



***Escuela de Administración y Negocios***

***Magister en Finanzas***

*Trabajo Final de Graduación*

**“Estimación curva cupón cero soberana  
en moneda nacional y su utilización para  
la administración de riesgos”**

Autor: Leonardo Bruno Rispoli

DNI: 31.703.992

Director: Marcelo Zincenko

Buenos Aires, Argentina – Noviembre de 2018

## Índice general

---

Resumen	3
Introducción	3
Revisión bibliográfica	4
Desarrollo modelo de Nelson y Siegel	5
Bonos emitidos en moneda local	7
Resultados empíricos	11
Inmunización de carteras	17
Conclusiones	21
Referencias bibliográficas	22



Universidad de  
**San Andrés**

## Resumen

---

El objetivo del presente trabajo es realizar una estimación de la curva cero cupón soberana en moneda local de la República Argentina para el período marzo 2017 – abril 2018, utilizando el modelo de Nelson y Siegel (1987). Posteriormente se planteará y probará una herramienta para la inmunización de una cartera de activos locales a cambios en el nivel, pendiente y curvatura de la curva de tasas de interés.

En primer término, el escrito repasará el desarrollo teórico del modelo, para luego describir la metodología utilizada para obtener una base de precios consistentes, dada la relativa iliquidez de los instrumentos del mercado de bonos local, que permita inferir una curva suave y estable. El resultado obtenido es una curva suave con un buen ajuste a los precios de los bonos en pesos para el período estimado.

A partir de esta curva, se desarrollará la herramienta propuesta para la administración del riesgo en una cartera de bonos. Para ello, se construirá una cartera de bonos para un período reducido de tiempo con cobertura, siguiendo la metodología presentada por Ram Willner (1996). Los resultados obtenidos son interesantes desde el plano teórico, pero la herramienta presenta problemas de implementación al considerar los costos de transacción.

## Introducción

---

Los mercados financieros proporcionan una gran cantidad de información a los agentes económicos para guiarlos en la toma de decisiones, destacándose la estructura temporal de las tasas de interés vigente en la economía. Las tasas de interés no sólo permiten conocer el valor tiempo del dinero y la relación intertemporal del valor de los bienes y el consumo, sino que también nos permite valorar activos financieros y tomar decisiones sobre proyectos de inversión. Además, la estructura temporal de tasas de interés contiene información agregada de los agentes económicos sobre la actividad económica, las perspectivas de crecimiento y la inflación futura.

Esta es la razón por la que la estimación de la curva cero cupón implícita en el mercado de bonos ha concentrado el interés profesional en las últimas décadas: por un lado, contar con curvas de rendimiento permite la valuación de instrumentos financieros, opcionalidades y proyectos de inversión; por el otro, se convierte en una herramienta para el gobierno y/o la autoridad monetaria de un país a la hora de definir políticas económicas.

Sin embargo, estimar la curva cero cupón en Argentina ha sido (y, parcialmente, sigue siendo) una tarea por demás compleja debido a: a) la escasez de instrumentos financieros; b) los bajos volúmenes de operación, que no sólo aumentan la prima por iliquidez contenida en los precios sino que también permiten que operaciones no representativas marquen el precio o directamente haya varios días hábiles consecutivos sin precios para determinados activos; c) los recurrentes eventos de quiebre macroeconómico que introducen volatilidad al mercado y dificultan obtener resultados consistentes a lo largo del tiempo.

Afortunadamente, desde 2016 el mercado de bonos argentino en pesos ha ganado cierto grado de profundidad con la emisión de nuevos instrumentos a mediano plazo, a pesar de la alta

inflación que aún rige en la economía, y la estabilidad financiera hasta principios de 2018 han dado lugar para la consolidación de un mercado de activos en pesos. Adicionalmente trabajos de investigación como el de Marcelo Zencenko (2015) y el de Gastón De Batista (2018), por ejemplo, han establecido los caminos metodológicos iniciales para la estimación de una curva consistente para el mercado local, y nos permiten avanzar en el desarrollo de aplicaciones prácticas para la administración de riesgos.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: en la primera parte se desarrolla la metodología para la estimación de la curva cero cupón, se detallan las características del mercado y los datos que se van a utilizar y se analizan los resultados obtenidos; finalmente, en la segunda parte, se presenta teóricamente la herramienta de administración de riesgos y se realiza una muestra práctica, a partir de la cual se obtienen conclusiones y posibles líneas de análisis futuros.

## Revisión bibliográfica

---

La estimación de la estructura temporal de tasas de interés es un tema que se viene trabajando activamente en la profesión económica desde hace unos 50 años y ha dado lugar a diversas corrientes de enfoques metodológicos: modelos polinómicos de ajustes de curvas, modelos paramétricos estáticos / parsimoniosos y modelos paramétricos dinámicos.

