y cuatrinomial con volatilidad cambiante. Se expone comparativamente un cuadro de etapas aceleradas, en situación de pandemia considerando solamente incertidumbres tecnológicas. Finalmente se presentan las principales conclusiones.

## 2. Marco teórico: desarrollo del modelo cuatrinomial y volatilidad cambiante

En la presente sección se desarrollan los diferentes modelos, partiendo del clásico modelo binomial hasta llegar el modelo propuesto, donde las fuentes de incertidumbre son múltiples y las volatilidades cambiantes.

### 2.1 El modelo binomial

El supuesto simplificador del modelo binomial lo constituye el hecho de resumir todos los riesgos del proyecto en un valor de volatilidad ( $\sigma$ ), constante a lo largo del tiempo.

$$u = e^{\sigma\sqrt{t}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$d = \frac{1}{u} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$p = (e^{rt} - d)/(u - d) \quad \text{Ecuación 3}$$

El valor esperado correspondiente a cada nodo es

$$V_t = \{p \times V_{t+1}^u + (1 - p) \times V_{t+1}^d\} \times e^{-rt} \quad \text{Ecuación 4}$$

En términos generales el modelo queda planteado de la siguiente manera,

$$V_0 = \left[ \sum_{j(T)=0}^{j(T)=n} \max(V_{j(T)} - X) \frac{n!}{j!(n-j)!} p^j (1-p)^{n-j} \right] e^{-rT} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $\max(V_{j(T)} - X)$  representa el valor terminal de la opción en el horizonte  $T$ , ponderado por las probabilidades obtenidas a partir de la combinatoria correspondiente al periodo  $n$ , nodo  $j$ , luego actualizado al tipo sin riesgo. En el caso de trabajar con probabilidades objetivas o del mundo real<sup>1</sup> (Arnold & Crack, 2003; Milanesi, 2011), los coeficientes se expresan tal como se indica en la ecuación 6.

$$q = (e^k - d)/(u - d) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $k$  representa la tasa de costo de capital y  $q$  la probabilidad de éxito binomial. El proceso recursivo expresado en la ecuación 7.

$$V_t = \left\{ [q \times V_{t+1}^u + (1 - q) \times V_{t+1}^d] - \left[ \frac{V_{t+1}^u - V_{t+1}^d}{u - d} \times (e^k - e^{rt}) \right] \right\} \times e^{-rt} \quad \text{Ecuación 7}$$

<sup>1</sup> Utilizar probabilidades reales presenta el inconveniente relacionado con el cálculo de la tasa de costo de oportunidad, a menudo difícil de calcular para activos o estrategias carentes de títulos financieros negociados en el mercado de capitales que reflejen el riesgo de los flujos correspondientes al proyecto.

## 2.2 El modelo cuatrinomial

En muchos emprendimientos de base tecnología existe una marcada separación entre el riesgo de mercado y el riesgo tecnológico, es incorrecto resumirlos en una única cifra. A continuación, es desarrollada la estructura del modelo de opciones cuatrinomial con probabilidades no correlacionadas, para valorar opciones arco iris.

Siguiendo a Copeland & Antikarov (2003) se puede asumir que el valor del proyecto es una función de dos fuentes de incertidumbre,  $V = (F_1; F_2)$ . Cada una de estas fuentes de riesgo evolucionan según su volatilidad la cual permite calcular los respectivos movimientos ascendentes y descendentes, planteadas como  $F_1(\sigma_1; u_1; d_1)$  y  $F_2(\sigma_2; u_2; d_2)$ .

En muchos problemas de valuación las fuentes de incertidumbre son independientes. Por ejemplo,  $F_m$  representa la incertidumbre de mercado y  $F_t$  representa la incertidumbre relativa a la resolución de problemas tecnológicos.

El primer paso del proceso consiste en proyectar el recorrido del subyacente, representado por el valor actual del proyecto. La proyección se realiza con los movimientos ascendentes y descendentes propios del riesgo de mercado ( $F_m(\sigma_m; u_m; d_m)$ ,  $V_{t+1} = \{V_t \times u_m; V_t \times d_m\}$ ).

El proceso recursivo para estimar valores esperados requiere de estimar los coeficientes equivalentes ciertos. Primero deben calcularse las probabilidades neutrales al riesgo siguiendo la lógica del modelo binomial. Una vez obtenidos los cuatro coeficientes equivalentes ciertos, un par por cada fuente de incertidumbre,  $F_m(p_{um}; p_{dm})$  y  $F_t(p_{ut}; p_{dt})$ , a continuación se deben calcular los coeficientes combinados. Estos se obtienen mediante el producto de los coeficientes equivalentes ciertos calculados para cada una de las fuentes de riesgo (ecuaciones 8).

$$p_{um,ut} = (p_{um} \times p_{ut}) \quad \text{Ecuación 8.1}$$

$$p_{um,dt} = (p_{um} \times p_{dt}) \quad \text{Ecuación 8.2}$$

$$p_{dm,ut} = (p_{dm} \times p_{ut}) \quad \text{Ecuación 8.3}$$

$$p_{dm,dt} = (p_{dm} \times p_{dt}) \quad \text{Ecuación 8.4}$$

El cálculo del valor esperado obtenido de la exposición de los riesgos combinados y tratados de manera separada resulta de la ecuación 9.

$$V_t = \{p_{um,ut} \times V_{t+1}^{um,ut} + p_{um,dt} \times V_{t+1}^{um,dt} + p_{dm,ut} \times V_{t+1}^{dm,ut} + p_{dm,dt} \times V_{t+1}^{dm,dt}\} \times e^{-rt} \quad \text{Ecuación 9}$$

## 2.3 Modelo cuatrinomial y volatilidad de mercado variable

Resuelto el tratamiento específico de riesgos tecnológicos y de mercado no se debe perder de vista el hecho de que, a menudo, la evidencia histórica permite estimar riesgos tecnológicos que varían según las etapas y grados de avance. Si bien se suele suponer que el riesgo de mercado permanece constante en realidad, a medida que se avanza con la resolución tecnológica del proyecto, puede verse reducida la incertidumbre de mercado. Algunos de los motivos residen en la mayor información y experiencia obtenida durante el desarrollo y las pruebas.

En tal sentido, adaptando los modelos de Haahtela (2011) y Milanesi, Pesce y El Alabi (2014) se propone desarrollar un modelo cuatrinomial con volatilidad de mercado variable. En este caso deben calcularse coeficientes neutrales al riesgo de mercado variables y nuevas probabilidades neutrales combinadas cuatrinomiales.

Primero se calculan las probabilidades de transición para los máximos niveles de volatilidad (ecuación 10).

$$p_{m,(max)} = \frac{e^{r\Delta t} - d_{m,(max)}}{u_{m,(max)} - d_{m,(max)}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Las probabilidades de transición máximas ( $p_{m,(max)}$ ), surgen a partir de los coeficientes  $u_{m,(max)}$  y  $d_{m,(max)}$  empleando la máxima volatilidad de mercado  $\sigma_{m,(max)}$ ; propia de los primeros años cuando la incertidumbre y falta de información es mayor. Luego debe estimarse las probabilidades de transición para los periodos de volatilidad de mercado intermedia y menor ( $\sigma_{im}$ ),

$$p_{m(\sigma_{im})} = p_{m(max)} \left( \frac{\sigma_{im}}{\sigma_{m(max)}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 11}$$

El proceso de valoración es similar al referido en el modelo cuatrinomial, con volatilidad de mercado constante. Primero se proyecta la rejilla binomial correspondiente al valor del subyacente. Se emplean los máximos coeficientes de ascenso y descenso,  $V_{t+1}^{i,j} = V_t^{i,j} \times u_{m,(max)}$ ;  $V_t^{i,j} \times d_{m,(max)}$ .

El modelo cuatrinomial con fuentes de incertidumbre independientes la lógica para la estimación de los coeficientes es similar al modelo con volatilidad constante.

