



Universidad de
San Andrés

Universidad de San Andrés
Escuela de Administración y Negocios
Magister en Finanzas

Trabajo final de graduación

Estrategia de Cobertura a partir de los Factores de Nelson-Siegel

Autor: Cristian Alexis Cavallero

DNI: 34.975.679

Director: Marcelo Zincenko

Buenos Aires, Marzo de 2023

Resumen

El propósito de este trabajo es estudiar la efectividad de estrategias de cobertura de riesgo utilizando factores que afectan la estructura de tasas de interés: nivel, pendiente y curvatura. Se utiliza el modelo de Nelson y Siegel para generar curvas cupón cero, y se prueba la capacidad de la estrategia para inmunizar una cartera de activos en un período de alta volatilidad, en el mercado argentino de renta fija soberana denominado en dólares.

Se observa que la estrategia de cobertura logra reducir significativamente la volatilidad en la valuación de la cartera, pero no se observa la misma estabilidad en las cantidades de la cartera de cobertura, que son significativamente altas y fluctúan todos los días.

Se concluye que la estrategia de cobertura resulta inviable cuando se consideran los costos típicamente asociados a la operatoria de bonos, pero con la tendencia global de reducción de costos transaccionales, la utilización de factores de Nelson y Siegel puede ser una opción viable para lograr inmunización total de un *portfolio* ante cambios en los tres factores principales que afectan la estructura de tasas de interés.



Keywords – Nelson-Siegel, Curvas cupón cero, Cobertura de riesgos, Argentina

Índice

1. Introducción	1
2. Revisión literaria	3
3. Descripción de los datos	5
3.1. Período bajo análisis	5
3.2. Títulos de deuda	6
3.3. Filtro de datos	9
4. El modelo	11
4.1. Ventajas	11
4.2. Desventajas	11
4.3. Forma funcional	12
4.4. Función objetivo	13
4.5. Restricciones	14
4.6. Algoritmo de optimización	14
5. Resultados empíricos modelo	16
6. Estrategia de cobertura de riesgo	25
7. Resultados empíricos cobertura	29
8. Conclusión	33
9. Líneas de trabajo abiertas	35
9.1. Correlación parámetros de Nelson y Siegel	35
9.2. Utilización de derivados para la estrategia de cobertura	36
Referencias	38
Apéndice	39
A1. Anexo A	39

Índice de figuras

3.1. Volumen operado de bonos en T+2 en los mercados ByMA y MAE	8
3.2. Volumen operado de letes en T+2 en los mercados ByMA y MAE	9
5.1. Evolución de la bondad de ajuste del modelo	17
5.2. Evolución de las curvas cupón cero soberanas en dólares (Ley Argentina)	18
5.3. Evolución del rendimiento de los bonos a precio de mercado	19
5.4. Evolución de los nodos de la curva de Nelson y Siegel	20
5.5. Evolución de los parámetros de la curva de Nelson y Siegel	21
5.6. Evolución de precios mercado vs precios modelo	22
5.7. Diagrama de cajas para los errores de Letes y bonos	23
7.1. Evolución de las cantidades nominales de la cartera de cobertura	29
7.2. Variación de la cartera con y sin cobertura	30
7.3. Evolución de la valuación de la cartera en diferentes escenarios	32
9.1. Correlación entre los factores pendiente y curvatura	35
9.2. Resultados estrategia venta en corto vs put	37



Universidad de
San Andrés

Índice de tablas

3.1. Detalle de los bonos	7
3.2. Disponibilidad de precios de los bonos	8
5.1. Comparación de resultados bajo diferentes escenarios	17
5.2. Detalle de errores obtenidos por bono	24
9.1. Coeficiente de correlación entre los parámetros de Nelson y siegel	36
A1.1. Parámetros iniciales	39



Universidad de
San Andrés

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es estudiar la efectividad de estrategias de cobertura de riesgo, elaboradas a partir de la utilización de los tres principales factores que afectan la estructura de tasas de interés: nivel, pendiente y curvatura. A tal fin, explora el universo de instrumentos de renta fija soberanos, denominados en dólares y regidos por la Ley de la República Argentina.

Con el propósito de poner a prueba la capacidad de la estrategia de cobertura de riesgos de inmunizar una cartera de activos, se escoge un período de alta volatilidad, durante el cual se producen alteraciones macroeconómicas que promueven a su vez cambios en la política monetaria: se trabaja con datos que van desde julio de 2018 a junio de 2019.

Por tratarse de un mercado ilíquido e incompleto, se utiliza el modelo de Nelson y Siegel, dada su capacidad de generar curvas cupón cero utilizando únicamente cuatro parámetros, reduciendo la necesidad de trabajar con grandes volúmenes de datos. Además, su flexibilidad permite capturar comportamientos dinámicos, propios de un contexto de alta volatilidad, de manera parsimoniosa.

Para la calibración del modelo se realizan estimaciones con distintos niveles de filtración de datos, procurando maximizar la bondad de ajuste del mismo, bajo métricas estipuladas en torno a los errores cuadráticos entre los precios observados en el mercado y los generados por el modelo.

La efectividad de la estrategia de cobertura, se analiza a la luz de la tendencia decreciente en los costos transaccionales, a la hora de operar en mercados bursátiles. En los últimos años, han surgido Agentes de Liquidación y Compensación (ALyC) que no cobran comisiones, por lo que el costo asociado a cada transacción se limita únicamente a los derechos de mercado e impuestos.

Los datos utilizados para llevar a cabo las estimaciones provienen de las planillas de cierre diarias de los mercados BYMA y MAE en el segmento Prioridad Precio Tiempo, entre el 30 de junio de 2018 y el 30 de junio de 2019. En las 242 ruedas correspondientes a dicho período, se registran operaciones por aproximadamente USD 30.000 millones, incluyendo 36 letras y 9 bonos soberanos.

El resto del trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la segunda sección se realiza una revisión literaria. En la tercera sección se lleva a cabo una descripción de los datos utilizados y los motivos por los cuales se los elige para el análisis. En la sección cuarta se describe el modelo utilizado, mientras que en la sección quinta se analizan los resultados empíricos obtenidos al aplicarlo. En la sexta sección se presenta la estrategia utilizada para lograr la cobertura de riesgos de un portafolio, a partir de la utilización del modelo de Nelson y Siegel y, finalmente, en la séptima sección se analizan los resultados obtenidos a partir de su aplicación.



Universidad de
San Andrés

2. Revisión literaria

La estructura temporal de tasas de interés se enfoca en el estudio de la relación entre el tiempo y el rendimiento de instrumentos de renta fija. Este trabajo, se enfoca en un tipo particular de estructura, las curvas cupón cero¹, que representan el rendimiento exigido por el mercado para cada plazo de vencimiento posible, en un escenario donde no existen riesgos crediticios o de reinversión. Es decir, aplicable al descuento de instrumentos cupón cero. Existen dos tipos fundamentales de modelos en esta área: los de equilibrio y los paramétricos.

Los modelos de equilibrio se basan en la dinámica e interacción de distintas variables económicas para derivar las curvas de rendimiento y encontrar soluciones de equilibrio bajo supuestos de no arbitraje. Dentro de este grupo, se destacan los trabajos de [Vasicek \(1977\)](#) o [Cox et al. \(1985\)](#).

Por otro lado, los modelos paramétricos trabajan con formas funcionales que, con un número relativamente pequeño de parámetros, logren suficiente flexibilidad para ser consistentes con las estructuras temporales de tasas obtenidas a partir de datos de mercado.

Respecto al segundo grupo, existen distintos enfoques que aproximan curvas cupón cero a partir de diferentes formas funcionales. Los modelos polinómicos, por ejemplo, trabajan la curva por tramos, logrando suficiente flexibilidad para que el modelo se ajuste a los datos observados, capturando incluso relaciones no lineales ([McCulloch, 1971](#)).

La flexibilidad lograda por esta clase de modelos permite a la curva de rendimiento cupón cero resultante adoptar cambios abruptos en su pendiente, sobre todo en el extremo final. [Shea \(1985\)](#) encuentra esto inconveniente a la hora de aplicarla a instrumentos fuera del rango de vencimientos estudiado.

Otra desventaja de la flexibilidad es la susceptibilidad a datos extremos, lo cual es puede resultar potencialmente desfavorable en el caso de que el dato observado incorpore primas por riesgo, iliquidez o de algún otro tipo, intrínsecas de la especie operada.

¹En este trabajo, se utilizan los términos “estructura temporal de tasas de interés” y “curvas cupón cero” indistintamente.

Diversas funciones polinomiales se han adoptado en la literatura para superar las deficiencias de esta clase de modelos. Por ejemplo, [Vasicek and Fong \(1982\)](#) proponen trabajar con splines exponenciales. Sin embargo, no logran obtener una mejora sensible en los resultados.

El modelo de Nelson y Siegel (1987) propone una estructura de tasas de interés basada en una combinación lineal de solo tres factores: nivel, pendiente y curvatura. A pesar de ser menos maleable que otros modelos, los autores encuentran que puede adaptarse a las formas típicamente observadas en curvas de rendimiento cupón cero. Además, la escasa cantidad de factores mejora la capacidad de estimación, incluso con una menor cantidad de datos, lo cual resulta beneficioso en países con mercados incompletos ([Pereda C., 2010](#)).

Posteriormente, el modelo de Nelson y Siegel es ampliado por [Svensson \(1994\)](#) quien introduce un factor adicional en el muy corto plazo, permitiendo la curva tener dos "jorobas" en lugar de una sola. Asimismo, [Herrera B. and Magendzo W. \(1997\)](#) propusieron un modelo dinámico basado en el proceso de [Cox et al. \(1985\)](#) que permite la reversión a la media y la volatilidad en la tasa de interés de corto plazo.

Además de los modelos de factores, otro tipo de enfoques han surgido en los últimos años en el estudio de la estructura de tasas de interés, que incluyen el uso de redes neuronales, filtros de Kalman y otras técnicas que utilizan *machine learning* ([Mineo et al., 2020](#)).

3. Descripción de los datos

3.1. Período bajo análisis

La evidencia empírica obtenida de varios trabajos de estimación de curvas cupón cero utilizando modelos paramétricos, sugiere que la evolución de los parámetros del modelo es sensible a cambios en la política monetaria. Por ejemplo, Nelson y Siegel (1987) observan cómo la curva se torna más estable y mejora su capacidad de estimación cuando el Sistema de la Reserva Federal de EE. UU. cambia su política de estimación de agregados monetarios, por una de estabilización de tasas de interés.

Esto motiva la selección de un período donde se produzcan cambios macroeconómicos que promuevan cambios en política monetaria y generen volatilidad en los mercados, con el fin de evaluar la capacidad de las curvas de capturar los consecuentes movimientos en las tasas de interés.

Además, si efectivamente los parámetros de la curva evolucionan conforme a estos cambios, también permite corroborar la eficacia de estrategias de cobertura de riesgo elaboradas a partir de las curvas cupón cero.

Durante el período de análisis seleccionado (julio de 2018 a junio de 2019), en la Argentina se produce un proceso de aceleración inflacionaria, producto de factores internos y externos, que condujeron a una modificación de la política monetaria, con el objetivo de recuperar el ancla nominal y controlar el aumento de precios. En este sentido, el BCRA pone en vigencia un nuevo régimen a partir de octubre de 2018, dejando de lado el régimen de metas de inflación, para pasar a un enfoque pragmático y observable de compromiso de no aumentar la base monetaria hasta junio 2019.

A pesar de lograr cierta desaceleración del ritmo inflacionario en el corto plazo, Argentina entra hacia fines de 2018 en un sendero de volatilidad que signaría el resto del período. Un deterioro de los precios relativos, acompañado por una caída en el desempeño de la actividad económica, en un contexto macroeconómico internacional desfavorable para economías emergentes, y de alto endeudamiento público del país, culmina con un fuerte incremento de las primas de riesgo soberano y corporativo que se produce en abril de 2019.

Dicha situación se exagera por la incertidumbre característica de los ciclos preelectorales, alcanzando su punto álgido hacia el final del período seleccionado, cuando las encuestas políticas comienzan a mostrar un debilitamiento del gobierno de turno. A esto se sumarían también situaciones internacionales desfavorables como el conflicto comercial entre China y Estados Unidos, o el del Reino Unido y Europa, que desencadenan un proceso de *flight to quality* en los mercados financieros.