- Modelos polinómicos: El origen de estos modelos es puramente matemático. Buscan la curva que mejor interpole los precios de mercado, sin aportarle una interpretación económica. Por defecto de construcción, estos métodos brindan un buen ajuste a los datos observados y una baja confiabilidad para valorizar instrumentos en el rango interpolado. En estos modelos, la calidad de la estimación es altamente dependiente de la cantidad de puntos iniciales sobre los que se realiza la interpolación y la falta de puntos en ciertas zonas acrecienta el error de ajuste. Algunas cuestiones a tener en cuenta son: a) Al realizar la interpolación sobre la tasa spot, debe prestarse atención a la curva forward que se obtiene (es importante que se mantenga la continuidad, la positividad, la condición de no arbitraje a lo largo de toda la curva obtenida y la tasa de interés debe ser estable); b) En este modelo, el cambio en un parámetro de entrada afecta sólo localmente a la estimación y no a toda la curva.
- Modelos paramétricos estáticos / parsimoniosos: Con el objeto de simplificar el excesivo número de parámetros que se deben estimar en los métodos de interpolación, surgieron modelos que pudieran inferir la estructura de tasa de interés a partir de un número reducido de parámetros, los cuales además pudieran asignárseles interpretación económica. El principio subyacente de los modelos paramétricos es la especificación de una única función que se define sobre el dominio de la madurez completa. Mientras que los diversos enfoques en esta clase de modelos defienden diferentes opciones de esta función, todos comparten el enfoque general de que los parámetros del modelo se determinan a través de la minimización de las desviaciones cuadradas de los precios teóricos de los precios observados. En esta categoría se encuentran los modelos de Nelson y Siegel (1987), Svensson (1994), y Bolder y Stréliski (1999, Banco Central de Canadá).
- Modelos paramétricos dinámicos: Se mencionó que los modelos estáticos de estimación dejan de lado la evolución que presentan las tasas de interés en el tiempo; desaprovechándose información valiosa que se encuentra contenida en sus procesos

dinámicos. El estudio de la dinámica de tasas de interés busca no sólo explicar la estructura de tasas, sino además el comportamiento de las volatilidades de dichas tasas y los efectos que relacionan los tipos de interés de plazos diferentes. Para esto, los modelos dinámicos de equilibrio y/o arbitraje son calibrados a partir de información histórica, a partir de los cuales pueden ser inferidos los distintos efectos mencionados. El más destacado dentro de esta categoría es el modelo de Cox, Ingersoll y Ross (1985).

En los últimos 25 años, la práctica profesional ha empoderado a los modelos paramétricos parsimoniosos por su equilibrio entre el buen ajuste de los modelos a los datos de mercado, su relativa facilidad para el cálculo y, principalmente, la capacidad de dotar de interpretación económica a los parámetros estimados que para poder tomar decisiones de política monetaria o que los agentes económicos puedan realizar decisiones económicas. Los principales bancos centrales han adoptado variaciones de los modelos de Nelson y Siegel o Svensson.

En la Argentina, diversos trabajos de investigación han comprobado que el modelo de Nelson y Siegel logra un buen ajuste para la curva cero cupón en dólares bajo ley local (Zincenko), en dólares bajo ley extranjera (De Batista), en dólares bajo ley extranjera para bonos de la provincia de Buenos Aires (Caporazzo, 2018) y en dólares bajo ley extranjera para bonos corporativos de YPF (Stel, 2018). La elección de este modelo se ve reforzada por las condiciones de mercado de activos argentinos: la limitada cantidad de emisiones de instrumentos financieros, junto con la poca liquidez que dificulta la obtención de precios diarios, imponen el uso de un modelo con pocos parámetros a estimar (y en Nelson y Siegel sólo son cuatro). Basados en estos antecedentes, se va a trabajar con Nelson y Siegel para estimar la curva cero cupón en pesos; a continuación se detallará su metodología.

## Desarrollo modelo de Nelson y Siegel

En primer lugar, realizaremos algunas definiciones:

Definimos “factor de descuento” como el valor por el que se debe multiplicar a un flujo de fondos futuros para obtener su valor presente. Considerando capitalización continua quedaría expresado:

$$b_{t,m} = e^{-r_{t,m} * m}$$

Donde  $t$  es tiempo,  $m$  es el vencimiento del flujo de fondos y  $r_{t,m}$  es la tasa spot que muestra el rendimiento de un bono bullet entre  $t$  y  $m$ .