Siendo  $p_{(t)u,d}$  los coeficientes de ascenso y descenso para la incertidumbre tecnológica y  $p_{(m;\sigma_{im})u,d}$  coeficientes variables para la incertidumbre de mercado, las probabilidades combinadas quedan expresadas en las ecuaciones 12.

$$p_{u(m;\sigma_{im});u(t)} = (p_{u(\sigma_{im})} \times p_{u(t)}) \quad \text{Ecuación 12.1}$$

$$p_{u(m;\sigma_{im});d(t)} = (p_{u(\sigma_{im})} \times p_{d(t)}) \quad \text{Ecuación 12.2}$$

$$p_{d(m;\sigma_{im});u(t)} = (p_{d(\sigma_{im})} \times p_{u(t)}) \quad \text{Ecuación 12.3}$$

$$p_{d(m;\sigma_{im});d(t)} = (p_{d(\sigma_{im})} \times p_{d(t)}) \quad \text{Ecuación 12.4}$$

Obtenidos los coeficientes estos son empleados en la determinación del valor actual para cada nodo expuesto a las dos fuentes de incertidumbre, conforme se expresa en la ecuación 13.

$$V_t = \left\{ p_{u(m;\sigma_{im});u(t)} \times V_{t+1}^{u(m;\sigma_{im}),u(t)} + p_{u(m;\sigma_{im});d(t)} \times V_{t+1}^{u(m;\sigma_{im}),d(t)} \right. \\ \left. + p_{d(m;\sigma_{im});u(t)} \times V_{t+1}^{d(m;\sigma_{im}),u(t)} + p_{d(m;\sigma_{im});d(t)} \times V_{t+1}^{d(m;\sigma_{im}),d(t)} \right\} \times e^{-rt} \quad \text{Ecuación 13}$$

### 3. Análisis de caso: Opciones secuenciales y el desarrollo de una vacuna

Con el fin de analizar en profundidad el comportamiento del modelo, entender las diferencias de resultados, sus alcances y limitaciones en la representación del valor esperado se utiliza la técnica de estudio de casos en administración (Castro Monge, 2010).

El caso seleccionado es una adaptación al caso discutido oportunamente por Shockley *et al.* (2003) y Brous (2011), relativo al proceso secuencial de desarrollo de una vacuna. El caso permite entender las etapas general, la secuencialidad, el tiempo involucrado, las profundas incertidumbres tecnológicas del proyecto y la exposición al riesgo de mercado. En el caso de economías emergentes, las diferentes las fuentes de incertidumbre, la cuantía de las inversiones involucradas y el tamaño del mercado de capitales hacen que estos emprendimientos sean de alto riesgo para ser realizados sólo por agentes privados. Asimismo, se expone la secuencia y riesgos comprendidos en el supuesto de acelerar la secuencia de pasos que componen el desarrollo del proyecto.

La empresa se especializa en biotecnología y requiere evaluar el beneficio económico derivado de invertir en el desarrollo de una nueva tecnología para vacunas contra un virus determinado. La primera inversión se encuentra condicionada al beneficio esperado positivo, analizada la secuencia de pasos.

Los procesos para el desarrollo de este tipo de inversiones son complejos, en este caso constan de cinco etapas secuenciales entre sí, donde la probabilidad final de éxito para la producción y comercialización del medicamento es baja y diferida en el tiempo. A continuación, son expuestas las etapas del proyecto:

Primera etapa: desarrollo de pruebas preclínicas y prototipo de vacuna. Duración de la fase: 18 meses, inversión demandada \$2 millones. Considerando los resultados históricos sobre pruebas similares, existe un 95% de probabilidades de abandono o fracaso.

Segunda etapa: superada la fase de prototipo comienza el proceso de autorización otorgada por el organismo de control de la salud para realizar las pruebas experimentales sobre población controlada. Duración de la fase de obtención de permisos 6 meses, inversión demandada \$1 millón. La evidencia indica que en el 75% de los casos los permisos son otorgados.

Tercera etapa: Obtenido el permiso comienzan las pruebas masivas en animales. Los tests tienen una duración de 24 meses y demandan una inversión de \$ 5 millones. Los exámenes tienen por fin generar una cantidad de datos significativos estadísticamente, relativos a la eficacia de la droga, para su posterior etapa de desarrollo comercial. La evidencia empírica sugiere una probabilidad de fracaso del 75%.

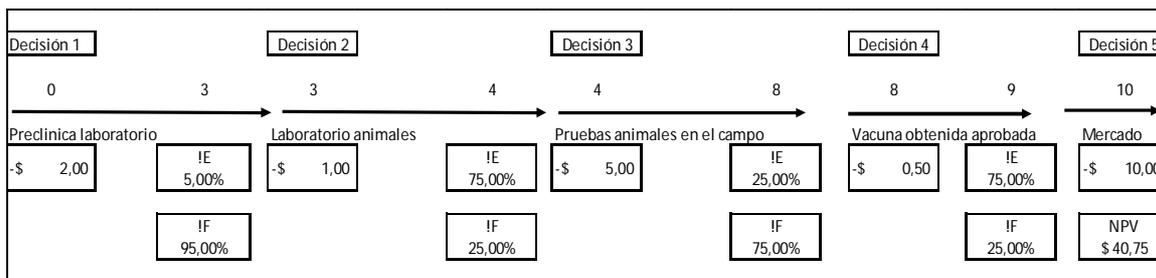
Cuarta etapa: Si los tests anteriores arrojan resultados alentadores y la etapa es superada, se obtiene la autorización de parte del organismo de control para el desarrollo de la nueva droga animal. Los permisos demoran aproximadamente 12 meses con una inversión \$ 0.5 millones. Obtenida la autorización, la gerencia asigna una probabilidad subjetiva del 75% de éxito para la comercialización de la nueva droga.

Quinta etapa: Superada las cuatro etapas anteriores se lanza al mercado el producto, los costos de desarrollo son de \$ 10 millones y el valor actual de los flujos de fondos esperados

asciende a \$50,75 millones, con una tasa de costo de capital del 11,26%. La vida útil de la droga se estima en 10 años,

Cada una de las etapas es una opción secuencial donde la continuidad del proyecto se condiciona con el éxito de la etapa precedente. En la ilustración 1 se presenta la forma expansiva del árbol de decisión.

Ilustración 1: Diagrama del árbol de decisiones



Seguidamente, el problema de decisión se analiza mediante árboles de decisión, rejillas binomiales, rejillas cuatrinomiales y rejillas cuatrinomiales con volatilidad cambiante.

### 3.1 Árboles de decisiones

La resolución del árbol de decisiones planteado en la ilustración 1 requiere, en primer lugar, identificar las probabilidades de ocurrencia asociadas a cada evento. Para cada etapa, la probabilidad asociada es del producto entre la probabilidad de éxito en dicha fase, condicionada a las probabilidades de éxito en las precedentes. Una vez estimadas se procede a calcular el flujo probable, para luego actualizarlos flujos esperados empleando la tasa de costo de capital. La sumatoria de los flujos actuales representa el valor esperado. En la tabla 1 se expone el proceso y los resultados.