3.2. Títulos de deuda

Entre 2018 y 2019, la deuda bruta soberana argentina promedió los USD 327.628 millones, y estaba compuesta en aproximadamente un 77 % por títulos emitidos en moneda extranjera. En particular, los instrumentos denominados en dólares regidos por la Ley Argentina podían separarse en dos tipos principalmente:

- **Letras a descuento o “Letes”:** emitidas a descuento con plazos de entre 70 y 630 días;
- **Bonos:** a tasa fija, de pagos semestrales, con vencimientos que varían entre 5 meses y 20 años a lo largo de la muestra.

Ambos tipos de instrumentos pueden operarse tanto en dólares como en pesos, en los mercados BYMA y MAE, en los plazos de liquidación contado inmediato, 24 horas o 48 horas. Teniendo en cuenta la inestabilidad cambiaria propia del período, para evitar fluctuaciones en los precios influenciadas por movimientos en el tipo de cambio, se consideran exclusivamente transacciones realizadas en dólares estadounidenses vía MEP (Medio Electrónico de Pagos).

Respecto a la selección de plazo de liquidación y mercado, se establece un orden de prelación basado en el volumen operado a lo largo del período:

- **Letes:** se toman los precios de cierre operados con plazo de liquidación de 24 horas en MAE y, en caso de no registrarse negociación, se toman los precios de cierre de BYMA para el mismo plazo de liquidación;
- **Bonos:** se toman los precios de cierre operados con plazo de liquidación de 48 horas en BYMA y, en caso de no registrarse negociación, se toman los precios de cierre de MAE para el mismo plazo de liquidación.

Entre el universo de datos elegibles para la calibración de las curvas cupón cero, se registraron operaciones de 9 bonos, por más de USD 10.700 millones y de 34 Letes por más de USD 4.800 millones. Los bonos se caracterizan por ser todos de tasa fija en dólares, con pagos de cupones semestrales y emitidos bajo ley local. Los dos bonos más cortos son *bullet*, mientras que el resto pagan cupones de amortización antes del vencimiento. Ninguno cuenta con opción de rescate anticipado.

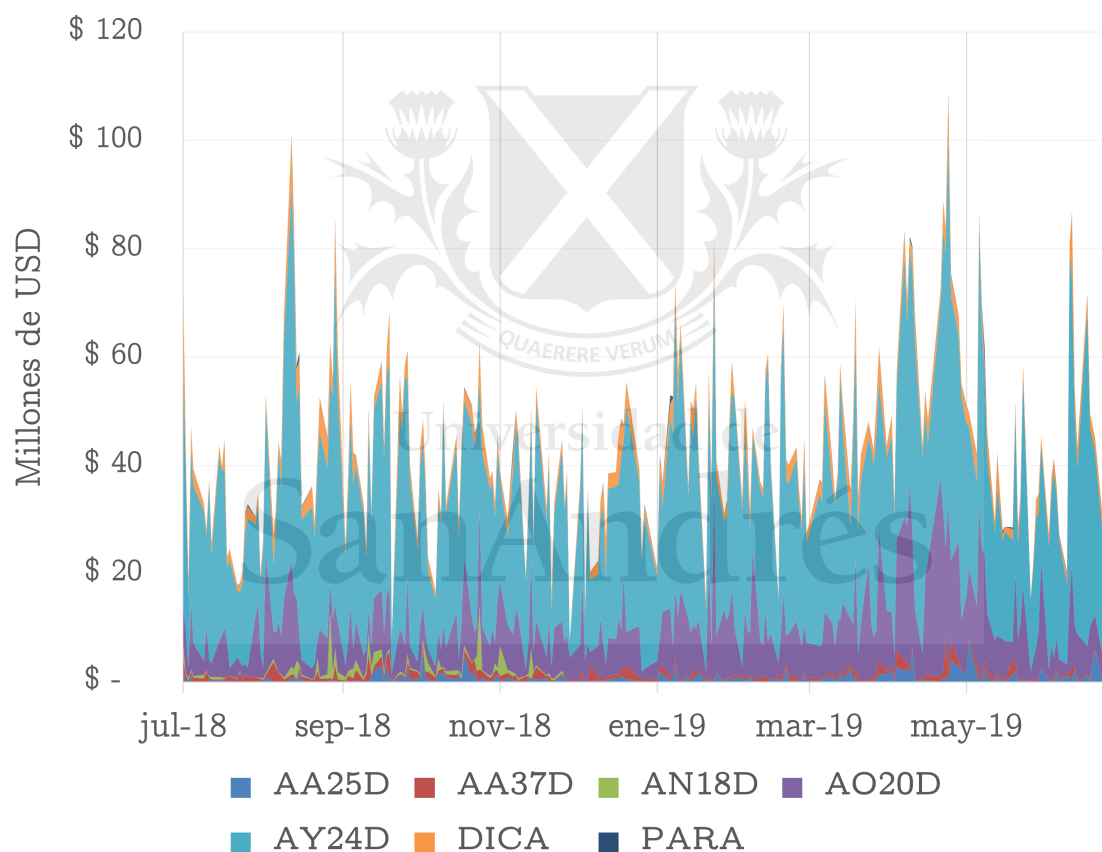
En la Tabla 3.1. se resumen los principales aspectos de cada uno. A excepción del AN18D, con vencimiento el 26/11/2018, tuvieron cotización casi todos los días de la muestra (Ver Tabla 3.2 y Figura 3.1.

Tabla 3.1: Detalle de los bonos

Bono (Ticker MAE)	Fecha Emisión	Fecha Vto.	Tasa Fija	Cupones Interés	Cupones Amort.
Bonar 2018 (AN18D)	29/11/11	29/11/18	9,000 %	Semestrales pagaderos cada 29/05 y 29/11	Pagadero al Vencimiento
Bonar 2020 (AO20D)	08/10/15	08/10/20	8,000 %	Semestrales pagaderos cada 08/04 y 08/10	Pagadero al Vencimiento
Bonar 2024 (AY24D)	07/05/14	07/05/24	8,750 %	Semestrales pagaderos cada 07/04 y 07/11	Semestrales a partir del 05/07/19
Bonar 2025 (AA25D)	18/04/17	18/04/25	5,750 %	Semestrales pagaderos cada 18/04 y 18/10	Anuales a partir del 18/04/23
Bono Discount (DICA)	31/12/03	31/12/33	8,280 %	Semestrales pagaderos cada 30/06 y 31/12	Semestrales a partir del 30/06/24
Bonar 2037 (AA37D)	18/04/17	18/04/37	6,625 %	Semestrales pagaderos cada 18/04 y 18/10	Anuales a partir del 18/04/35
Bono Par (PARA)	31/12/03	31/12/38	Step-Up	Semestrales pagaderos cada 31/03 y 30/09	Semestrales a partir del 30/09/29

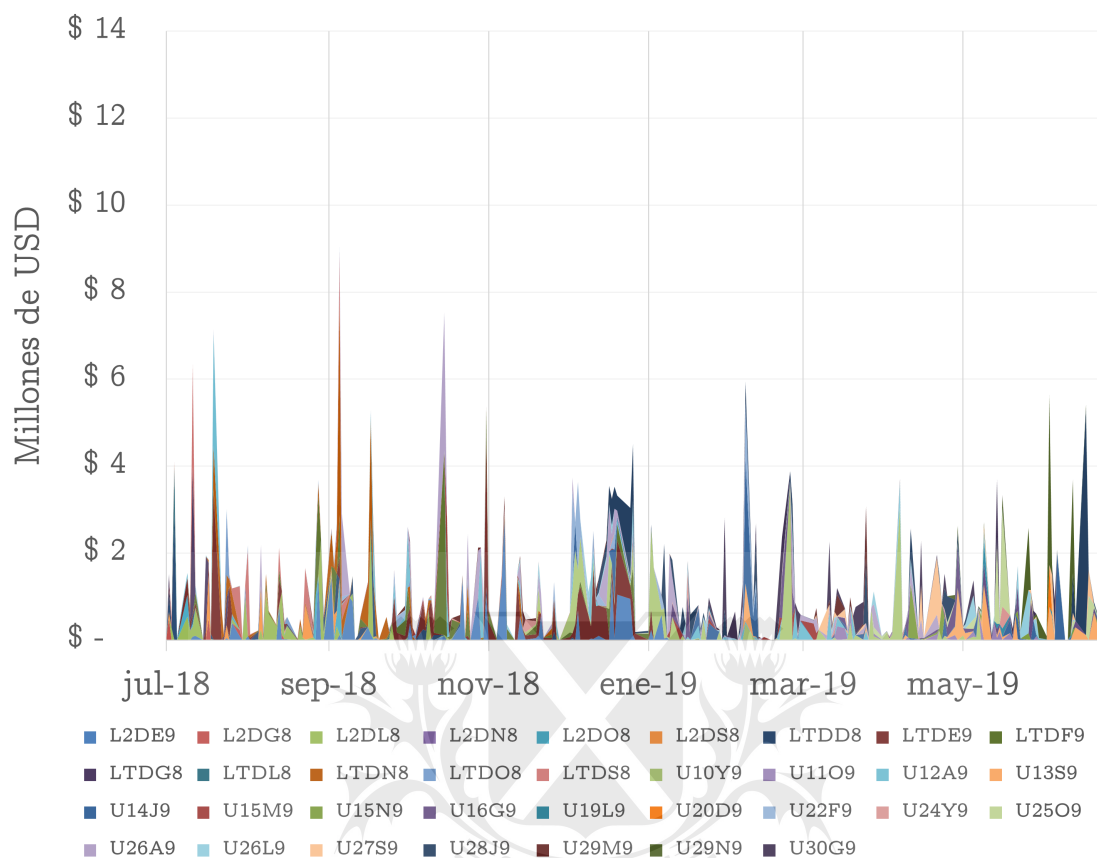
Tabla 3.2: Disponibilidad de precios de los bonos

Detalle	AN18D	AO20D	AY24D	AA25D	DICA	AA37D	PARA
Días con precios	100	242	242	240	240	241	239
Días totales	101	242	242	242	242	242	242
Días con precios (%)	99,0 %	100,0 %	100,0 %	99,2 %	99,2 %	99,6 %	98,8 %

Figura 3.1: Volumen operado de bonos en T+2 en los mercados ByMA y MAE

Fuente: Elaboración propia en base información de mercado.

Respecto de las Letes, el universo disponible para la calibración fue variando a medida que iban venciendo y emitiéndose nuevas. En promedio, a lo largo de la muestra se contó con al menos 9 precios de Letes para la estimación. En la Figura 3.2 se muestra el volumen mensual operado de cada Lete.

Figura 3.2: Volumen operado de letes en T+2 en los mercados ByMA y MAE

Fuente: Elaboración propia en base información de mercado.

3.3. Filtro de datos

Existen varias razones por las que uno podría esperar que los precios de mercado no reflejen la verdadera relación subyacente entre plazo y rendimiento. Una de ellas, es la prima por iliquidez que incorporan los precios operados de instrumentos con baja profundidad de mercado, la cual se refleja asimismo en la magnitud de los *bid-ask spread* para este tipo de instrumentos (Subramanian, 2001).

Para evitar potenciales distorsiones que pudieran generar los instrumentos ilíquidos, se excluyen del análisis aquellos con operaciones menores a USD 50.000 promedio diario. El criterio de liquidez mínima para ser tenido en cuenta en la muestra surge de la comparación de resultados obtenidos a partir de varias estimaciones utilizando distintos niveles de filtros. Cabe destacar que esto excluye únicamente a dos bonos de la muestra, DIA0 y PAA0, que tienen el mismo flujo de fondos que DICA y PARA respectivamente.

Otro motivo por el cual podría existir alguna inconsistencia entre lo reflejado en los datos y la curva real es el costo relativo asociado a instrumentos con diferentes plazos. Por ejemplo, es habitual observar tasas relativamente altas en instrumentos de corto plazo, donde los costos transaccionales son proporcionalmente mayores, teniendo en cuenta su vencimiento cercano.

Además, en instrumentos con estas características, pequeños cambios en el precio producen grandes variaciones en su nivel de rendimiento, por lo que están sujetos a altos niveles de volatilidad. Esto dificulta la estimación de la parte corta de la curva, sobre todo en modelos paramétricos donde el primer instrumento a vencer funciona como ancla, reduciendo la volatilidad del modelo.