La tasa spot se puede despejar, quedando:

$$r_{t,m} = -\frac{1}{m} \ln(b_{t,m})$$

También se puede expresar mediante una composición de “tasas forward”:

$$r_{t,m} = \frac{1}{m} \int_0^m f_{t,u} du$$

Y reemplazando en la primera ecuación:

$$b_{t,m} = e^{-\int_0^m f_{t,u} du}$$

En su escrito de 1987, Nelson y Siegel proponen modelar las tasas forward instantáneas con la siguiente ecuación:

$$f_{t,m} = \beta_{t,0} + \beta_{t,1} e^{-\frac{m}{\tau_t}} + \beta_{t,2} \frac{m}{\tau_t} e^{-\frac{m}{\tau_t}}$$

Integrando  $f_{t,m}$  obtenemos la tasa de interés spot correspondiente al día  $t$ :

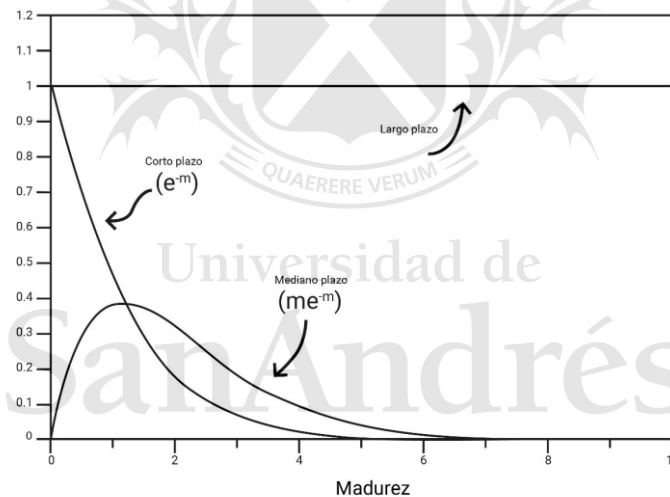
$$r_{t,m} = \beta_{t,0} + (\beta_{t,1} + \beta_{t,2}) \frac{\tau_t}{m} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_t}}\right) - \beta_{t,2} e^{-\frac{m}{\tau_t}}$$

Donde  $\beta_{t,0}$ ,  $\beta_{t,1}$ ,  $\beta_{t,2}$  y  $\tau_t$  son los cuatro parámetros que se deben estimar en este modelo.

Estos parámetros asumen las siguientes interpretaciones económicas:

- $\lim_{m \rightarrow \infty} f_{t,m} = \beta_{t,0}$ : Por lo que  $\beta_{t,0}$  representa la tasa de interés de largo plazo.
- $\lim_{m \rightarrow 0} f_{t,m} = \beta_{t,0} + \beta_{t,1}$ : Entonces  $\beta_{t,0} + \beta_{t,1}$  representa la tasa de interés de corto plazo y  $\beta_{t,1}$  es el diferencial entre la tasa de rendimiento de corto y largo plazo.
- $\beta_{t,2}$  representa la magnitud de la joroba que tiene la curva resultante.
- $\tau_t$  es el momento del tiempo en que se presentará dicha joroba.

Los componentes de la estimación de la curva quedan representados en el siguiente gráfico:



**Gráfico 1:** Peso de los parámetros en la curva forward.

La calibración del modelo se realiza mediante un ejercicio de optimización, para la cual Nelson y Siegel para un determinado día  $t$  fijan el valor de  $\tau_t$  y resuelven por mínimos cuadrados ordinarios la siguiente función objetivo:

$$\min_{\beta_{t,0}, \beta_{t,1}, \beta_{t,2}} \sum_{m \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\}} (y_{t,m} - r_{t,m})^2$$

Es decir:

$$\min_{\beta_{t,0}, \beta_{t,1}, \beta_{t,2}} \sum_{m \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\}} \left( y_{t,m} - \left( \beta_{t,0} + (\beta_{t,1} + \beta_{t,2}) \frac{\tau_t}{m} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_t}}\right) - \beta_{t,2} e^{-\frac{m}{\tau_t}} \right) \right)^2$$

Donde

- $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  es el conjunto de vencimientos correspondiente al día  $t$ .
- $y_{t,m}$  representa a la tasa de interés asociada al bono con vencimiento en  $m$  días.
- Para cada día  $t$ , realizan la optimización para valores  $\tau_t = 10, 20, 30, \dots, 200, 250, 300, 365$ .
- Los parámetros de la curva cupón cero seleccionados son los que minimizan la suma de los errores al cuadrado.