Tabla 1: Árbol de decisión probabilidades condicionales de éxito-éxito

| Etapas            | $P(x) E! t-1$ | $P(x) E! * P(x) E! t-1$ | FFL       | $P(x) x FFL$ | $E(NPV)$   |
|-------------------|---------------|-------------------------|-----------|--------------|------------|
| Laboratorio       | 100%          | 100%                    | -\$ 2,000 | -2,000       | -\$ 2,0000 |
| Autorización      | 5%            | 5%                      | -\$ 1,000 | -0,050       | -\$ 0,0426 |
| Experimental      | 75%           | 3,750%                  | -\$ 5,000 | -0,188       | -\$ 0,1515 |
| Aprobación vacuna | 25%           | 0,93750%                | -\$ 0,500 | -0,005       | -\$ 0,0031 |
| Mercado           | 75%           | 0,70313%                | \$ 40,747 | 0,287        | \$ 0,1681  |
| Resultados        |               |                         |           | E(NPV)       | -\$ 2,0291 |

Otra manera de resolver el árbol consiste en estimar el valor actual acumulado en cada etapa hasta llegar al valor actual acumulado total en la última. Cada etapa se multiplica por la probabilidad de ocurrencia condicional de fracaso dado el éxito precedente. Finalmente, la suma de los valores actuales arroja el valor esperado total, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Árbol de decisión probabilidades condicionales de fracaso-éxito

| Etapas            | $P(x) E!$ | $P(x) F!$ | Estadio | $E! * F!$ (final)   | NPV acum | $E(NPV)$   |
|-------------------|-----------|-----------|---------|---------------------|----------|------------|
| Laboratorio       | 0,05      | 0,95      | 95,000% | F!                  | -\$ 2,00 | -\$ 1,90   |
| Autorización      | 0,75      | 0,25      | 1,250%  | $E! * F!$           | -\$ 2,85 | -\$ 0,04   |
| Experimental      | 0,25      | 0,75      | 2,813%  | $E! * E! * F!$      | -\$ 6,89 | -\$ 0,19   |
| Aprobación vacuna | 0,75      | 0,25      | 0,234%  | $E! * E! * E! * F!$ | -\$ 7,22 | -\$ 0,02   |
| Mercado           |           |           | 0,703%  | $E! * E! * E! * E!$ | \$ 16,69 | \$ 0,12    |
| Resultados        |           |           | 100,00% |                     | $E(NPV)$ | -\$ 2,0291 |

El valor esperado asciende a -\$2,029 millones conduciendo al rechazo del proyecto. La valuación tradicional mediante árboles de decisiones presenta la inconsistencia de la tasa de actualización. En efecto, emplea la misma tasa de actualización en el proceso de valuación de las ramas, en este caso las diferentes fases, cuando en realidad cada una de estas representan diferentes estrategias; como consecuencia de ello distintos riesgos asociados <sup>2</sup> (Smith & Nau, 1995; Copeland & Antikarov, 2003). Es por ello que el enfoque de valuación con opciones reales resuelve tal error, permitiendo ajustar por riesgo los flujos de fondos empleando una tasa libre de riesgo para actualizar. En otras palabras, un enfoque gerencial orientado a la toma de decisiones.

### 3.2 Valuación con opciones reales. El modelo binomial

Siguiendo con el ejemplo se supone una tasa libre de riesgo del 5% y volatilidad estimada mediante simulación del 100%, suponiendo que dicha volatilidad resume todos los riesgos a los cuales se encuentra expuesto el proyecto. Tasa libre de riesgo y volatilidad son las dos variables básicas para proyectar el proceso estocástico del activo. Los parámetros del modelo binomial son calculados con las ecuaciones 1 a 3, siendo  $u = 2,028$ ;  $d = 0,493$ ;  $p = 0,3467$  y  $1 - p = 0,6532$ . La proyección de la rejilla binomial comienza con el valor actual de los flujos del proyecto  $e$ . Se parte del valor esperado en  $t=10$ , actualizado a  $t=0$  siendo  $\$29,8 = \$40,75 \times e^{-0,1126 \times 10}$ . La ecuación 4 se utiliza para la proyección de la rejilla binomial. La tabla 3 muestra el cálculo.

Al resultado  $\$29,8$  se puede arribar utilizando la lógica del valor actual mediante la ecuación 5. Para ello deben calcularse las probabilidades correspondientes al último nodo. Del mismo modo, también pueden emplearse las probabilidades reales, en este caso con la ecuación 6 donde,  $q = 0,368$  y  $1 - q = 0,632$ . Las expresiones son similares salvo por el hecho

<sup>2</sup> La tasa del costo del capital, estimada con modelos de equilibrio como el CAPM (*capital asset pricing model*), se construye con información de mercado contenida en títulos financieros negociados. Estas remuneran por asumir riesgos sistemáticos en estrategias de inversión de carteras eficientemente diversificada. El inversor no participa activamente de las decisiones gerenciales. En tal sentido, la tasa obtenida refleja riesgos sistémicos propios de la empresa en marcha, pero no de las estrategias potenciales de la empresa.

Tabla 3: Proceso binomial correspondiente al proyecto

|                |      |       |       |       |        |        |        |        |         |         |
|----------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 0              | 1    | 2     | 3     | 4     | 5      | 6      | 7      | 8      | 9       | 10      |
| <b>\$ 29,8</b> | 60,4 | 122,5 | 248,3 | 503,7 | 1021,5 | 2071,7 | 4201,7 | 8521,6 | 17282,8 | 35051,4 |
|                | 14,7 | 29,8  | 60,4  | 122,5 | 248,3  | 503,7  | 1021,5 | 2071,7 | 4201,7  | 8521,6  |
|                |      | 7,2   | 14,7  | 29,8  | 60,4   | 122,5  | 248,3  | 503,7  | 1021,5  | 2071,7  |
|                |      |       | 3,6   | 7,2   | 14,7   | 29,8   | 60,4   | 122,5  | 248,3   | 503,7   |
|                |      |       |       | 1,8   | 3,6    | 7,2    | 14,7   | 29,8   | 60,4    | 122,5   |
|                |      |       |       |       | 0,9    | 1,8    | 3,6    | 7,2    | 14,7    | 29,8    |
|                |      |       |       |       |        | 0,4    | 0,9    | 1,8    | 3,6     | 7,2     |
|                |      |       |       |       |        |        | 0,2    | 0,4    | 0,9     | 1,8     |
|                |      |       |       |       |        |        |        | 0,1    | 0,2     | 0,4     |
|                |      |       |       |       |        |        |        |        | 0,1     | 0,1     |
|                |      |       |       |       |        |        |        |        |         | 0,0     |

de que en la ecuación 6 se utilizan probabilidades reales y tasa de costo de capital. La tabla 4 presenta la distribución de probabilidad en el último nodo y el valor actual obtenido por ambos caminos. Equivalentes ciertos,  $VA = \sum_{i=0}^n (V_{i,T} \times p_i) \times e^{-rt}$ ; probabilidades reales,  $VA = \sum_{i=0}^n (V_{i,T} \times q_i) \times e^{-kt}$

Tabla 4: Valor actual neto con equivalentes ciertos y probabilidades “reales”

| 10      | Nodos  | P=(Equiv.Cierto)                            | Q=(Reales) |
|---------|--|---|------------|
| 35051,4 | 10   | 0,003%                                      | 0,005%     |
| 8521,6  | 9  | 0,047%                                      | 0,078%     |
| 2071,7  | 8  | 0,401%                                      | 0,604%     |
| 503,7   | 7  | 2,016%                                      | 2,767%     |
| 122,5   | 6  | 6,646%                                      | 8,317%     |
| 29,8    | 5  | 15,025%                                     | 17,144%    |
| 7,2     | 4  | 23,591%                                     | 24,541%    |
| 1,8     | 3  | 25,398%                                     | 24,088%    |
| 0,4     | 2  | 17,945%                                     | 15,516%    |
| 0,1     | 1  | 7,513%                                      | 5,923%     |
| 0,0     | 0  | 1,416%                                      | 1,017%     |
|         |  | 100%  | 100%       |
| VAN=    | $\sum P_j \cdot V_j \cdot \exp(-rf \cdot t)$ | \$ 29,8                                     |            |
|         | VAN=   | $\sum P_j \cdot V_j \cdot \exp(-k \cdot t)$ | \$ 29,8    |

Las probabilidad binomial  $q$  es una magnitud “optimista” comparada con los coeficientes equivalentes ciertos  $p$ . Es así debido a que los últimos tienen contenido el ajuste por riesgo mientras que los primeros realizan el ajuste empleando una tasa ajustada por riesgo (Milanesi 2011). Operativamente la valuación con opciones reales requiere del uso de los coeficientes equivalentes ciertos, dadas las limitaciones para determinar tasas que reflejen el riesgo de las estrategias contenidas en un problema de decisión.