Por lo tanto, se lleva a cabo un estudio comparativo de los resultados obtenidos al filtrar instrumentos con vencimientos en ambos extremos de la curva. Se concluye que se obtienen los mejores resultados en términos de la función objetivo, cuando se excluyen instrumentos que vencen a menos de 20 días de la fecha de estimación y los dos instrumentos más largos de la muestra: U15N9 y PARA.

Respecto a trabajar con distinto tipo de instrumentos, incluyendo bonos que pagan cupones y letras a descuento, [Bolder and Stréliski \(1999\)](#) apelan a un enfoque práctico para determinar su conveniencia o no. Al comparar resultados obtenidos ante la utilización de uno u otro tipo de especies u ambos tipos a la vez, concluyen que es preferible utilizar letras a descuento para la estimación del tramo corto de la curva. Esto se debe a que la homogeneidad y liquidez de esta clase de instrumento permiten anclar este extremo de la curva.

Por otra parte, se observa que, durante el período bajo análisis, el bono más corto tiene una madurez superior a 5 meses. Por lo tanto, se hace necesaria la inclusión de Letes para modelar el tramo corto de la curva.

4. El modelo

4.1. Ventajas

Por tratarse de un modelo que utiliza únicamente 4 parámetros, es particularmente conveniente a la hora de estimar estructuras de tasas de interés temporales en mercados incompletos y de baja profundidad, como es el de bonos soberanos argentinos emitidos en dólares bajo ley local.

Además, la forma funcional del modelo está pensada para poder ajustarse a una amplia variedad de curvas, tanto con pendiente ascendente como descendente. Su flexibilidad permite asimismo capturar comportamientos dinámicos de manera parsimoniosa, lo cual resulta conveniente en un contexto de alta volatilidad como en el que se suelen desenvolver los mercados de economías emergentes.

Finalmente, numerosos trabajos han demostrado la capacidad del modelo para predecir movimientos futuros en las tasas de interés, lo cual beneficia la elaboración de estrategias de inmunización de cartera.

4.2. Desventajas

Una de las desventajas del modelo es que la forma funcional propuesta no se deriva partiendo de un marco que garantice no arbitraje. Los parámetros del modelo son calibrados exclusivamente con datos de mercado que, como se menciona en la sección 3.3, no necesariamente reflejan fielmente la relación entre madurez y rendimiento.

Factores como primas por iliquidez, costos transaccionales, impuestos, riesgo crediticio, entre otros, pueden distorsionar el precio de una especie en particular, aportando un dato “fuera de curva” al modelo.

Cabe señalar que esta inconveniencia ha sido estudiada por [Coroneo et al. \(2008\)](#), donde demuestran que los parámetros del modelo de Nelson-Siegel no son estadísticamente diferentes de los obtenidos en modelos no-paramétricos, que parten de un marco teórico libre de arbitraje. Por lo tanto, concluyen que, con un 95% de nivel de confianza, el modelo de Nelson y Siegel es compatible con un enfoque libre de arbitraje.

4.3. Forma funcional

El modelo de Nelson y Siegel propone la siguiente función para la curva cupón cero:

$$r(m) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1 - e^{-\frac{m}{\tau}}}{\frac{m}{\tau}} + \beta_2 \left(\frac{1 - e^{-\frac{m}{\tau}}}{\frac{m}{\tau}} - e^{-\frac{m}{\tau}} \right), \quad (4.1)$$

donde, m representa la variable tiempo, mientras que β_0 , β_1 , β_2 y τ son parámetros que se estiman en base a información de mercado. Debido a su lugar en la función, pueden relacionarse con distintos aspectos de la curva, lo que les asigna también una interpretación económica.

Por ejemplo, β_0 es el límite de la función cuando m tiende a infinito. Es decir, funciona como una constante que no disminuye ni explota en el límite, por lo que representa la tasa de interés de largo plazo.

β_1 , por otro lado, tiene mayor injerencia en el tramo corto de la curva, debido a su rápida convergencia a cero. La suma de β_0 y β_1 es la ordenada al origen de la función, por lo que se interpreta como la tasa de interés de corto plazo. Consecuentemente, β_1 se asocia asimismo al diferencial entre la tasa de largo y de corto plazo.

β_2 no tiene influencia en ninguno de los extremos de la función, ya que comienza en cero y converge a cero cuando m tiende a infinito. Por lo tanto, se interpreta como un componente de mediano plazo, relacionado a la “joroba” de la curva, particularmente a su forma.

Finalmente, τ también es un componente de mediano plazo, pero asociado a la posición de la “joroba”: valores pequeños se corresponden con una rápida caída de los regresores, logrando un mejor ajuste de la curvatura en el tramo corto de la curva, mientras que valores altos se corresponden con una joroba que comienza a partir de plazos más altos, permitiendo un mejor ajuste en ese tramo de la curva.

La evidencia empírica demuestra que, aunque provoque cierta pérdida de flexibilidad, fijar este parámetro trae beneficios que contrarrestan dicha inconveniencia (Nelson and Siegel, 1987). Además de simplificar el modelo al tener que estimar una variable menos, fijar τ le aporta estabilidad a la curva cupón cero, haciendo la estimación menos sensible a pequeños cambios en los datos de mercado.

En el presente trabajo, se lleva a cabo una calibración en base a los valores obtenidos en estimaciones con τ libre durante el período analizado, fijándolo en su valor promedio redondeado: 3.

4.4. Función objetivo

A partir de la función de Nelson y Siegel se obtiene una curva de factores de descuento que, aplicada al *cashflow* de un bono, permite estimar su precio teórico, el cual viene dado por la sumatoria de sus flujos descontados por dicha curva:

$$P_i^* = \sum_{j=1}^T C_{i,j} e^{-r_j m_j}, \quad (4.2)$$

donde $C_{i,j}$ representa el cupón j (de intereses y/o amortización) del bono i , m_j representa la diferencia de días entre la entrega del bono y el pago del cupón j , y r_j es la tasa de interés utilizada para descontar el cupón j , la cual se obtiene a partir de la estructura de factores de descuento derivada de la función de Nelson y Siegel.

Para la estimación de los parámetros de la función, se establece una función objetivo que toma como *input* el vector de diferencias cuadráticas² entre el precio observado de cada bono, P_i , y su correspondiente precio teórico estimado:

$$e_i = P_i - P_i^*. \quad (4.3)$$

Luego, a partir de un algoritmo de optimización, se buscan los valores de β_0 , β_1 y β_2 que minimizan la función objetivo establecida:

$$\min_{\beta_0, \beta_1, \beta_2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{MD_i} e_i^2 \quad (4.4)$$

donde MD_i corresponde a la *duración de Macaulay* del bono i y N corresponde a la cantidad de bonos con precio observado.

La adopción de la inversa de la duración como ponderador, implica que la función objetivo

²Las diferencias cuadráticas evitan compensación natural entre diferencias positivas y negativas, y son matemáticamente convenientes frente a la operación de módulo.

tenga mayor sensibilidad a errores obtenidos en bonos de corto plazo. De esta manera, el proceso de optimización prioriza la minimización de errores en dicho tramo de la curva.

Esto permite compensar la mayor ponderación que naturalmente tienen los bonos de largo plazo, debido a la heterocedasticidad en los errores a lo largo de la madurez: un mismo ajuste en los niveles de tasa produce un cambio más significativo en precios de bonos largos que en precios de bonos de corto plazo.

4.5. Restricciones

Existen infinitas combinaciones de parámetros β_0 , β_1 y β_2 tales que, al utilizarlos en la función de descuento de Nelson y Siegel, permiten obtener precios teóricos de bonos cercanos a sus respectivos precios de mercado. Sin embargo, no todas ellas tienen sentido económico. Por ejemplo, un conjunto de parámetros particular podría implicar que se apliquen tasas de descuento negativas.

Por lo tanto, es necesario establecer una serie de restricciones en el proceso de optimización, a los fines de garantizar que el vector de parámetros encontrado al minimizar la función objetivo tenga sentido económico:

A. $\beta_0 > 0$

B. $\beta_0 + \beta_1 > 0$

C. $-\infty < \beta_1 < 0$

D. $\tau_0 > 0$

Las restricciones A y B procuran que las tasas de descuento sean positivas. La restricción C, que las tasas de descuento de largo plazo sean superiores a las de corto plazo. Finalmente, la restricción D asegura que el parámetro τ , asociado a la posición de la joroba de la función de Nelson y Siegel, no quede fuera de rango.

4.6. Algoritmo de optimización

Aun acotando el universo al conjunto de parámetros que cumplen con las restricciones mencionadas, existen múltiples soluciones al problema de minimización de la función objetivo, debido a la existencia de mínimos locales.

Para mejorar las probabilidades de encontrar el mínimo global, se utiliza la metodología descrita por [Bolder and Stréliski \(1999\)](#): para cada día se llevan a cabo múltiples estimaciones, partiendo de diferentes conjuntos de parámetros iniciales.

Aumentar el número de estimaciones diarias mejora las probabilidades de encontrar el mínimo global, pero también conlleva un mayor costo en términos de recursos tecnológicos y tiempo, especialmente cuando se utilizan mecanismos de optimización numérica.

Por lo tanto, se limita el número de estimaciones diarias a 24 partiendo de los conjuntos de parámetros iniciales señalados en el Anexo [A1](#). La solución seleccionada para cada día tendrá en cuenta la distancia con la solución del día anterior, a los fines de suavizar el movimiento de la curva en el tiempo.



5. Resultados empíricos modelo

Para calibrar el modelo, se llevan a la práctica estimaciones con distintos niveles de filtración de los datos, de acuerdo con lo señalado en la sección 3.3. Para medir la bondad del ajuste en cada caso y seleccionar la mejor opción, se realiza un análisis comparativo de las siguientes métricas, que buscan condensar en un único indicador las diferencias obtenidas entre los precios de mercado P_i y los resultantes de aplicar el modelo P_i^* :

A. Error absoluto promedio:

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{P_i - P_i^*}{N}$$

B. Error absoluto relativo promedio:

$$MAPE = \sum_{i=1}^N \frac{P_i - P_i^*}{P_i} * \frac{100}{N}$$

C. Raíz cuadrada del error cuadrático promedio:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(P_i - P_i^*)^2}{N}}$$

D. Raíz cuadrada del error cuadrático relativo promedio:

$$RMSPE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - P_i^*}{P_i} \right)^2 * \frac{100}{N}}$$

A continuación, se exponen los resultados obtenidos bajo tres escenarios: en el Escenario 1, ninguna especie es excluida de la muestra; en el Escenario 2, se excluyen las Letes a menos de 20 días de vencer respecto de la fecha de estimación; en el Escenario 3 se excluyen también los dos instrumentos más largos de la muestra: U15N9 y PARA.

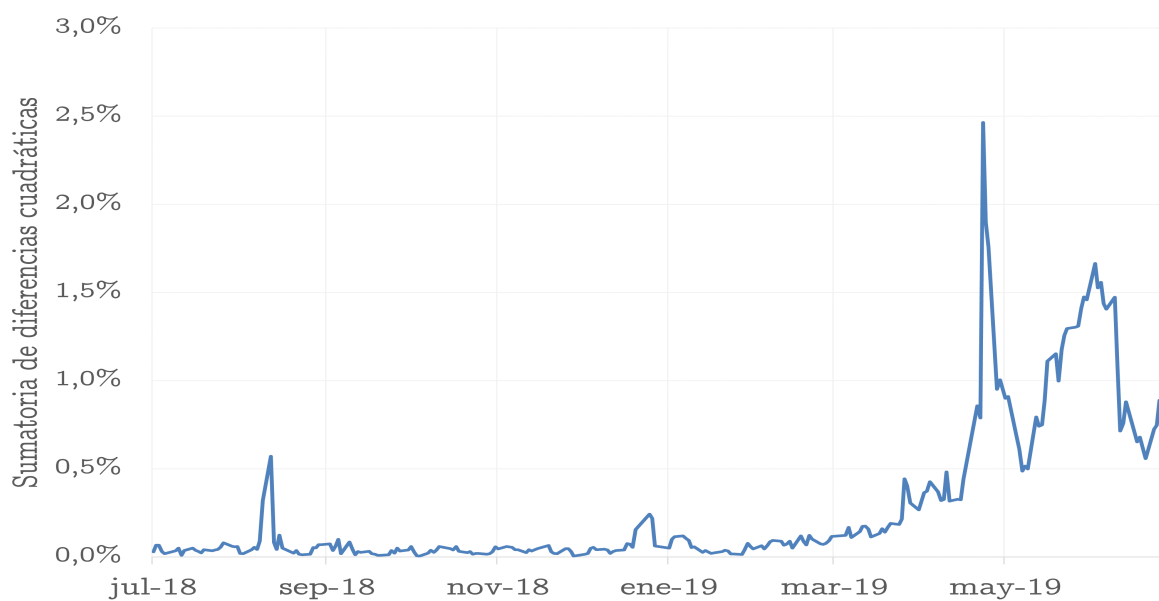
La Tabla 5.1 muestra el error promedio y la volatilidad (medida como la varianza del error) para cada una de las métricas.