Finalmente, el precio teórico de un bono se puede determinar mediante la actualización del flujo de sus cupones y principal:

$$P_i^* = \sum_{j=1}^T c_{i,j} * e^{-r_j t_j} + N_{i,j} * e^{-r_j t_j}$$

Donde

- $t_j$  representa la diferencia de días entre la entrega y el pago  $j$ ;
- $c_{i,j}$  representa al cupón en  $t_j$ ;
- $N_{i,j}$  representa a la amortización en  $t_j$ ;
- $r_j$  corresponde a la ecuación de Nelson y Siegel en  $t_j$ .

A partir de la calibración del modelo con los datos del mercado de bonos del Tesoro norteamericano, los autores logran concluir que:

- Se obtiene un modelo parsimonioso capaz de capturar las distintas formas de la curva cupón cero observadas, lo que permite utilizar el modelo para estimar precios.
- Los residuos no son aleatorios, exhiben cierta dependencia a lo largo del eje temporal.
- Las transacciones no se producen todas al mismo tiempo, ya que los bonos son negociados en distintos momentos del día. Esta situación induce error.

Es importante destacar que hay varios supuestos relevantes detrás de la construcción de estos modelos que no siempre encajan con la realidad con la que nos toca trabajar; asumimos que:

1. No hay oportunidades de arbitraje (cartera que permite ganar dinero de manera inmediata sin costos ni riesgos). Estudios realizados por Bjork y Christensen (1999) y Filipovic (1999) muestran que el modelo de Nelson y Siegel no logra resultados libres de arbitraje; sin embargo, Coroneo, Nyholm, y Vidova-Koleva (2008) demuestran que sus parámetros no son estadísticamente diferentes a los de libre arbitraje para un nivel de confianza del 95%.
2. Nos encontramos ante un mercado perfecto, es decir, un mercado en el que se cumple que: a) los activos son perfectamente divisibles; b) la venta en corto está permitida; c) no existen costos de transacción; d) no existen impuestos.
3. Ley de único precio: Existe un único precio para todas las carteras con idénticos flujos de pagos.

## Bonos emitidos en moneda local

---

El mercado de bonos en pesos tiene un bajo nivel de desarrollo con la mayoría de las emisiones concentrándose en el corto plazo. Esta problemática se debe fundamentalmente al proceso inflacionario que inició en el país desde 2007, lo que ha desalentado las transacciones en pesos

sin cláusulas de ajuste. Recién durante 2016, y con la perspectiva de que el nuevo gobierno pueda encauzar los niveles de inflación, se realizan algunas pocas emisiones de títulos en pesos a mediano y largo plazo.

Conviven dos emisores de deuda en pesos:

- El Banco Central (BCRA) emite deuda de hasta un año de plazo que utiliza como herramienta de política monetaria para fijar la tasa de interés en función de sus metas de inflación (esquema de política monetaria vigente entre enero 2016 y setiembre 2018). El mercado secundario de estos instrumentos tiene poca liquidez por: a) hay recurrentes emisiones primarias de cada título todos los meses hasta un mes antes de su vencimiento; b) si bien los montos vigentes de deuda aumentan a medida que se acerca al vencimiento, también se registra un fuerte “empuje a la paridad”, que desalienta las operaciones en el mercado.
- El Gobierno Nacional emite deuda en el mercado de corto y largo plazo para financiar su déficit fiscal.

Los instrumentos emitidos se transan en dos mercados diferentes:

- MAE: Es el mercado electrónico de títulos valores y de negociación de moneda extranjera más importante de la Argentina. El mismo, está basado en una plataforma electrónica modular, donde se transan títulos de renta fija tanto públicos como privados, divisas, operaciones de pases, y se concretan operaciones de futuros con monedas y tasa de interés. Complementariamente, este soporte tecnológico es utilizado en las licitaciones de letras y bonos del Banco Central de la República Argentina y en la colocación primaria de títulos del Estado Nacional.
- BYMA: Con el objetivo de encauzar las necesidades del nuevo mercado de capitales previsto en la Ley 26.831, el Mercado de Valores de Buenos Aires S.A. implementó una reorganización, constituyendo una nueva entidad: Bolsas y Mercados Argentinos S.A. “BYMA”, resultando ésta la continuadora de la actividad del Mercado de Valores de Buenos Aires S.A.

Para el presente trabajo, se decidió combinar los precios de ambos mercados, considerando para tal fin el mercado donde se hubiese negociado el volumen más importante para ese día con el fin de conseguir una serie más nutrida de precios, aún a costa de introducir distorsiones adicionales al listado. Los precios utilizados corresponden a operaciones a 72 horas de plazo de liquidación para los títulos de largo plazo y, desde el 4 de setiembre de 2017, a 48 horas. Para las letras del BCRA y del Gobierno Nacional se utilizaron precios de plazo de liquidación de 24 horas.