En este caso el proceso recursivo de valoración implica puntos de decisión donde se presenta la opción de continuar, en el caso de que los flujos sean positivos, o abandonar siendo la expresión;

$$V_t = \text{Max}\{(p \times V_{t+1}^u + (1 - p) \times V_{t+1}^d) \times e^{-rt} - I_t; 0\} \quad \text{Ecuación 14}$$

Los periodos de tiempo correspondiente a las decisiones con  $t=10; 8; 4; 3$  y  $0$ . En la tabla 5 se expone la rejilla binomial resaltando en negritas e itálicas los puntos de decisión,

Tabla 5: Valuación de opciones secuenciales rejilla binomial

| 0                    | 1    | 2     | 3            | 4            | 5      | 6      | 7      | 8             | 9       | 10             |
|----------------------|------|-------|--------------|--------------|--------|--------|--------|---------------|---------|----------------|
| <b>\$ 19,8</b>       | 49,7 | 109,9 | <b>234,4</b> | <b>489,8</b> | 1012,2 | 2062,2 | 4192,0 | <b>8511,6</b> | 17273,0 | <b>35041,4</b> |
|                      | 7,8  | 19,7  | <b>48,1</b>  | <b>109,5</b> | 239,3  | 494,2  | 1011,7 | <b>2061,7</b> | 4192,0  | <b>8511,6</b>  |
|                      |      | 1,8   | <b>5,4</b>   | <b>19,0</b>  | 52,7   | 113,4  | 238,6  | <b>493,7</b>  | 1011,8  | <b>2061,7</b>  |
|                      |      |       | <b>0,0</b>   | <b>0,0</b>   | 9,6    | 22,6   | 51,3   | <b>112,4</b>  | 238,6   | <b>493,7</b>   |
| <b>VA: -\$2,03</b>   |      |       |              | <b>0,0</b>   | 1,2    | 3,1    | 8,2    | <b>20,9</b>   | 50,6    | <b>112,5</b>   |
| <b>VAOR: \$21,84</b> |      |       |              |              | 0,1    | 0,2    | 0,6    | <b>1,8</b>    | 6,7     | <b>19,8</b>    |
| <b>VAE: \$19,82</b>  |      |       |              |              |        | 0,0    | 0,0    | <b>0,0</b>    | 0,0     | <b>0,0</b>     |
|                      |      |       |              |              |        |        | 0,0    | <b>0,0</b>    | 0,0     | <b>0,0</b>     |
|                      |      |       |              |              |        |        |        | <b>0,0</b>    | 0,0     | <b>0,0</b>     |
|                      |      |       |              |              |        |        |        |               | 0,0     | <b>0,0</b>     |
|                      |      |       |              |              |        |        |        |               |         | <b>0,0</b>     |

El valor actual obtenido con el árbol de decisión responde a la lógica del VAN tradicional, el cual asciende a -\$2,03 mientras que el valor estratégico (VAE), incorpora la flexibilidad de abandono y no exposición a pérdidas irreversibles. Este asciende a \$19,82, de allí que el valor de la flexibilidad estratégica o posibilidad de abandonar es \$21,84 ( $VAE = VA + VAOR$ ).

La tabla 6 describe la probabilidad neutral y “real” vinculada con cada nodo y, de manera analítica, la decisión a tomar, además de la probabilidad total de cada decisión.

Los puntos críticos son los periodos 4 y 10, ya que las probabilidades de continuar o lanzar son sensiblemente inferiores a la de continuar.

### 3.3 Valuación con opciones arco iris. El modelo cuatrinomial

En el modelo binomial todo el riesgo del proyecto se sintetizaba en la volatilidad. Asumir que el desvío de las ventas sintetiza toda la incertidumbre es un supuesto simplificador, útil para situaciones donde todo el riesgo deviene del mercado. En este caso, el riesgo de mercado solamente explica la incertidumbre relacionada con el éxito comercial derivado de la quinta etapa. No obstante, hasta llegar a la comercialización del producto deben trasuntar una línea temporal de secuencias, cuyo suceso encuentra correlato en riesgos tecnológicos no correlacionados con los de mercado.

Analíticamente el enfoque utilizado es el cuatrinomial con riesgos no correlacionados, siendo menester el uso de opciones exóticas del tipo arco iris. Los coeficientes equivalentes ciertos se obtienen aplicando las ecuaciones 8.1 a 8.4. Los riesgos tecnológicos para cada etapa son los empleados para el árbol: laboratorio (éxito: 5%, fracaso: 95%); autorización (éxito:

Tabla 6: Decisiones y probabilidades acumuladas con opciones secuenciales

C continuar, A abandono, L lanzamiento,  $P_j$  coeficientes equivalentes ciertos y  $Q_j$  probabilidades "reales"

| 3        | N | $P_j$        | $Q_j$        | 4        | N | $P_j$        | $Q_j$        | 8        | N | $P_j$        | $Q_j$        | 10       | N  | $P_j$        | $Q_j$        |
|----------|---|--------------|--------------|----------|---|--------------|--------------|----------|---|--------------|--------------|----------|----|--------------|--------------|
| C        | 3 | 4,2%         | 5,0%         | C        | 4 | 1,4%         | 1,8%         | C        | 8 | 0,0%         | 0,0%         | L        | 10 | 0,0%         | 0,0%         |
| C        | 2 | 23,6%        | 25,7%        | C        | 3 | 10,9%        | 12,6%        | C        | 7 | 0,3%         | 0,5%         | L        | 9  | 0,0%         | 0,1%         |
| C        | 1 | 44,4%        | 44,1%        | C        | 2 | 30,8%        | 32,5%        | C        | 6 | 2,1%         | 2,8%         | L        | 8  | 0,4%         | 0,6%         |
| A        | 0 | 27,9%        | 25,2%        | A        | 1 | 38,7%        | 37,2%        | C        | 5 | 7,8%         | 9,5%         | L        | 7  | 2,0%         | 2,8%         |
| <b>C</b> |   | <b>72,1%</b> | <b>74,8%</b> | A        | 0 | 18,2%        | 16,0%        | C        | 4 | 18,4%        | 20,5%        | L        | 6  | 6,6%         | 8,3%         |
| <b>A</b> |   | <b>27,9%</b> | <b>25,2%</b> | <b>C</b> |   | <b>43,1%</b> | <b>46,9%</b> | C        | 3 | 27,8%        | 28,1%        | L        | 5  | 15,0%        | 17,1%        |
|          |   |              |              | <b>A</b> |   | <b>56,9%</b> | <b>53,1%</b> | A        | 2 | 26,2%        | 24,2%        | A        | 4  | 23,6%        | 24,5%        |
|          |   |              |              |          |   |              |              | A        | 1 | 14,1%        | 11,9%        | A        | 3  | 25,4%        | 24,1%        |
|          |   |              |              |          |   |              |              | A        | 0 | 3,3%         | 2,5%         | A        | 2  | 17,9%        | 15,5%        |
|          |   |              |              |          |   |              |              | <b>C</b> |   | <b>56,4%</b> | <b>61,4%</b> | A        | 1  | 7,5%         | 5,9%         |
|          |   |              |              |          |   |              |              | <b>A</b> |   | <b>43,6%</b> | <b>38,6%</b> | A        | 0  | 1,4%         | 1,0%         |
|          |   |              |              |          |   |              |              |          |   |              |              | <b>L</b> |    | <b>24,1%</b> | <b>28,9%</b> |
|          |   |              |              |          |   |              |              |          |   |              |              | <b>A</b> |    | <b>75,9%</b> | <b>71,1%</b> |

75%, fracaso: 25%); experimental (éxito: 25%; fracaso: 75%), finalmente aprobada la vacuna y superado los riesgos tecnológicos comienza la fase de mercado. Al segregarse los riesgos, se supone que la volatilidad del proyecto producto solamente de la incertidumbre de mercado es del 50%. En ese sentido, los parámetros son:  $u = 1,424$ ;  $d = 0,7021$ ;  $p = 0,4475$  y  $1 - p = 0,5524$ . La tabla 7 sistematiza las etapas de resolución correspondiente a incertidumbre tecnológica, de mercado, distribuciones de probabilidad y equivalentes ciertos.