Tabla 5.1: Comparación de resultados bajo diferentes escenarios

Medida	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Error Prom.	Vol.	Error Prom.	Vol.	Error Prom.	Vol.
MAE	0,009	0,007	0,009	0,007	0,007	0,006
MAPE	1,246	1,007	1,246	1,007	0,754	0,689
RMSE	0,015	0,012	0,015	0,012	0,011	0,010
RMSPE	2,348	1,797	2,349	1,797	1,217	1,076

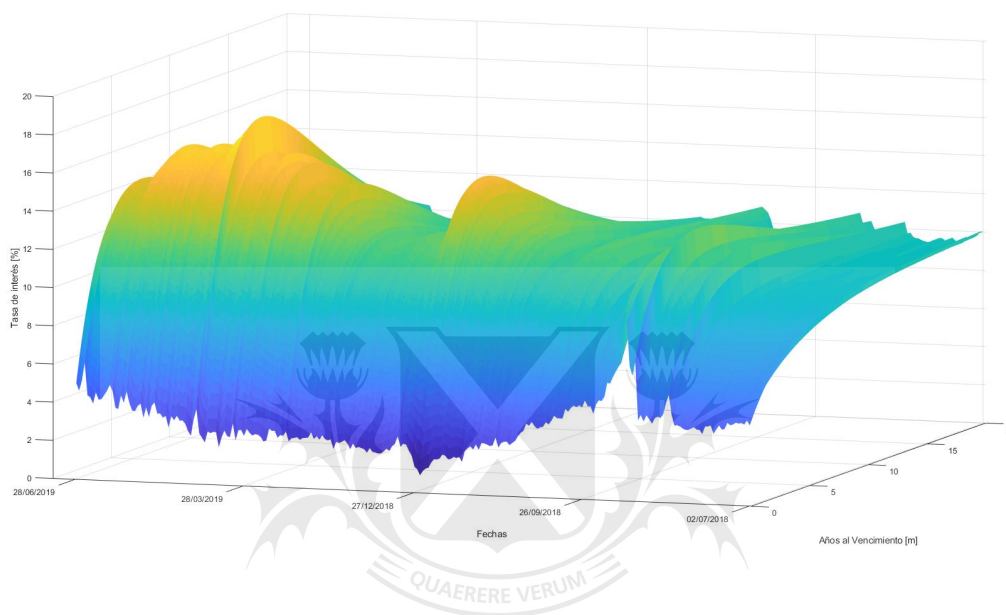
Como puede observarse en la Tabla 5.1, en ningún escenario se logra un nivel de ajuste significativamente alto. El mejor resultado, se obtiene al excluir los instrumentos en el tramo largo de la curva, alcanzando errores promedio de hasta 0,75 % con 65 % de volatilidad bajo la medida de MAPE, sensiblemente inferiores a los observados en los primeros dos casos.

Bajo la medida de RMSPE el error promedio no baja de 1,21 %. Esto se debe a la sensibilidad de la medida a valores atípicos, como los que empiezan a aparecer hacia el final del período bajo análisis. Este incremento de volatilidad, se hace evidente al analizar la evolución de la bondad de ajuste del modelo en el tiempo, en términos de la función objetivo 4.3, como puede apreciarse en la Figura 5.1.

Figura 5.1: Evolución de la bondad de ajuste del modelo

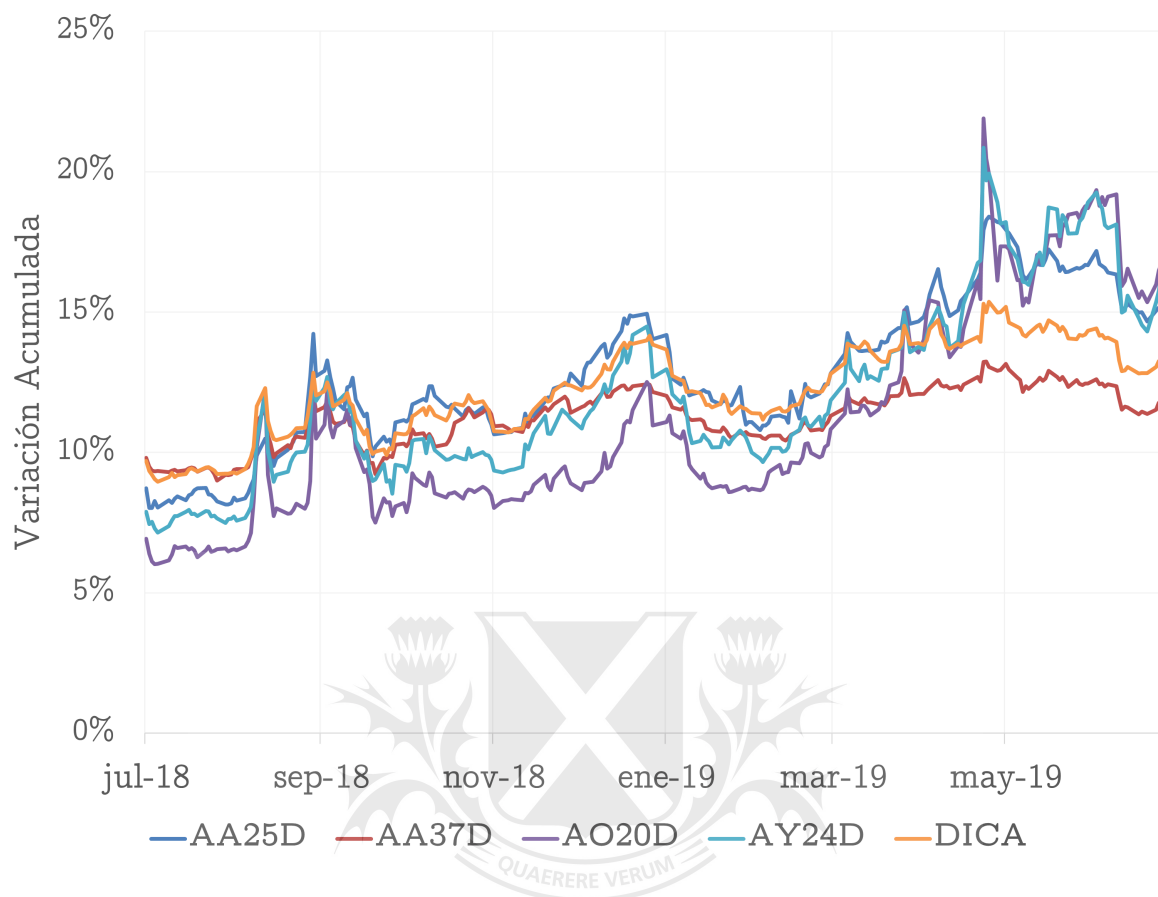
Bajo este y otros parámetros, se pueden observar quiebres en la evolución de ciertas variables, que coinciden en tiempo con los hitos mencionados en la sección 3.1. Esto se evidencia asimismo en la estructura irregular de superficie de tasas de interés generada por el modelo, la cual se puede observar en la Figura 5.2:

Figura 5.2: Evolución de las curvas cupón cero soberanas en dólares (Ley Argentina)



El quiebre más evidente se produce a fines de abril de 2019. El fuerte crecimiento de la deuda pública nacional, alcanzando niveles superiores al 88 % del PBI, sumado la persistencia de niveles de inflación superiores al 40 % nominal anual y el estancamiento relativo de la actividad económica derivan en un fuerte incremento del riesgo país y un salto discreto del tipo de cambio.

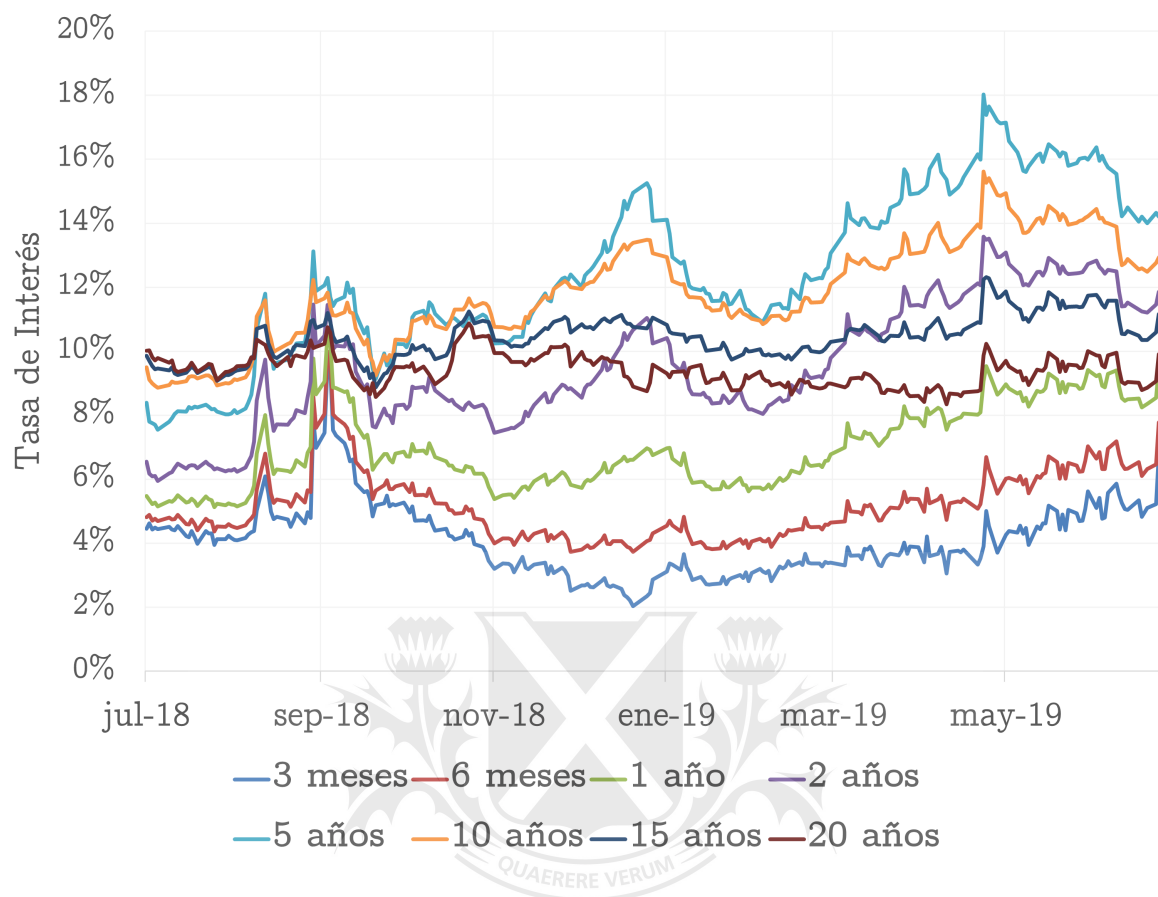
Como puede observarse en la Figura 5.3, a partir de este período los precios de mercado empiezan a reflejar un fuerte empinamiento de la curva de rendimientos, afectando principalmente a los instrumentos con amortizaciones y / o vencimientos en el tramo medio de la curva, donde se concentraba la mayor parte de la deuda.