Como el modelo de estimación es dependiente de datos en el largo plazo, y ante los problemas de falta de liquidez que se mencionaron anteriormente, se toma el siguiente criterio para garantizar la presencia de datos: para los bonos de mediano y largo plazo emitidos por el gobierno si no hay precio de cierre para un día de operaciones, se toma el precio del día anterior.

Del mismo modo, se decide descartar los precios de las letras de corto plazo cuando faltan menos de 30 días para su vencimiento, para evitar que el “empuje a la paridad” distorsione la estimación.

Para brindar mayor estabilidad al tramo corto de la curva se utiliza también la tasa de interés correspondiente al promedio pagado por los bancos privados por la constitución de plazos fijos en pesos a 30 días. Esta tasa sirve como ancla nominal y es publicada periódicamente por el BCRA.



**Tabla 1:** Listado de instrumentos financieros en pesos vigentes desde el 01/03/2017 al 26/04/2017.

<b>Código</b>	<b>Nombre del bono</b>	<b>Emisor</b>	<b>Fecha de emisión</b>	<b>Fecha de madurez</b>	<b>Emisión (millones de pesos)</b>	<b>Forma de pago</b>
I07J7	Lebacs Venc 07/06/2017	BCRA	28/9/2016	7/6/2017	3,627.9	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I10Y7	Lebacs Venc 10/05/2017	BCRA	31/8/2016	10/5/2017	1,762.8	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I12A7	Lebacs Venc 12/04/2017	BCRA	3/8/2016	12/4/2017	4,668.2	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I15G8	Lebacs Venc 15/08/2018	BCRA	15/11/2017	15/8/2018	464,177.9	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I15N7	Lebacs Venc 15/11/2017	BCRA	25/1/2017	15/11/2017	323,886.7	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I16G7	Lebacs Venc 16/08/2017	BCRA	2/11/2016	16/8/2017	455,401.0	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I16Y8	Lebacs Venc 16/05/2018	BCRA	16/8/2017	16/5/2018	466,126.9	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I17E8	Lebacs Venc 17/01/2018	BCRA	19/4/2017	17/1/2018	302,794.5	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I17O8	Lebacs Venc 17/01/2018	BCRA	17/1/2018	17/10/2018	223,065.0	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I17Y7	Lebacs Venc 17/05/2017	BCRA	7/9/2016	17/5/2017	373,634.1	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I18A8	Lebacs Venc 18/04/2017	BCRA	19/7/2017	18/4/2018	403,548.7	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I18L8	Lebacs Venc 18/07/2018	BCRA	18/10/2017	18/7/2018	425,934.6	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I18O7	Lebacs Venc 18/10/2017	BCRA	4/1/2017	18/10/2017	352,845.8	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I19A7	Lebacs Venc 19/04/2017	BCRA	10/8/2016	19/4/2017	283,411.8	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I19D8	Lebacs Venc 19/12/2018	BCRA	21/3/2018	19/12/2018	30,064.3	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I19L7	Lebacs Venc 19/07/2018	BCRA	5/10/2016	19/7/2017	431,161.8	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I19S8	Lebacs Venc 19/09/2018	BCRA	20/12/2017	19/9/2018	296,545.1	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I20D7	Lebacs Venc 20/12/2017	BCRA	15/3/2017	20/12/2017	361,600.4	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I20S7	Lebacs Venc 19/07/2018	BCRA	7/12/2016	20/9/2017	411,097.5	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I21F8	Lebacs Venc 21/02/2018	BCRA	17/5/2017	21/2/2018	750,690.3	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I21J7	Lebacs Venc 21/06/2018	BCRA	2/11/2016	21/6/2017	445,973.3	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I21J8	Lebacs Venc 21/06/2018	BCRA	20/9/2017	21/6/2018	601,910.5	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I21M8	Lebacs Venc 21/03/2018	BCRA	21/6/2017	21/3/2018	124,882.4	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I21N8	Lebacs Venc 21/11/2018	BCRA	21/2/2018	21/11/2018	125,446.1	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I24Y7	Lebacs Venc 24/05/2018	BCRA	14/9/2016	24/5/2017	3,616.9	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I26A7	Lebacs Venc 26/04/2018	BCRA	17/8/2016	26/4/2017	2,825.3	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
I31Y7	Lebacs Venc 31/05/2018	BCRA	21/6/2016	31/5/2017	4,980.9	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.