Tabla 7: Resolución de incertidumbres y etapas del proyecto

| Periodo | Resolución tecnológica | Proceso                    | $p_u$  | $p_d$  | $p_{u1u2}$ | $p_{u1d2}$ | $p_{d1u1}$ | $p_{d1d2}$ |
|---------|------------------------|----------------------------|--------|--------|------------|------------|------------|------------|
| 0       |                        | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |
| 1       |                        | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |
| 2       |                        | Q1: basada en Laboratorio  |        |        | 0,0224     | 0,0276     | 0,4252     | 0,5248     |
| 3       | Laboratorio            | Q2: basada en Autorización |        |        | 0,3357     | 0,4143     | 0,1119     | 0,1381     |
| 4       | Autorización           | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |
| 5       |                        | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |
| 6       |                        | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |
| 7       |                        | Q3: basada en Experimental |        |        | 0,1119     | 0,1381     | 0,3357     | 0,4143     |
| 8       | Experimental           | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |
| 9       |                        | Q4: basada en Aprobación   |        |        | 0,3357     | 0,4143     | 0,1119     | 0,1381     |
| 10      | Aprobación vacuna      | B                          | 0,4476 | 0,4476 |            |            |            |            |

El proceso cuatrinomial (Q) se aplica para los nodos que preceden la finalización de una fase de pruebas, la exposición al riesgo al éxito/fracaso tecnológico es develada en la fase posterior. Recursivamente, en  $t=10$  se proyecta la comercialización, una vez resuelta la autorización lograda en  $t=9$ , etapa donde se encuentra contenida toda la exposición a dicho riesgo. De allí que el periodo  $t=9$  debe resolverse con utilizando una distribución cuatrinomial.

En el caso del periodo  $t=8$ , finaliza la fase experimental, que de ser exitosa permite avanzar a la etapa de autorización. La exposición al éxito o fracaso de la fase experimental se manifiesta en el periodo  $t=7$ . Consecuentemente el proceso recursivo de  $t=8$  a  $t=7$  es cuatrinomial. En el periodo  $t=4$  se obtiene la autorización para implementar la fase experimental, estando la firma expuesta a tal incertidumbre tecnológica en el periodo  $t=3$ .

Desde el periodo  $t=4$  hasta  $t=3$  la resolución de la incertidumbre es cuatrinomial. En  $t=3$  se inician las gestiones para obtener la autorización con el fin de proseguir los experimentos, condicionado al éxito tecnológico de las pruebas de laboratorio, resolución acontecida en  $t=2$ . Consecuentemente desde el periodo  $t=3$  hasta  $t=2$  la distribución a emplear es cuatrinomial.<sup>3</sup>

Los periodos  $t=10, 8, 6, 5, 4, 1, 0$  se resuelven con los coeficientes equivalentes ciertos binomiales. En estos casos no existe riesgo tecnológico, pues ya fue resuelto en la etapa previa, el proyecto prosigue en función a su valor esperado de mercado.<sup>4</sup>

Seguidamente se exponen las expresiones utilizadas para resolver las rejillas cuatrinomiales y binomiales:

- Para resolver los nodos expuestos a riesgos tecnológicos y de mercado ( $t=9,7,3,2$ ):  

$$V_t = (p_{u1u2} \times V_{t+1}^{u1,u2} + p_{u1d2} \times V_{t+1}^{u1,d2} + p_{d1u2} \times V_{t+1}^{d1,u2} + p_{d1d2} \times V_{t+1}^{d1,d2}) \times e^{-rt}$$
 En el nodo  $t=3$  se resuelve la opción de continuar, con la respectiva autorización, por lo tanto,  $V_t = \text{Max}\{(p_{u1u2} \times V_{t+1}^{u1,u2} + p_{u1d2} \times V_{t+1}^{u1,d2} + p_{d1u2} \times V_{t+1}^{d1,u2} + p_{d1d2} \times V_{t+1}^{d1,d2}) \times e^{-rt} - I; 0\}$
- Para resolver el nodo  $t=10$ , en donde se ejercita la opción de lanzamiento o abandono:  

$$\text{si } T^! = 1, \text{ entonces, } \text{Max}(V_{i,T} - I_t; 0);$$
 donde  $T^! = 1$  representa el éxito tecnológico, caso contrario el valor es cero.
- Para resolver el resto de los nodos donde se ejercitan opciones intermedias, resuelta la cuestión tecnológica y sujeta solamente al riesgo de mercado:  

$$\text{si } T^! = 1, \text{ entonces, } \text{Max}\{(p \times V_{t+1}^u + (1 - p) \times V_{t+1}^d) \times e^{-rt} - I_t; 0\};$$
 donde  $T^! = 1$  representa el éxito tecnológico, caso contrario el valor es cero.

<sup>3</sup> Puntualmente, en  $t=9$  se resuelve recursivamente desde  $t=10$  con los coeficientes cuatrinomiales basados en la aprobación (Q4);  $t=7$  se resuelve recursivamente desde  $t=8$  con los coeficientes cuadrinomiales basados en el éxito experimental (Q3);  $t=3$  se resuelve recursivamente desde  $t=4$  con los coeficientes cuatrinomiales basados en la obtención de la autorización (Q2) y  $t=2$  se resuelve recursivamente desde  $t=3$  con los coeficientes cuadrinomiales del éxito de laboratorio (Q1).

<sup>4</sup> Cabe destacar que 1 y 0 son un caso especial, pues la decisión de invertir en el desarrollo de laboratorio, es la primera decisión a tomar siempre que el valor sea positivo, cuestión resuelta cuando se completa el desarrollo y cálculo del proceso recursivo.

Las tablas 8 y 9 exponen el proceso recursivo y, en negritas e itálicas, los periodos de decisión. El valor del proyecto es cero, consecuentemente la decisión es no invertir en los estudios preclínicos y desechar el proyecto. La inversión inicial requerida de \$2 millones es superior al valor actual de los flujos de fondos esperados de todo el proyecto,  $Max\{(0.4472 \times \$0.07 + (1 - 0.4472) \times \$0) \times e^{-0.025} - 2; 0\} = 0$ ; siendo el valor actual de los flujos es  $0.4472 \times \$0.07 = \$0.03$ , (\$33.4174).