Figura 5.3: Evolución del rendimiento de los bonos a precio de mercado

Universidad de

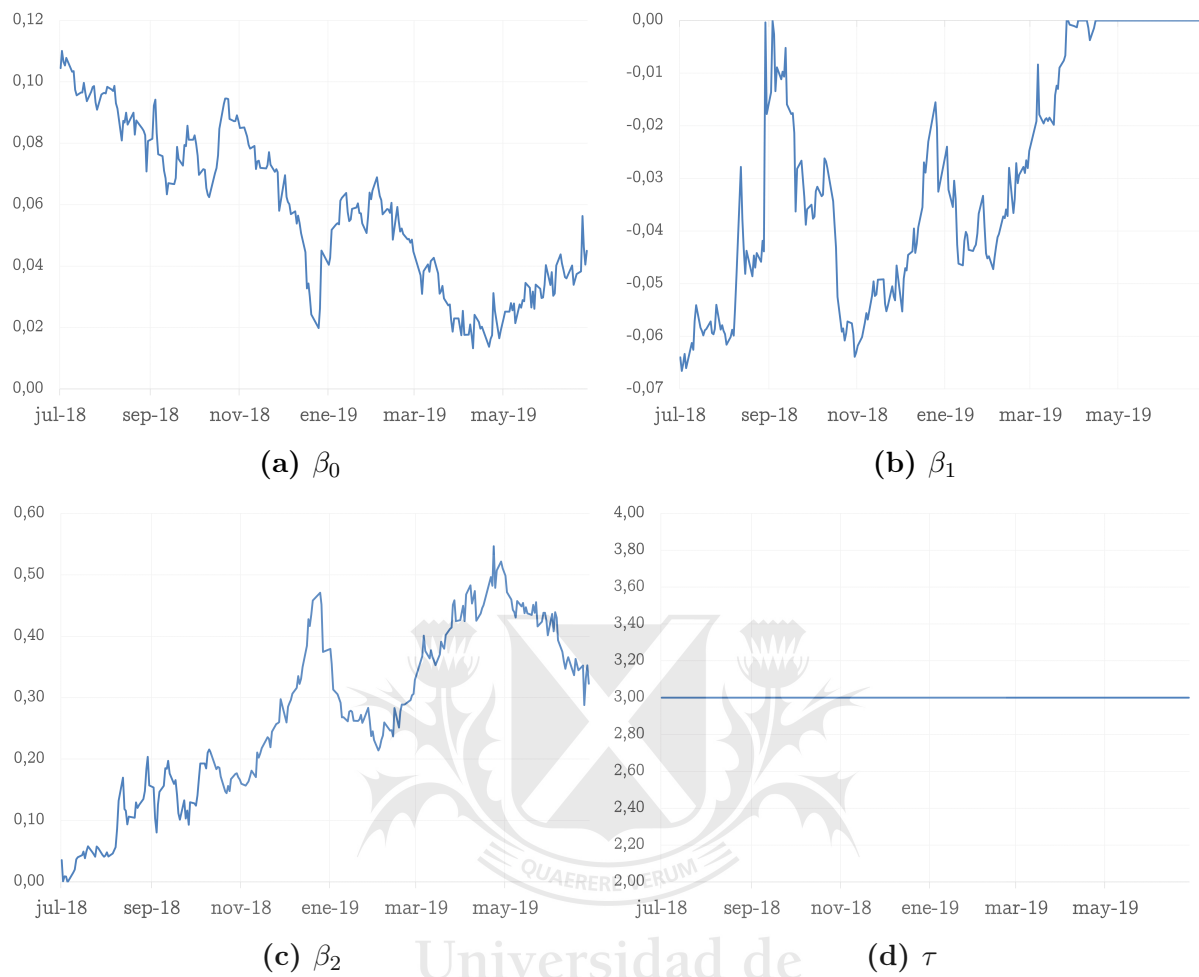
Se puede notar asimismo que dicho incremento no afecta de la misma manera a los instrumentos más largos, produciéndose un *spread* de más de 2% entre el tramo medio y largo. Esta pérdida de confianza en la capacidad de repago de los instrumentos del tramo medio es asimismo exacerbada por la incertidumbre creciente conforme se acercaba la fecha de votación del poder ejecutivo, en un contexto de gran incertidumbre política.

El mercado empezaba a descontar medidas adoptadas por el presente o el próximo régimen, las cuales finalmente se dieron en agosto 2019 cuando se decreta el reperfilamiento de varios instrumentos de deuda pública. Al analizar la evolución de los nodos de la curva cupón cero generada por el modelo (Figura 5.4), se puede apreciar cómo logra capturar el diferencial de *spreads* producido entre especies con distintos plazos de vencimiento.

Figura 5.4: Evolución de los nodos de la curva de Nelson y Siegel

Esta observación, es consistente asimismo con la evolución de los parámetros del modelo. Como se aprecia en la Figura 5.5 a continuación, los parámetros β_0 y β_1 , asociados con las tasas de corto y largo plazo respectivamente, se mantienen relativamente estables a lo largo del período. Los valores negativos de β_1 indican una estructura de tasas de descuento con pendiente positiva o "normal".

Por otra parte, β_2 , asociado con la tasa de mediano plazo, aumenta significativamente. Esto refuerza la noción de que se produce un "quiebre" en la curva, afectando principalmente el tramo medio, donde se concentran los vencimientos con mayor probabilidad de default. Finalmente τ , se mantiene invariable en el nivel fijado a los fines de obtener una curva más estable.

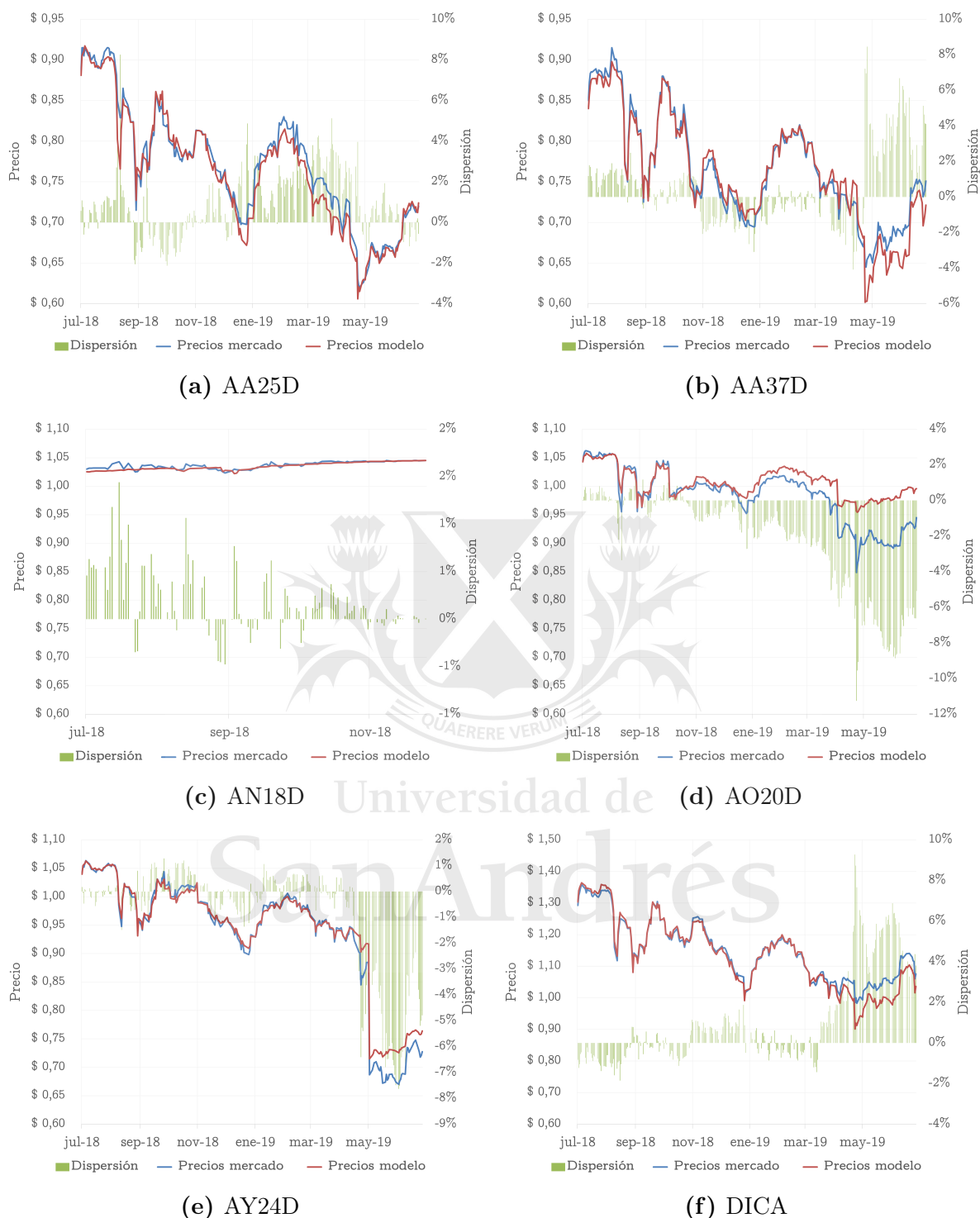
Figura 5.5: Evolución de los parámetros de la curva de Nelson y Siegel

La segmentación de la curva de tasas de interés presenta desafíos en su estimación, requiriendo mayor flexibilidad al modelo para adaptarse a la nueva estructura de tasas de interés, con una mayor amplitud entre los rendimientos de corto, mediano y largo plazo.

Pero, además, la crisis de confianza trae aparejada mayores niveles de volatilidad, que se refleja en la incertidumbre de los participantes del mercado y, por ende, en los precios de los instrumentos financieros.

En la Figura 5.6 se pueda observar cómo, en general, aumenta la dispersión entre el precio del modelo y el precio de mercado para cada bono, a lo largo del período bajo análisis (en el caso del AN18D, la dispersión disminuye conforme se acerca a su vencimiento).

Figura 5.6: Evolución de precios mercado vs precios modelo

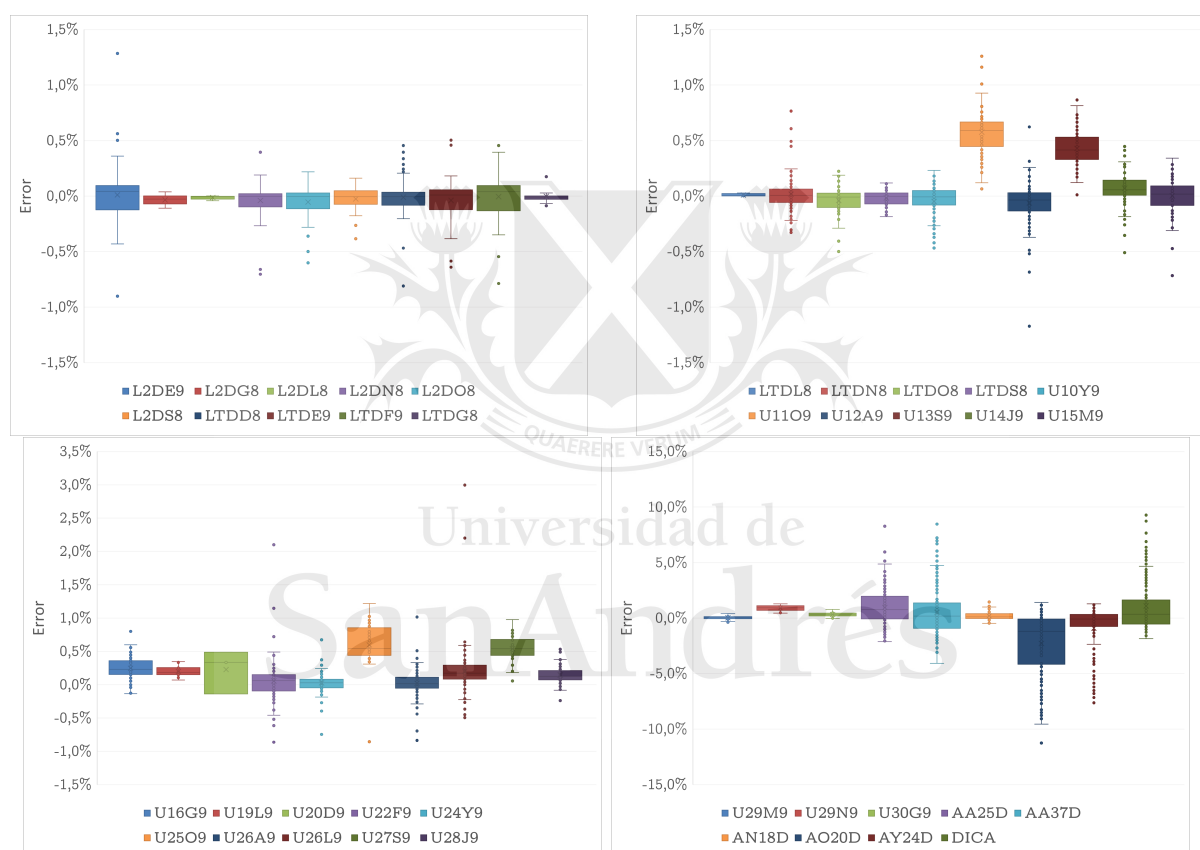


Aproximadamente en abril 2019, se puede distinguir un quiebre a partir del cual aumenta significativamente el error entre los precios estimados y los observados. Además, comienza a observarse un sesgo direccional para algunos bonos, en los cuales los errores comienzan a ser sistemáticamente positivos (o negativos) a partir de cierta fecha.