Código	Nombre del bono	Emisor	Fecha de emisión	Fecha de madurez	Emisión (millones de pesos)	Forma de pago
L2PS8	Letras del estado nacional Venc 14/09/2018	Gobierno Nacional	16/3/2018	14/9/2018	49,275.4	Tasa nominal mensual de 2.06% capitalizable mensualmente. Amortización íntegra al vencimiento.
LTPA8	Letras del estado nacional Venc 13/04/2018	Gobierno Nacional	15/12/2017	13/04/2018	12,524.0	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
LTPJ8	Letras del estado nacional Venc 15/06/2018	Gobierno Nacional	15/12/2017	15/06/2018	6,150.2	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
LTPM8	Letras del estado nacional Venc 16/03/2018	Gobierno Nacional	15/12/2017	16/03/2018	26,169.9	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
LTPO8	Letras del estado nacional Venc 12/10/2018	Gobierno Nacional	13/04/2018	12/10/2018	33,000.0	Tasa nominal mensual de 2.06% capitalizable mensualmente. Amortización íntegra al vencimiento.
LTPS8	Letras del estado nacional Venc 14/09/2018	Gobierno Nacional	15/12/2017	14/09/2018	9,712.8	Emitidas con descuento. Amortización en su totalidad al vencimiento.
TM18	Bonos del tesoro nacional en pesos a tasa fija 2018	Gobierno Nacional	05/09/2016	05/03/2018	15,210.7	A partir de la fecha de emisión, a la tasa fija del 22,75% los que serán pagaderos por semestre vencido los días 05/03/2017, 05/09/2017 y 05/03/2018. Amortización íntegra al vencimiento.
TS18	Bonos del tesoro nacional en pesos a tasa fija 2018	Gobierno Nacional	19/09/2016	19/09/2018	25,000.0	Tasa fija anual del 21,20% pagaderos por semestre vencido los días 19 de marzo y 19 de septiembre de cada año hasta la fecha de vencimiento. Amortización íntegra al vencimiento.
TO21	Bonos del tesoro nacional en pesos a tasa fija 2021	Gobierno Nacional	03/10/2016	03/10/2021	62,500.0	A partir de la fecha de emisión, a la tasa fija del 18,20% anual, los que serán pagaderos por semestre vencido los días 03/04 y 03/10 de cada año hasta el vencimiento. Amortización íntegra al vencimiento.
TO23	Bonos del tesoro nacional en pesos a tasa fija 2023	Gobierno Nacional	17/10/2016	17/10/2023	64,150.0	Tasa fija del 16% anual, los que serán pagaderos por semestre vencido los días 17/04 y 17/10 de cada año hasta el vencimiento. Amortización íntegra al vencimiento.
TO26	Bonos del tesoro nacional en pesos a tasa fija 2026	Gobierno Nacional	17/10/2016	17/10/2026	96,569.7	Tasa fija del 15,50% anual, los que serán pagaderos por semestre vencido los días 17/04 y 17/10 de cada año hasta el vencimiento. Amortización íntegra al vencimiento.

En el gráfico 2, se considera para cada uno de los bonos posibles, la cantidad de días de operación para los que tuvo precio de cierre respecto de los días de operación entre el 01/03/2017 y el 26/04/2018, decidiéndose excluir a los bonos que tuviesen menos de 20 registros, dado que presentan un pobre nivel de liquidez. En síntesis, reducimos de 38 a 24 el número de bonos a utilizar en la estimación, descartándose los siguientes títulos: I07J7, I10Y7, I12A7, I17O8, I19D8, I21N8, I24Y7, I26A7, I31Y7, L2PS8, LTPA8, LTPJ8, LTPO8, LTPS8.

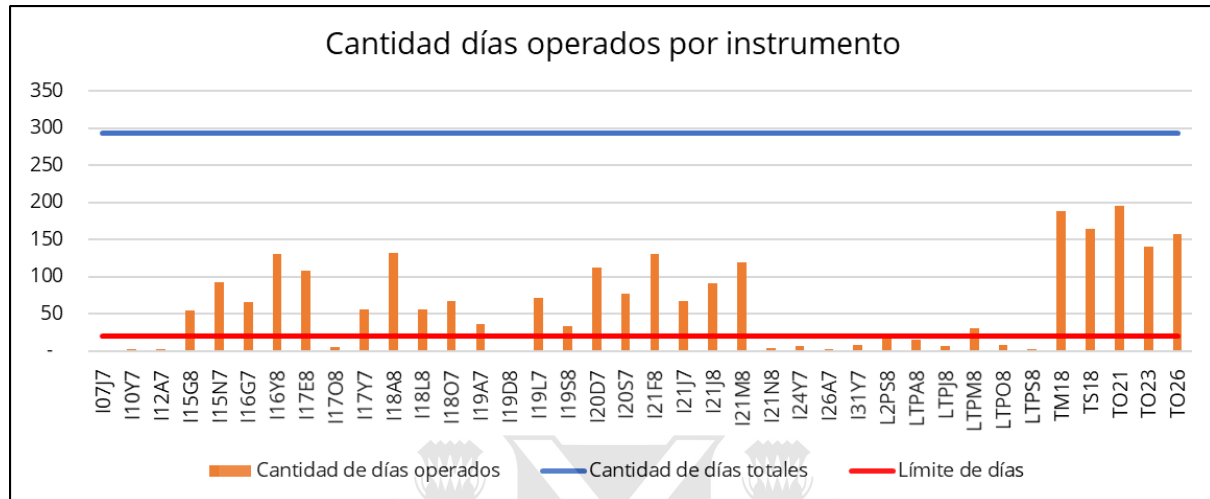


Gráfico 2: Cantidad de días con operaciones por instrumento.