Tabla 8: *Rejilla cuatrinomial (t=10 a t=6)*

| T=6          |    |   | T=7          |           |       | T=8          |    |   | T=9          |           |        | T=10          |    |   |
|--------------|----|---|--------------|-----------|-------|--------------|----|---|--------------|-----------|--------|---------------|----|---|
| 1=S!<br>0=F! |    |   | 1=S!<br>0=F! |           |       | 1=S!<br>0=F! |    |   | 1=S!<br>0=F! |           |        | 1=S!<br>0=F!  |    |   |
| Nodo         | T! |   | Nodo         | Nodos t+1 |       | Nodo         | T! |   | Nodo         | Nodos t+1 |        | Nodo          | T! |   |
| 44,7         | 6  | 1 | 64,5         | 7         | 8 y 7 | <b>370,1</b> | 8  | 1 | 530,7        | 9         | 10 y 9 | <b>1011,5</b> | 10 | 1 |
| 0,0          | 6  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 8  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 10 | 0 |
| 21,1         | 5  | 1 | 30,8         | 6         | 7 y 6 | <b>178,6</b> | 7  | 1 | 257,9        | 8         | 9 y 8  | <b>493,7</b>  | 9  | 1 |
| 0,0          | 5  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 7  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 9  | 0 |
| 9,5          | 4  | 1 | 14,3         | 5         | 6 y 5 | <b>84,2</b>  | 6  | 1 | 123,5        | 7         | 8 y 7  | <b>238,3</b>  | 8  | 1 |
| 0,0          | 4  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 6  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 8  | 0 |
| 3,8          | 3  | 1 | 6,1          | 4         | 5 y 4 | <b>37,6</b>  | 5  | 1 | 57,2         | 6         | 7 y 6  | <b>112,5</b>  | 7  | 1 |
| 0,0          | 3  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 5  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 7  | 0 |
| 1,2          | 2  | 1 | 2,1          | 3         | 4 y 3 | <b>14,7</b>  | 4  | 1 | 24,5         | 5         | 6 y 5  | <b>50,4</b>   | 6  | 1 |
| 0,0          | 2  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 4  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 6  | 0 |
| 0,2          | 1  | 1 | 0,5          | 2         | 3 y 2 | <b>4,0</b>   | 3  | 1 | 8,4          | 4         | 5 y 4  | <b>19,8</b>   | 5  | 1 |
| 0,0          | 1  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 3  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 5  | 0 |
| 0,0          | 0  | 1 | 0,0          | 1         | 2 y 1 | <b>0,2</b>   | 2  | 1 | 1,5          | 3         | 4 y 3  | <b>4,7</b>    | 4  | 1 |
| 0,0          | 0  | 0 |              |           |       | <b>0,0</b>   | 2  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 4  | 0 |
|              |    |   | 0,0          | 0         | 1 y 0 | <b>0,0</b>   | 1  | 1 | 0,0          | 2         | 3 y 2  | <b>0,0</b>    | 3  | 1 |
|              |    |   |              |           |       | <b>0,0</b>   | 1  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 3  | 0 |
|              |    |   |              |           |       | <b>0,0</b>   | 0  | 1 | 0,0          | 1         | 2 y 1  | <b>0,0</b>    | 2  | 1 |
|              |    |   |              |           |       | <b>0,0</b>   | 0  | 0 |              |           |        | <b>0,0</b>    | 2  | 0 |
|              |    |   |              |           |       |              |    |   | 0,0          | 0         | 1 y 0  | <b>0,0</b>    | 1  | 1 |
|              |    |   |              |           |       |              |    |   |              |           |        | <b>0,0</b>    | 1  | 0 |
|              |    |   |              |           |       |              |    |   |              |           |        | <b>0,0</b>    | 0  | 1 |
|              |    |   |              |           |       |              |    |   |              |           |        | <b>0,0</b>    | 0  | 0 |

Tabla 9: *Rejilla cuatrinomial (t=5 a t=1)*

| T=0          |          | T=1          |      | T=2          |           | T=3          |           | T=4          |            | T=5          |       |             |      |   |   |
|--------------|----------|--------------|------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|------------|--------------|-------|-------------|------|---|---|
| 1=S!<br>0=F! |          | 1=S!<br>0=F! |      | 1=S!<br>0=F! |           | 1=S!<br>0=F! |           | 1=S!<br>0=F! |            | 1=S!<br>0=F! |       |             |      |   |   |
| Nodo         | T!       | Nodo         | T!   | Nodo         | Nodos t+1 | Nodo         | Nodos t+1 | Nodo         | T!         | Nodo         | T!    |             |      |   |   |
| <b>0</b>     | <b>0</b> | 1            | 0,07 | 1            | 1         | 0,15         | 2         | 3 y 2        | <b>6,2</b> | 3            | 4 y 3 | <b>16,2</b> | 4    | 1 |   |
| <b>0</b>     | <b>0</b> | 0            | 0,00 | 1            | 0         |              |           |              | <b>0,0</b> | 4            | 0     |             | 30,9 | 5 | 1 |
|              |          |              | 0,00 | 0            | 1         | 0,01         | 1         | 2 y 1        | <b>0,5</b> | 2            | 3 y 2 | <b>4,6</b>  | 3    | 1 |   |
|              |          |              | 0,00 | 0            | 0         |              |           |              | <b>0,0</b> | 3            | 0     |             | 14,4 | 4 | 1 |
|              |          |              |      |              |           | 0,00         | 0         | 1 y 0        | <b>0,0</b> | 2            | 1     |             | 6,2  | 3 | 1 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              | <b>0,0</b> | 2            | 0     |             | 0,0  | 3 | 0 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              | <b>0,0</b> | 1            | 1     |             | 2,3  | 2 | 1 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              | <b>0,0</b> | 1            | 0     |             | 0,0  | 2 | 0 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              | <b>0,0</b> | 0            | 1     |             | 0,6  | 1 | 1 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              | <b>0,0</b> | 0            | 0     |             | 0,0  | 1 | 0 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              |            |              |       |             | 0,1  | 0 | 1 |
|              |          |              |      |              |           |              |           |              |            |              |       |             | 0,0  | 0 | 0 |



La lógica de resolución correspondiente a riesgos tecnológicos es similar a la planteada precedentemente. La diferencia con la tabla 7 reside en que los coeficientes neutrales propios del riesgo de mercado no permanecen constantes. Esta circunstancia implica también recalcular los coeficientes cuatrinomiales (ecuaciones 12.1 a 12.4), lo que se muestra en la tabla 12.

Tabla 12: Resolución de incertidumbres y etapas del proyecto con volatilidad cambiante

| Periodo | Resolución tecnológica | Proceso                     | $p_u$ | $p_d$ | $p_{u1u2}$ | $p_{u1d2}$ | $p_{d1u1}$ | $p_{d1d2}$ |
|---------|------------------------|-----------------------------|-------|-------|------------|------------|------------|------------|
| 0       |                        | B                           | 0,393 | 0,607 |            |            |            |            |
| 1       |                        | B                           | 0,393 | 0,607 |            |            |            |            |
| 2       |                        | Q 1: basada en Laboratorio  |       |       | 0,0197     | 0,0303     | 0,3736     | 0,5764     |
| 3       | Laboratorio (1)        | Q 2: basada en Autorización |       |       | 0,2215     | 0,5285     | 0,0738     | 0,1762     |
| 4       | Autorización (2)       | B                           | 0,295 | 0,705 |            |            |            |            |
| 5       |                        | B                           | 0,295 | 0,705 |            |            |            |            |
| 6       |                        | B                           | 0,295 | 0,705 |            |            |            |            |
| 7       |                        | Q 3: basada en Experimental |       |       | 0,0738     | 0,1762     | 0,2215     | 0,5285     |
| 8       | Experimental (3)       | B                           | 0,175 | 0,825 |            |            |            |            |
| 9       |                        | Q 4: basada en Aprobación   |       |       | 0,1311     | 0,6189     | 0,0437     | 0,2063     |
| 10      | Aprobación vacuna (4)  | B                           | 0,175 | 0,825 |            |            |            |            |

La resolución de las opciones secuenciales se realiza recursivamente, similar al modelo cuatrinomial con volatilidad constante. En las tablas 13 y 14 se exponen las rejillas.

El resultado es consistente con el obtenido precedentemente: indica no invertir en los estudios preclínicos y abandonar el proyecto. La inversión inicial \$2 es superior al valor actual derivado de los flujos de fondos esperados en  $t=0$ ,  $Max\{(0.4472 \times \$0.01 + (1 - 0.4472) \times \$0) \times e^{-0.025} - 2; 0\} = 0$ ; siendo el valor actual  $0.4472 \times \$0.01 = \$0.004$ , (\$4.400).

Existen importantes diferencias entre los modelos analizados. El método de árboles de decisión calcula el flujo de fondos esperados por ramas con probabilidades “reales”, principalmente considerando el riesgo tecnológico. El ajuste por riesgo lo realiza con la misma tasa de costo del capital (11,26%). Estas cuestiones no reflejan la incertidumbre total que presentan todas las estrategias.