Cabe destacar sin embargo, que el modelo logra reducir la volatilidad de los precios de mercado, corroborándose la premisa de que permite producir curvas parsimoniosas.

La Figura 5.7 es una representación visual de la dispersión entre los precios modelo y los precios de mercado, utilizando diagramas de caja, donde los bordes de la caja representan los percentiles 25 y 75. El diagrama incluye también una línea central que representa la mediana, valores máximos y mínimos representados por las líneas horizontales, y valores atípicos representados por los círculos.

Figura 5.7: Diagrama de cajas para los errores de Letes y bonos



Finalmente, la Tabla 5.2 presenta estadísticas respecto a los errores obtenidos para cada instrumento.

Tabla 5.2: Detalle de errores obtenidos por bono

Detalle	AN18D	AO20D	AY24D	AA25D	DICA	AA37D
Promedio	0,200 %	-2,281 %	-0,904 %	0,958 %	1,099 %	0,512 %
Mínimo	-0,476 %	-11,245 %	-7,631 %	-2,129 %	-1,851 %	-4,081 %
Máximo	1,442 %	1,408 %	1,278 %	8,265 %	9,273 %	8,464 %



Universidad de
San Andrés

6. Estrategia de cobertura de riesgo

Como se menciona en la sección 4.3, los factores de Nelson y Siegel β_0 , β_1 y β_2 , son asociables a distintos aspectos de la estructura temporal de tasas de interés. En particular, su nivel, pendiente y curvatura.

Algunos autores han estudiado la reacción de estos tres componentes ante cambios en la política monetaria y otras variables macroeconómicas. Por ejemplo, [Litterman and Scheinkman \(1991\)](#) han observado que un incremento de las expectativas de inflación puede generar un empinamiento de la curva (crecimiento de β_2), al alentar a los administradores de cartera a estirar duración.

Además, los autores encuentran evidencia empírica que sugiere que la variación en los retornos de instrumentos de renta fija puede ser mayoritariamente explicada por cambios en los factores nivel, pendiente y curvatura.

Esto hace posible elaborar estrategias de cobertura, procurando incorporar instrumentos a la cartera a fin de lograr un portafolio de duración cero: inmunizado ante cambios en cualquiera de los tres factores.

A tal fin, se reexpresan los regresores de la función de la curva cupón cero derivada del modelo de Nelson y Siegel, a fines de identificar cada uno de los factores:

$$r_m(n, p, c) = n + pK(m) + c(K(m) - k(m)), \quad (6.1)$$

donde:

$$k(m) = e^{-\frac{m}{\tau}}$$

$$K(m) = \frac{1 - k(m)}{\frac{m}{\tau}}$$

Luego, aplicado a la función definida para la estimación del precio teórico de un bono, se obtiene un mecanismo de valuación que depende de los parámetros n , p y c , independientes entre sí:

$$P_i^* = \sum_{j=1}^T C_j e^{-r(m_j)m_j} = \sum_{j=1}^T C_j e^{-(n+pK(m_j)+c(K(m_j)-k(m_j)))m_j} \quad (6.2)$$

Asumiendo τ fijo, esta función depende exclusivamente de la *maturity* m . Derivando respecto de cada parámetro, se obtiene una descomposición de la duración en cada uno de sus factores de riesgo: nivel, pendiente y curvatura. Las siguientes ecuaciones calculan las sensibilidades del precio de un bono, ante cambios en cada uno de los tres factores:

$$SN = \frac{dP(n, p, c)}{dn} = \sum_{j=1}^T C_j e^{-(n+pK(m_j)+c(K(m_j)-k(m_j)))m_j} m_j \quad (6.3)$$

$$SP = \frac{dP(n, p, c)}{dp} = \sum_{j=1}^T C_j e^{-(n+pK(m_j)+c(K(m_j)-k(m_j)))m_j} m_j K(m_j) \quad (6.4)$$

$$SC = \frac{dP(n, p, c)}{dc} = \sum_{j=1}^T C_j e^{-(n+pK(m_j)+c(K(m_j)-k(m_j)))m_j} - m_j (K(m_j) - k(m_j)) \quad (6.5)$$

La sensibilidad de una cartera A ante un cambio en alguno de los factores, es una sumatoria de las sensibilidades de cada bono, ante un cambio en ese mismo factor:

$$SNA(n, p, c) = \sum_{i=1}^N q_i SN_i(n, p, c) \quad (6.6)$$

$$SPA(n, p, c) = \sum_{i=1}^N q_i SP_i(n, p, c) \quad (6.7)$$

$$SCA(n, p, c) = \sum_{i=1}^N q_i SC_i(n, p, c), \quad (6.8)$$

donde q_i representa la cantidad del bono i en la cartera A .

Para lograr la inmunización, es necesario construir una cartera de cobertura H , cuyas sensibilidades contrarresten las de la cartera original, de tal manera que la sensibilidad total de ambas carteras sea nula, ante variaciones en el nivel, pendiente y/o curvatura de la curva de tasas. Es decir, una cartera H tal que:

$$SNA_0(n, p, c) + SNH_0(n, p, c) = 0 \quad (6.9)$$

$$SPA_0(n, p, c) + SPH_0(n, p, c) = 0 \quad (6.10)$$

$$SCA_0(n, p, c) + SCH_0(n, p, c) = 0 \quad (6.11)$$

Además, para que el costo de la cobertura sea nulo, debe cumplirse que:

$$H_0 = \sum_{i=1}^4 h_{i,0} H_{i,0}, \quad (6.12)$$

donde $h_{i,0}$ y $H_{i,0}$ representan la cantidad y el precio del bono i respectivamente, en el instante $t = 0$.

Dado el sistema de cuatro ecuaciones, la cartera de cobertura debe tener cuatro bonos con flujos linealmente independientes para obtener una solución única. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones a resolver en el instante inicial $t = 0$, viene dado por:

$$SNA_0 + h_{1,0}SN_{1,0} + h_{2,0}SN_{2,0} + h_{3,0}SN_{3,0} + h_{4,0}SN_{4,0} = 0 \quad (6.13)$$

$$SPA_0 + h_{1,0}SP_{1,0} + h_{2,0}SP_{2,0} + h_{3,0}SP_{3,0} + h_{4,0}SP_{4,0} = 0 \quad (6.14)$$

$$SCA_0 + h_{1,0}SC_{1,0} + h_{2,0}SC_{2,0} + h_{3,0}SC_{3,0} + h_{4,0}SC_{4,0} = 0 \quad (6.15)$$

$$h_{1,0}H_{1,0} + h_{2,0}H_{2,0} + h_{3,0}H_{3,0} + h_{4,0}H_{4,0} = 0, \quad (6.16)$$

donde SXA_0 representa la sensibilidad total de la cartera A en el instante $t = 0$ ante variaciones en el factor X y $SX_{i,0}$ representa la sensibilidad del bono i de la cartera H en el instante $t = 0$ ante cambios en el factor X (nivel, pendiente o curvatura).

Habiendo despejado las cantidades $h_{i,0}$ que resuelven el sistema de ecuaciones, se puede estimar la valuación de la cartera total en el instante $t = 1$, utilizando una aproximación de Taylor de primer orden (ya que el valor de la cartera es una función continua de los factores de riesgo):

$$A_1(n, p, c) \approx A_0(n, p, c) + [SNA_0(n, p, c) + SNH_0(n, p, c)](N_1 - N_0) + [SPA_0(n, p, c) + SPH_0(n, p, c)](P_1 - P_0) + [SCA_0(n, p, c) + SCH_0(n, p, c)](C_1 - C_0) + \epsilon$$

Por lo tanto, para las cantidades óptimas $h_{i,0}$, se cumple que:

$$A_1(n, p, c) \approx A_0(n, p, c) \quad (6.17)$$

En el instante $t = 1$, dadas las nuevas sensibilidades, las cantidades se vuelven obsoletas a la hora de lograr la inmunización, por lo que se hace necesario hacer un rebalanceo de la cartera. A tal fin, se vuelven a calcular las cantidades óptimas de la cartera de cobertura, resolviendo el mismo sistema de ecuaciones que en $t = 0$, para las nuevas sensibilidades:

$$SNA_1(n, p, c) + SNH_1(n, p, c) = 0 \quad (6.18)$$

$$SPA_1(n, p, c) + SPH_1(n, p, c) = 0 \quad (6.19)$$

$$SCA_1(n, p, c) + SCH_1(n, p, c) = 0 \quad (6.20)$$

Nuevamente, se procura que el costo de la cobertura sea nulo, por lo que también debe cumplirse que, dadas las nuevas cantidades y valuaciones, el valor de H se mantenga:

$$H_1 = \sum_{i=1}^4 h_{i,1} H_{i,1} = \sum_{i=1}^4 h_{i,0} H_{i,0} \quad (6.21)$$

Este proceso, se repite día a día a lo largo del período bajo análisis.

7. Resultados empíricos cobertura

Para determinar la efectividad de la estrategia de cobertura, se realiza un estudio empírico partiendo de una cartera hipotética conformada por dos Letes (U24Y9 y U26A9) y un bono (AO20D). Se procura inmunizar la cartera incorporando al portfolio una cartera de cobertura conformada por cuatro bonos (AA25D, AA37D, AY24D y DICA).

La cantidad nominal de la cartera original será de 2.000 para cada instrumento. Las cantidades para la cartera de cobertura se determinarán a partir de la resolución del sistema de ecuaciones planteado en la Sección 6, tanto para su etapa inicial como para su rebalanceo diario.

La Figura 7.1 muestra la evolución de las cantidades nominales de bonos para la cartera de cobertura. La Figura 7.2 muestra la variación de la valuación de la cartera sin cobertura y con cobertura (i.e.: la suma de la valuación de la cartera original más la cartera de cobertura).