## Resultados empíricos

Para calibrar el modelo de Nelson y Siegel es necesario definir la función objetivo a optimizar; en este caso, se va a minimizar la diferencia de precios al cuadrado ponderado por la inversa de la duración de los bonos (de esta manera se busca priorizar el ajuste en el corto plazo de la curva en función al ejercicio de administración de riesgo que se realizará en la próxima sección).

$$\min_{\beta_{t,0}, \beta_{t,1}, \beta_{t,2}, \tau_t} = \sum_{i=1}^n w_i * (p_{mercado,i} - p_{teórico,i})^2 + \left( \frac{r_{modelo} - r_{plazo\ fijado}}{r_{plazo\ fijado}} * 100 \right)^2$$

Donde,  $w_i = \frac{1}{D_i}$  siendo  $D_i$  la duración del bono  $i$ .

Debido a la posibilidad de obtener mínimos locales, para la determinación de los parámetros se siguió la metodología propuesta por el Banco Central de Canadá, Bolder y Strélski (1999). En consecuencia, se construyó una lista arbitraria de puntos de partida para la optimización del vector  $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \tau)$  dentro de las zonas de solución, a partir de las combinaciones dadas por:

$$\beta_0 \in \{0,1045; 0,13; 0,10; 0,12; 0,11\}$$

$$\beta_1 \in \{0,0892; 0,10; 0,20; 0,30; 0,35; 0,18; 0,15\}$$

$$\beta_2 \in \{0,0001; 0; -0,10; -0,05\}$$

$$\tau \in \{1,9857; 3; 2,5; 2; 1; 0,75\}$$

Para las distintas combinaciones se realizó la optimización y se obtuvieron los parámetros que minimizan la función objetivo, seleccionándose la solución que devolvía el menor valor de la función objetivo.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