El modelo binomial valora la flexibilidad estratégica empleando coeficientes neutrales al riesgo y tasa libre de riesgo en la actualización. La volatilidad (100%) se asume alta por resumir todos los riesgos (de mercado y tecnológicos).

El modelo cuatrinomial ajusta y especifica los riesgos considerando dos fuentes: mercado con una volatilidad del 50% y tecnológicos. Por ello la decisión es opuesta al modelo binomial, ya que no sobredimensiona la volatilidad como cifra que engloba a todas las fuentes de incertidumbre.

El modelo cuatrinomial con volatilidad variable replica con mayor fidelidad la dinámica de las opciones secuenciales, la volatilidad evoluciona en forma decreciente (75%, 65%, 50%) a medida que avanza el tiempo, existe disponibilidad de información y resolución tecnológica de etapas.

Tabla 13: *Rejilla cuatrinomial volatilidad cambiante (t=10 a t=6)*

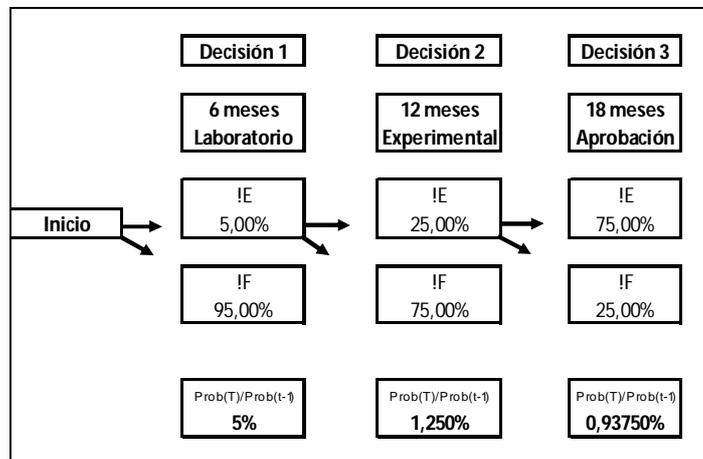
| T=7       |           |       | T=8          |    |   | T=9       |           |        | T=10          |    |   |
|-----------|-----------|-------|--------------|----|---|-----------|-----------|--------|---------------|----|---|
| 1=S! 0=F! |           |       | 1=S! 0=F!    |    |   | 1=S! 0=F! |           |        | 1=S! 0=F!     |    |   |
| Nodo      | Nodos t+1 |       | Nodo         | T! |   | Nodo      | Nodos t+1 |        | Nodo          | T! |   |
| 117,2     | 7         | 8 y 7 | <b>897,6</b> | 8  | 1 | 2008,2    | 9         | 10 y 9 | <b>5973,8</b> | 10 | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 8  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 10 | 0 |
| 39,4      | 6         | 7 y 6 | <b>305,8</b> | 7  | 1 | 690,5     | 8         | 9 y 8  | <b>2061,7</b> | 9  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 7  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 9  | 0 |
| 12,4      | 5         | 6 y 5 | <b>100,9</b> | 6  | 1 | 234,3     | 7         | 8 y 7  | <b>707,3</b>  | 8  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 6  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 8  | 0 |
| 3,1       | 4         | 5 y 4 | <b>29,9</b>  | 5  | 1 | 76,3      | 6         | 7 y 6  | <b>238,3</b>  | 7  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 5  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 7  | 0 |
| 0,4       | 3         | 4 y 3 | <b>5,4</b>   | 4  | 1 | 21,6      | 5         | 6 y 5  | <b>76,0</b>   | 6  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 4  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 6  | 0 |
| 0,0       | 2         | 3 y 2 | <b>0,0</b>   | 3  | 1 | 2,7       | 4         | 5 y 4  | <b>19,8</b>   | 5  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 3  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 5  | 0 |
| 0,0       | 1         | 2 y 1 | <b>0,0</b>   | 2  | 1 | 0,0       | 3         | 4 y 3  | <b>0,3</b>    | 4  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 2  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 4  | 0 |
| 0,0       | 0         | 1 y 0 | <b>0,0</b>   | 1  | 1 | 0,0       | 2         | 3 y 2  | <b>0,0</b>    | 3  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 1  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 3  | 0 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 0  | 1 | 0,0       | 1         | 2 y 1  | <b>0,0</b>    | 2  | 1 |
|           |           |       | <b>0,0</b>   | 0  | 0 |           |           |        | <b>0,0</b>    | 2  | 0 |
|           |           |       |              |    |   | 0,0       | 0         | 1 y 0  | <b>0,0</b>    | 1  | 1 |
|           |           |       |              |    |   |           |           |        | <b>0,0</b>    | 1  | 0 |
|           |           |       |              |    |   |           |           |        | <b>0,0</b>    | 0  | 1 |
|           |           |       |              |    |   |           |           |        | <b>0,0</b>    | 0  | 0 |

Tabla 14: *Rejilla cuatrinomial volatilidad cambiante (t=5 a t=0)*

| T=0       |          | T=1       |    | T=2       |           | T=3       |           | T=4       |       | T=5        |    |       |             |   |   |      |   |   |
|-----------|----------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|------------|----|-------|-------------|---|---|------|---|---|
| 1=S! 0=F! |          | 1=S! 0=F! |    | 1=S! 0=F! |           | 1=S! 0=F! |           | 1=S! 0=F! |       | 1=S! 0=F!  |    |       |             |   |   |      |   |   |
| Nodo      | T!       | Nodo      | T! | Nodo      | Nodos t+1 | Nodo      | Nodos t+1 | Nodo      | T!    | Nodo       | T! |       |             |   |   |      |   |   |
| <b>0</b>  | <b>0</b> | 1         |    | 0,01      | 1         | 1         | 0,025     | 2         | 3 y 2 | <b>1,3</b> | 3  | 4 y 3 | <b>10,6</b> | 4 | 1 | 31,2 | 5 | 1 |
| <b>0</b>  | <b>0</b> | 0         |    | 0,00      | 1         | 0         |           |           |       | <b>0,0</b> | 4  | 0     |             |   |   | 0,0  | 5 | 0 |
|           |          |           |    | 0,00      | 0         | 1         | 0,000     | 1         | 2 y 1 | <b>0,0</b> | 2  | 3 y 2 | <b>0,0</b>  | 3 | 1 | 9,6  | 4 | 1 |
|           |          |           |    | 0,00      | 0         | 0         |           |           |       | <b>0,0</b> | 3  | 0     |             |   |   | 0,0  | 4 | 0 |
|           |          |           |    |           |           |           | 0,000     | 0         | 1 y 0 | <b>0,0</b> | 1  | 2 y 1 | <b>0,0</b>  | 2 | 1 | 2,4  | 3 | 1 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       | <b>0,0</b> | 2  | 0     |             |   |   | 0,0  | 3 | 0 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       | <b>0,0</b> | 0  | 1 y 0 | <b>0,0</b>  | 1 | 1 | 0,4  | 2 | 1 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       | <b>0,0</b> | 1  | 0     |             |   |   | 0,0  | 2 | 0 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       | <b>0,0</b> | 0  | 1     |             |   |   | 0,0  | 1 | 1 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       | <b>0,0</b> | 0  | 0     |             |   |   | 0,0  | 1 | 0 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       |            |    |       |             |   |   | 0,0  | 0 | 1 |
|           |          |           |    |           |           |           |           |           |       |            |    |       |             |   |   | 0,0  | 0 | 0 |

La tabla 15 muestra el proceso acelerado resumido a tres etapas de decisión, sin considerar riesgos de mercado y solamente la exposición a la resolución de incertidumbres tecnológicas.