Figura 7.1: Evolución de las cantidades nominales de la cartera de cobertura

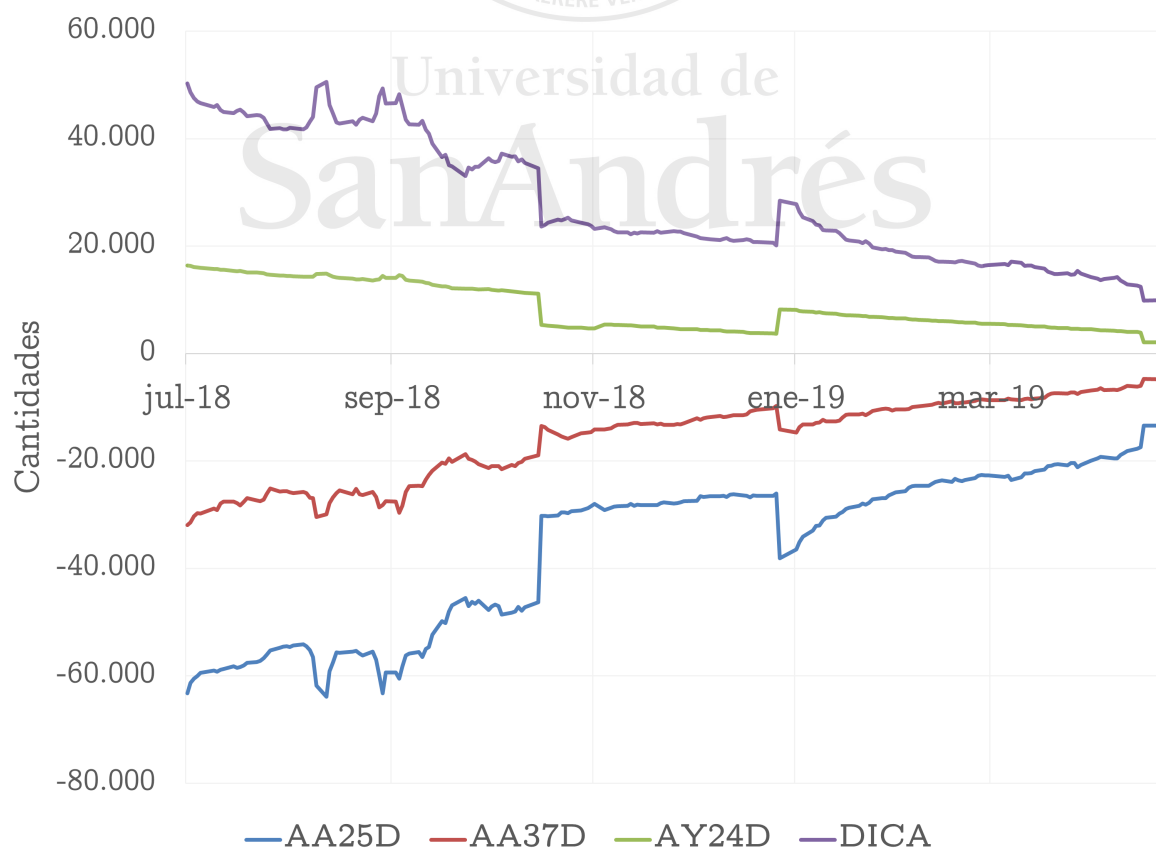
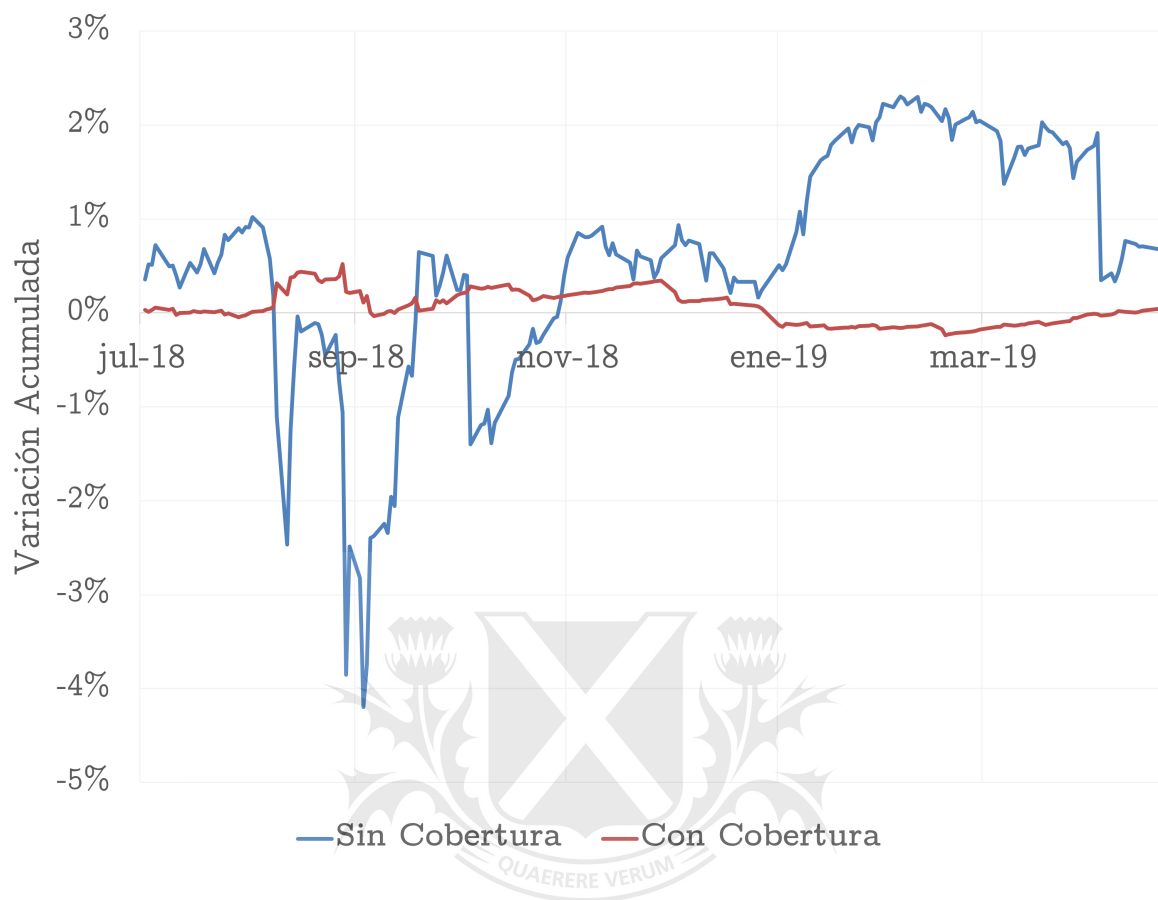


Figura 7.2: Variación de la cartera con y sin cobertura

Desde el punto de vista de la valuación, la cartera de cobertura logra inmunizar en gran medida a la cartera original ante cambios en los factores pendiente, nivel y curvatura. La cartera original llega a tener una caída de hasta -4,2 %, recuperándose luego hasta alcanzar un +2,3 %. Al incorporar los bonos de cobertura sin embargo, la cartera total no se llega a mover más de un 0,52 %.

Desde el punto de vista de la composición de la cartera por otra parte, no se observa el mismo nivel de estabilidad. Como puede observarse, las cantidades de la cartera de cobertura son significativamente altas y fluctúan todos los días. Esto se debe, entre otras cosas, al cobro de cupones de bonos que afectan su precio y el capital disponible para invertir.

La necesidad recurrente de rebalancear una cartera de esa magnitud, implica incurrir en altos costos transaccionales. Típicamente, existen tres tipos de costos asociados a la operatoria de bonos en los mercados argentinos BYMA y MAE, a través de una ALyC

(Agente de Compensación y Liquidación):

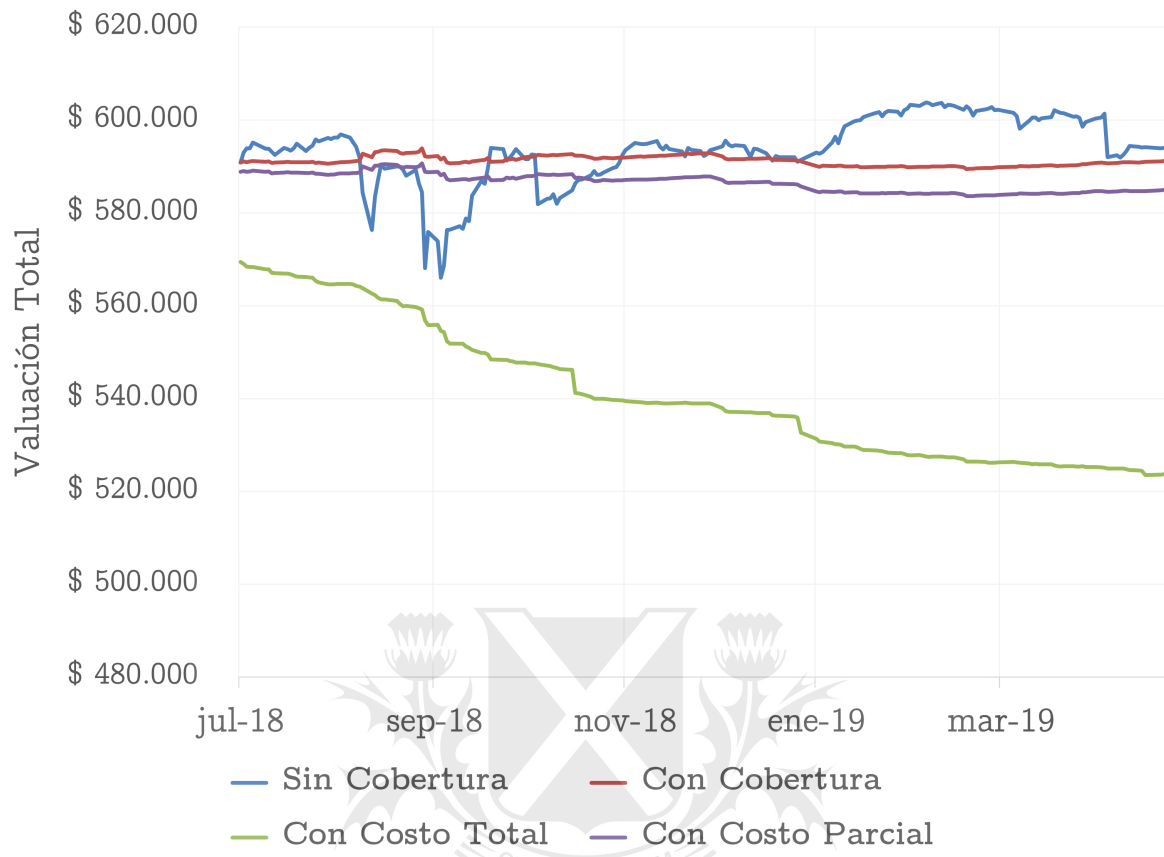
- **Comisiones o Aranceles:** este es uno de los principales costos involucrados en la transacción. El mismo varía dependiendo de la ALyC con la que se opera y, generalmente, varía también dependiendo del volumen operado. En promedio, para grandes volúmenes equivale al 0,1 % aproximadamente del monto total operado.
- **Derechos de Mercado:** este costo varía dependiendo del tipo de operación y mercado, pero a fines prácticos se redondea en 0,01 %.
- **Impuestos:** el único impuesto aplicable de forma directa a la transacción es el Impuesto al Valor Agregado (IVA), que equivale al 0,21 % del resto de los costos transaccionales.

Sin embargo, en los últimos años han aparecido *brokers* que no cobran comisiones o aranceles. Por lo tanto, el costo transaccional de comprar bonos pasaría estar conformado únicamente por los derechos de mercados y los impuestos asociados. Al ser la principal erogación la que se suprime, esto implica un cambio de paradigma a la hora de abordar este tipo de estrategias.

En la Figura 7.3, se expone la evolución de la valuación de la cartera ante cuatro diferentes escenarios: 1) Sin cobertura; 2) Con cobertura, pero sin costos; 3) Con cobertura, teniendo en cuenta los costos totales; y 4) Con cobertura, teniendo en cuenta únicamente costos asociados a derechos de mercado e impuestos.

Como puede observarse, el resultado de implementar la estrategia de cobertura cambia sustancialmente cuando se excluyen comisiones y aranceles. En el escenario N° 3, los costos implican un fuerte desembolso inicial, seguido de ajustes por rebalanceo que, al cabo de un año, acumulan costos por más del 11 % del valor de la cartera.

Por otro lado, en el escenario N° 4, los costos llegan a representar aproximadamente 1 % de su valor al cabo de un año.

Figura 7.3: Evolución de la valuación de la cartera en diferentes escenarios

8. Conclusión

Durante la mayor parte del período bajo análisis, el modelo logra producir una superficie uniforme de tasas de interés, con niveles de error promedio menores a 0,5%. A partir de abril de 2019 sin embargo, el deterioro del marco macroeconómico culmina en una crisis de confianza que afecta principalmente al tramo medio de la curva.

Los precios de mercado empiezan a reflejar un fuerte empinamiento de la curva de rendimientos, que la forma funcional de Nelson y Siegel no logra capturar del todo, produciendo un decrecimiento en la capacidad de ajuste del modelo.

La estrategia de cobertura de riesgo, se elabora a partir de la utilización de las curvas cupón cero obtenidas en la calibración del modelo. En particular, se hace uso de los parámetros β_0 , β_1 y β_2 que componen la forma funcional de Nelson y Siegel, los cuales se asocian a los tres aspectos principales de la estructura de tasas de interés: nivel, pendiente y curvatura.

La aplicación de la estrategia consiste en armar un *portfolio* de cobertura con sensibilidades a los factores mencionados que contrarresten aquellas del *portfolio* original, logrando una inmunización total ante cambios de los mismos; duración cero.

A pesar de la turbulencia que se evidencia hacia el final del período bajo análisis, la estrategia de cobertura logra reducir significativamente la volatilidad en la valuación de la cartera. No se observa el mismo nivel de estabilidad sin embargo, en las cantidades de la cartera de cobertura: las mismas son significativamente altas y varían todos los días.

Los resultados empíricos obtenidos a partir de la aplicación práctica de la estrategia de cobertura, sugieren que la misma resulta inviable cuando se consideran los costos típicamente asociados a la operatoria de bonos: comisiones o aranceles, derechos de mercado e impuestos. Por otro lado, si los costos arancelarios se reducen a cero, el costo transaccional de la estrategia pasa a ser significativamente más bajo.

En los últimos años han aparecido en Argentina y en el mundo, una serie de *brokers*, que permiten operar libre de comisiones. A pesar del cuestionamiento respecto de la rentabilidad de este tipo de firmas, muchas subsisten hasta hoy, habiendo repensado su modelo de negocios.

Independientemente de eso, existe una tendencia global de reducción de costos de transporte y/o transaccionales en muchos sectores. Esto se debe en gran parte al creciente uso de tecnologías de la información y la comunicación, que permiten a las empresas realizar transacciones comerciales de manera más eficiente y reducir los costos asociados con el transporte, logística y ejecución.

Ante la evidencia de la efectividad de la estrategia de cobertura planteada en un escenario de costos transaccionales despreciables, y el cambio de paradigma que se está gestando a nivel global, se concluye que tiene sentido visitar la utilización de factores de Nelson y Siegel, para lograr inmunización total de un *portfolio* ante cambios en los tres factores principales que afectan la estructura de tasas de interés: nivel, pendiente y curvatura.



Universidad de
San Andrés

9. Líneas de trabajo abiertas

9.1. Correlación parámetros de Nelson y Siegel

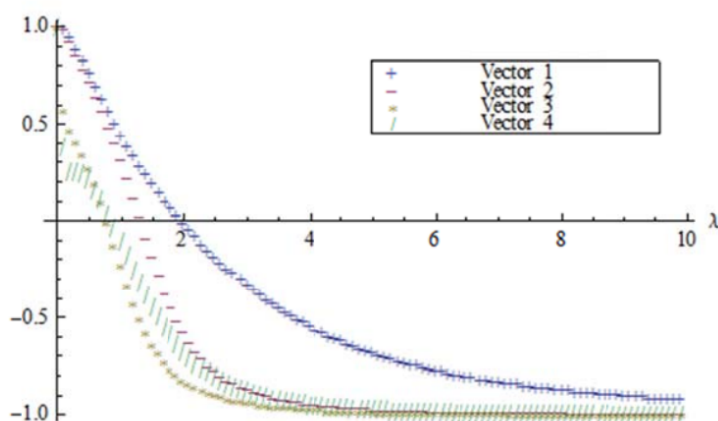
Al analizar visualmente el movimiento de los parámetros de Nelson y Siegel, pareciera observarse cierto grado de correlación entre los mismos (ver Figura 5.5). La existencia de multicolinealidad tiende a ocasionar problemas toda vez que dificulta determinar la contribución de cada variable al modelo, pudiendo generar parámetros inestables y poco confiables. Altos niveles de correlación entre las variables también tienden a incrementar los niveles de errores en la estimación de los coeficientes.

Este fenómeno ha sido observado y revisado por varios autores en el pasado. Por ejemplo, [Diebold and Li \(2006\)](#) y [Fabozzi et al. \(2005\)](#) lidian con los potenciales inconvenientes causados por la colinealidad mediante la linearización del modelo, lograda al dejar fijo el factor τ .

[Annaert et al. \(2012\)](#) encuentran efectiva esta estrategia, siempre y cuando el factor τ sea elegido adecuadamente, para lo cual es preciso considerar el vector de plazos con el que se esté trabajando. En particular, observan que la curva de correlaciones entre los factores pendiente y curvatura para distintos niveles de τ depende de dicho vector.

En la Figura 9.1 se exponen los resultados del análisis llevado a cabo por los autores, donde contrastan las curvas de correlaciones para 4 vectores de *maturities* en particular.

Figura 9.1: Correlación entre los factores pendiente y curvatura



Fuente: ([Annaert et al., 2012](#))

En el presente trabajo el factor τ también es fijado, teniendo en cuenta el promedio de valores obtenidos en una serie de optimizaciones donde se lo deja libre. Es decir, se escoge un valor basado en la minimización de la función objetivo, que no necesariamente tiene en cuenta el problema de multicolinealidad.

La evidencia empírica obtenida en este trabajo refuerza la hipótesis de [Annaert et al. \(2012\)](#) dado que, como puede apreciarse en la Tabla 9.1, existe un alto grado de correlación entre los factores de Nelson y Siegel estimados.

Tabla 9.1: Coeficiente de correlación entre los parámetros de Nelson y siegel

coef.	$\beta_0 y \beta_1$	$\beta_0 y \beta_2$	$\beta_1 y \beta_2$
r[%]	-83.2	-97.8	78.0

[Annaert et al. \(2012\)](#) argumentan que la fijación de τ ignora el hecho de que la "joroba" de la estructura de tasas de interés varía en el tiempo, y proponen lidiar con el problema de multicolinealidad mediante la aplicación del método de regresión de Ridge.

Futuras estimaciones de la estructura de tasas de interés asociada al universo de instrumentos de renta fija soberanos, denominados en dólares y regidos por la Ley de la República Argentina, podrían investigar dicha metodología; o procurar fijar un valor de τ que considere el vector de plazos con el que se está trabajando, de manera similar a como lo hacen [Diebold and Li \(2006\)](#) y [Fabozzi et al. \(2005\)](#).

9.2. Utilización de derivados para la estrategia de cobertura

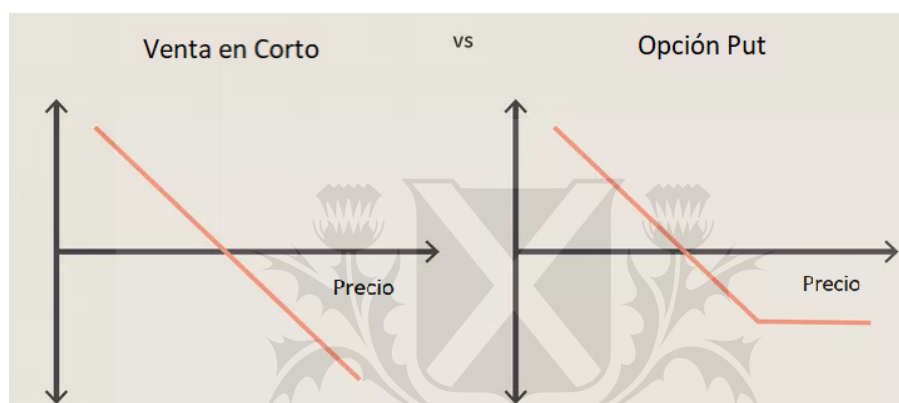
Como se desprende de los resultados empíricos, para la implementación de la estrategia de cobertura es necesario tomar una posición corta en bonos. En Argentina, este tipo de operaciones fueron habilitadas en abril de 2018, incluyendo la venta en corto, el plazo por lotes o el alquiler de títulos.

En otras jurisdicciones, típicamente se utilizan otros tipos de mecanismos para elaborar estrategias de cobertura. En particular, se destaca el uso de derivados como opciones y futuros. Si bien en Argentina la operación de este tipo de instrumentos está habilitada, el

mercado de derivados es acotado y no tiene mucha profundidad. De hecho, en la actualidad no existen ruedas para operar opciones o futuros de bonos.

Una ventaja fundamental que ofrece la utilización de opciones es la posibilidad de acotar el riesgo dado que, en caso de que los movimientos de mercado sean contrarios a los esperados o haya un aumento de volatilidad, la pérdida de la estrategia queda limitada al costo del instrumento, que finalmente no se ejecuta. Los diferentes resultados de cada estrategia se contrastan en la Figura 9.2.

Figura 9.2: Resultados estrategia venta en corto vs put



Fuente:

<https://www.investopedia.com/articles/trading/092613/difference-between-short-selling-and-put-options.asp>

Universidad de

San Andrés

Además, la venta en corto suele requerir la cobertura de parte del riesgo asociado con garantías, las cuales se actualizan periódicamente, por lo que los costos transaccionales son superiores.

Otro instrumento que podría explorarse para la elaboración de estrategias de cobertura de instrumentos de renta fija, es el *credit default swap* o CDS. Si bien este tipo de activo se utiliza específicamente para cobertura ante eventos de crédito, los mismos suelen apreciarse ante una suba de tasas que incrementa el riesgo de *default*. Sin embargo, este tipo de instrumento tampoco se encuentra disponible en el mercado de capitales local.

Referencias

- Annaert, J., Claes, A. G. P., de Ceuster, M. J. K., and Zhang, H. (2012). Estimating the yield curve using the nelson-siegel model: A ridge regression approach. *International Review of Economics Finance, Forthcoming*.
- Bolder, D. and Strélski, D. (1999). Yield curve modelling at the bank of canada. *Bank of Canada Technical Repots*, 84.
- Coroneo, L., Nyholm, K., and Vidova-Koleva, R. (2008). How arbitrage-free is the nelson-siegel model? *ECB Working Paper*, 874.
- Cox, J. C., Ingersoll, J. E., and Ross, S. A. (1985). A theory of the term structure of interest rates. *Econometrica*, 53(2):385–407.
- Diebold, F. X. and Li, C. (2006). Forecasting the term structure of government bond yields. *Journal of Econometrics*, 130:337–364.
- Fabozzi, F. J., Martellini, L., and Priaulet, P. (2005). Predictability in the shape of the term structure of interest rates. *The Journal of Fixed Income*, 15(1):40–53.
- Herrera B., L. and Magendzo W., I. (1997). Expectativas financieras y la curva de tasas forward de Chile. *Documentos de Trabajo del Banco Central de Chile*, 23.
- Litterman, R. B. and Scheinkman, J. (1991). Common factors affecting bond returns. *The Journal of Fixed Income*, 1(1):54–61.
- McCulloch, J. H. (1971). Measuring the term structure of interest rates. *The Journal of Business*, 44(1):19–31.
- Mineo, E., Pereira Alencar, A., Moura, M., and Fabris, A. E. (2020). Forecasting the term structure of interest rates with dynamic constrained smoothing b-splines. *Journal of Risk and Financial Management*, 13(4):65.
- Nelson, C. R. and Siegel, A. F. (1987). Parsimonious modeling of yield curves. *The Journal of Business*, 60(4):473–489.
- Pereda C., J. (2010). Estimación de la curva de rendimiento cupón cero para el Perú y su uso para el análisis monetario. *Economía*, 33(65):103–132.
- Shea, G. S. (1985). Long memory models of interest rates, the term structure, and variance bounds tests. *Board of Governors of the Federal Reserve System (U.S.) International Finance Discussion Papers*, 258.
- Subramanian, K. (2001). Term structure estimation in illiquid markets. *The Journal of Fixed Income*, 11(1):77–86.
- Svensson, L. E. O. (1994). Estimating and interpreting forward interest rates: Sweden 1992-1994. *IMF Working Paper*, WP/94/114.
- Vasicek, O. (1977). An equilibrium characterization of the term structure. *Journal of Financial Economics*, 5(2):177–188.
- Vasicek, O. and Fong, H. G. (1982). Term structure modeling using exponential splines. *The Journal of Finance*, 37(2):339–348.

Apéndice

A1. Anexo A

Tabla A1.1: Parámetros iniciales

Set	β_0	β_1	β_2
01	0.1	-0.085	-0.1
02	0.1	-0.085	-0.1
03	0.1	-0.085	-0.1
04	0.1	-0.085	0.1
05	0.1	-0.085	0.1
06	0.1	-0.085	0.1
07	0.09	-0.075	-0.1
08	0.09	-0.075	-0.1
09	0.09	-0.075	-0.1
10	0.09	-0.075	0.1
11	0.09	-0.075	0.1
12	0.09	-0.075	0.1
13	0.08	-0.055	-0.1
14	0.08	-0.055	-0.1
15	0.08	-0.055	-0.1
16	0.08	-0.055	0.1
17	0.08	-0.055	0.1
18	0.08	-0.055	0.1
19	0.07	-0.055	-0.1
20	0.07	-0.055	-0.1
21	0.07	-0.055	-0.1
22	0.07	-0.055	0.1
23	0.07	-0.055	0.1
24	0.07	-0.055	0.1