Tabla 15: Proceso acelerado tres etapas



Suponiendo intervalos de tiempo de 6 meses, dejando de lado los tiempos de autorización por autoridades de salud para el inicio de las pruebas experimentales, asumiendo que la etapa experimental y la aprobación demandan 12 meses, el intervalo temporal se reduce a 18 meses aproximadamente. Dejando de lado el análisis estrictamente financiero, enfocándose en la resolución de incertidumbres tecnológicas, manteniendo las probabilidades de ocurrencia, el éxito de la etapa 3 tiene una probabilidad del 0.93%, siendo levemente superior al 0.7013%.

Con este sencillo ejemplo, se demuestra lo desafiante para el sector privado y académico de este tipo de inversiones, más aún cuando hacen a temas de salud y de agenda pública prioritaria. Se remarca la necesidad de intervención activa del sector público, no solamente desde el control, también desde lo económico. En otras palabras, a través de políticas públicas sostenibles en el tiempo, en especial en economías emergentes. En estos casos, si bien existe el intangible del conocimiento y formación, se requiere de políticas públicas que permitan compartir los significativos riesgos tecnológicos y de mercado para inversiones de este tipo, que hacen al bienestar de la salud pública de un país.

#### 4. Conclusiones

Es común la necesidad de resolver estrategias que reúnen problemas de decisiones secuenciales donde el inicio o abandono de la inversión dependerá del tradicional criterio económico de valor actual positivo. Una correcta evaluación de la estrategia requiere de herramientas que identifiquen y valoren a las fuentes de incertidumbre contenidas en las estrategias analizadas.

Los árboles de decisión trabajan con flujos de fondos esperados en cada rama de decisión, estimados con probabilidades “reales”. Requieren de tasas de actualización ajustadas por el riesgo propias de cada una de las estrategias planteadas. En la práctica, esto es difícil de estimar producto de la no existencia de activos financieros que reflejen los riesgos de los cursos de acción planteados., sobre todo en nuevos proyectos o en el caso de mercados emergentes.

La batería de herramientas que provee la teoría financiera es vasta pero solo algunos modelos logran reproducir en números la supuesta dinámica de las variables. Los árboles de decisión, que son un instrumento en sí para el planteo de decisiones secuenciales en forma extensiva, presentan el defecto de valorar considerando que el riesgo es el mismo para las ramas o cursos de acción, ya que utiliza la tasa de costo de capital la cual refleja riesgos sistémicos desde la perspectiva del inversor eficientemente diversificado.

Las opciones reales y el modelo binomial avanzan un paso, pues resuelven la asignación del riesgo ajustando en los flujos de fondos con coeficientes equivalentes ciertos. El modelo no es eficaz para valorar decisiones donde estén presentes fuentes de incertidumbre de mercado y operativas. La medida de volatilidad por lo general es sobrestimada en el afán de resumir todos los riesgos y termina sobrevaluando el valor estratégico del proyecto. También otro defecto es suponerla estable en el tiempo. El transcurso del tiempo por efecto aprendizaje y mayor información hace que los niveles de volatilidad de mercado se morigeren.

Una construcción más lógica son las opciones arco iris, donde las fuentes de incertidumbre son tratadas de manera separada. Permiten segregar la medida volatilidad de mercado variable respecto de los riesgos operativos y tecnológicos, ajustando el valor por las fuentes de incertidumbre. Los resultados obtenidos compensan el efecto por volatilidad variable de mercado con el ajuste por riesgos tecnológicos. El aporte de introducir en el modelo la variabilidad de los riesgos de mercado permite incorporar en el valor estimado los efectos de la curva de aprendizaje y la mayor disponibilidad de datos, a medida que pasa el tiempo y se devela la incertidumbre tecnológica.

Finalmente, ante necesidades de desarrollos acelerados frente al peligro de pandemias que afecten la salud pública, el caso analizado demuestra la imperiosa necesidad de intervención activa por parte del sector público. En especial en economías emergentes, apoyando económica y legalmente al sector privado y académico. Con esto se logra un desarrollo del sector que redundará en una mejora en la salud pública, claro que tal desarrollo viene de la mano de compartir la carga importante de riesgos tecnológicos y de mercado.

## REFERENCIAS

- Amram, M & Kulatilaka, N. (1998). *Real Options*. Harvard Business School Press
- Arnold; T & Crack, T. (2003). *Option Pricing in the Real World: A Generalized Binomial Model with Applications to Real Options*. SSRN: Social Science Research Network
- Brandao, L & Dyer; J. (2009). Projetos de Opcoes Reis com Incertezas Correlacionadas. *Revista de Administracao e Contabilidade da Unisinos* (1), 19-26
- Brandao, L., Dyer, J & Hahn, W. (2012). Volatility estimation for stochastic project value models. *European Journal of Operational Research*, 220(3), 642-648
- Brous, P. (2011). Valuing an early stage biotechnology investment as a rainbow option. *Journal of Applied Corporate Finance*, 23(2), 94-103
- Castro Monge, E. (2010). El estudio de casos como metodología de investigación y su importancia en la dirección y administración de empresas. *Revista Nacional de Administración*, 2(1), 31-54
- Chance, D. (2007). *A Synthesis of Binomial Option Pricing Models for Lognormally Distributed Assets*. SSRN <http://ssrn.com/abstract=1523548>, 1-25

- Copeland, T & Tufano, P. (2004). A Real World to Manage Real Options. *Harvard Business Review* (82), 90-99
- Copeland, T & Antikarov, V. (2003). *Real Options: A practitioner's guide*. Cengage Learning
- Graeme, G. (2009). *Real Options in Theory and Practice*. Oxford University Press
- Haahtela, T. (2011). *Estimating Changing Volatility in Cash Flow Simulation Based Real Options Valuation with Regression Sum of Squared Error Method*. SSRN: Social Science Research Network
- Kodukula, P. y Chandra, P. (2006). *Project Valuation using Real Options: A practitioner's guide*. J Ross Publishing.
- Milanesi, G. (2011). Flexibilidad estratégica, teoría de opciones reales y convergencia con el VAN empleando coeficientes equivalentes ciertos y probabilidades del mundo real. *SaberEs* (3), 47-60.
- Milanesi, G. (2019). Valuación de opciones reales, transformación de Edgeworth y funciones isoelásticas de utilidad. *ODEON* (16), 123-163.
- Milanesi, G., Pesce, G y El Alabi, E. (2014). Valoración de empresas de base tecnológica: Análisis de riesgo y el modelo binomial desplazado. *Revista Española de Capital de Riesgo* (4), 15-24.
- Num, J. (2015). *Real Options Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions with Integrated Risk Management and Advanced Quantitative Decision Analytics*, 3<sup>rd</sup> Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Pareja Vasseur, J, Prada Sánchez, M y Moreno Escobar, M. (2019). Volatilidad en Opciones Reales: Revisión literaria y un caso de aplicación al sector petrolero colombiano. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa* (27), 136-155.
- Salahaldin, L. (2016). *Real Options as a Tool for Value Creation: Evidence from Sustainable Development and Information Technology Sectors*. Wiley-ISTE.
- Shockley, R. L. (2006). *An Applied Course in Real Options Valuation*. Thomson South-Western Finance.
- Shockley, R, Curtis, S, Jafari, J & Tibbs, K. (2003). The Option Value of an Early-Stage Biotechnology Investment. *Journal of Applied Corporate Finance*, 15(2), 44-55.
- Smit, H & Trigeorgis, L. (2004). *Strategic Investment: Real Options and Games*, Princeton University Press.
- Smith, J. (2005). Alternative Approach for Solving Real Options Problems. *Decision Analysis* (2), 89-102.
- Smith, J & Nau, R. (1995). Valuing Risky Projects: Option Pricing Theory and Decision Analysis. *Management Science* (5), 795-816
- Trigeorgis, L. (1995). *Real Options in Capital Investment: Models, Strategies and Applications*, Praeger
- Trigeorgis, L. (1997). *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocations*, 2<sup>nd</sup> ed., MIT Press