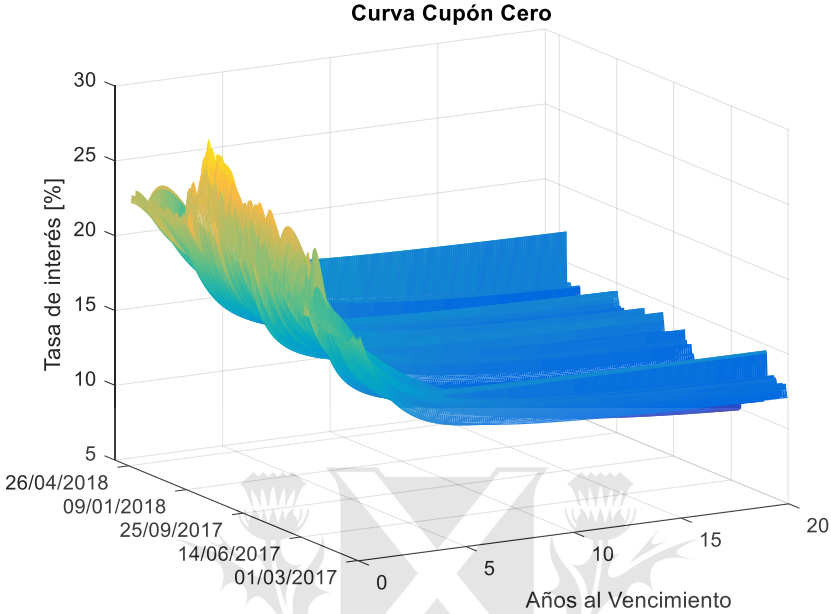


Gráfico 3: Curva cupón cero

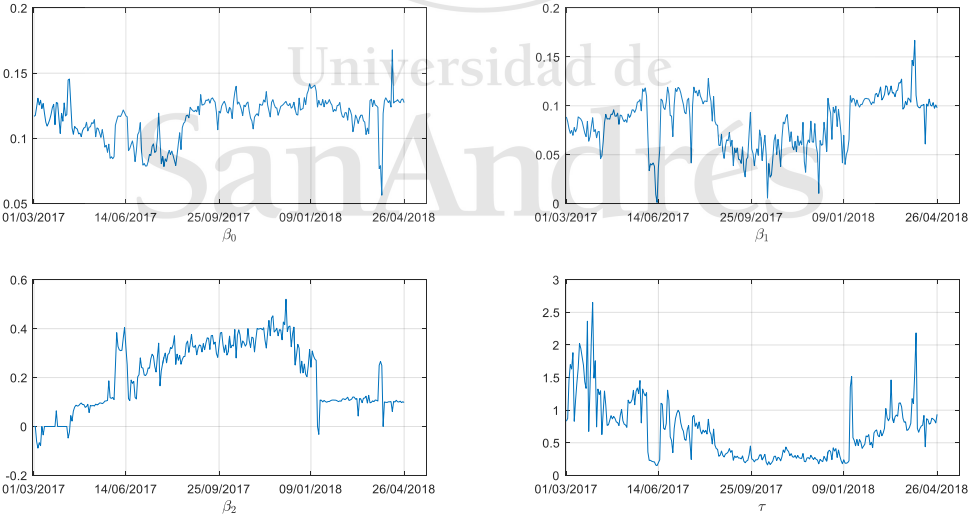
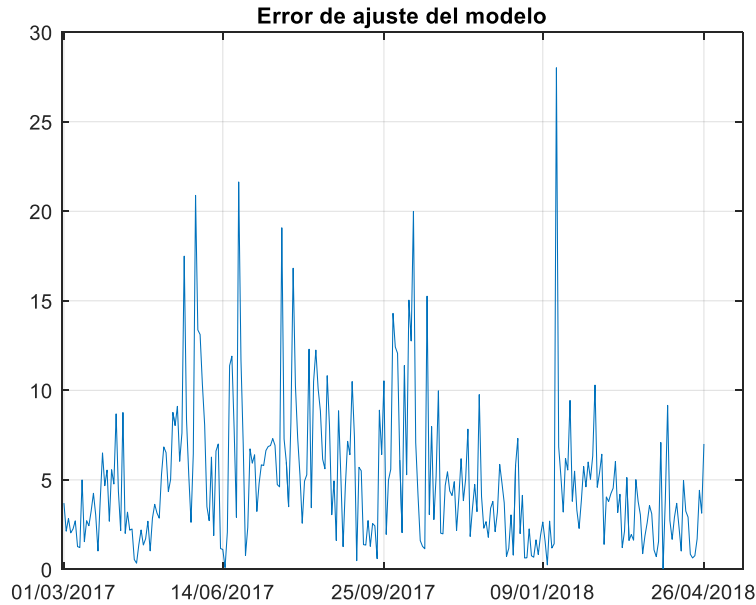


Gráfico 4: Parámetros del modelo de Nelson y Siegel.



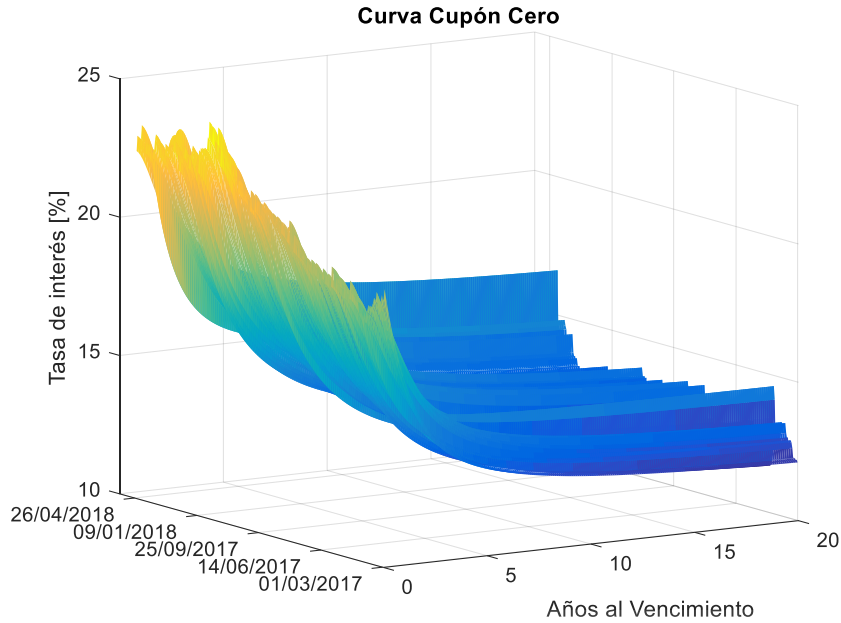
**Gráfico 5:** Error de ajuste del modelo.

Como se puede apreciar de los gráficos 3, 4 y 5, se obtiene una curva con parámetros bastante estables a lo largo del tiempo, con un nivel de error de ajuste del modelo acotado.

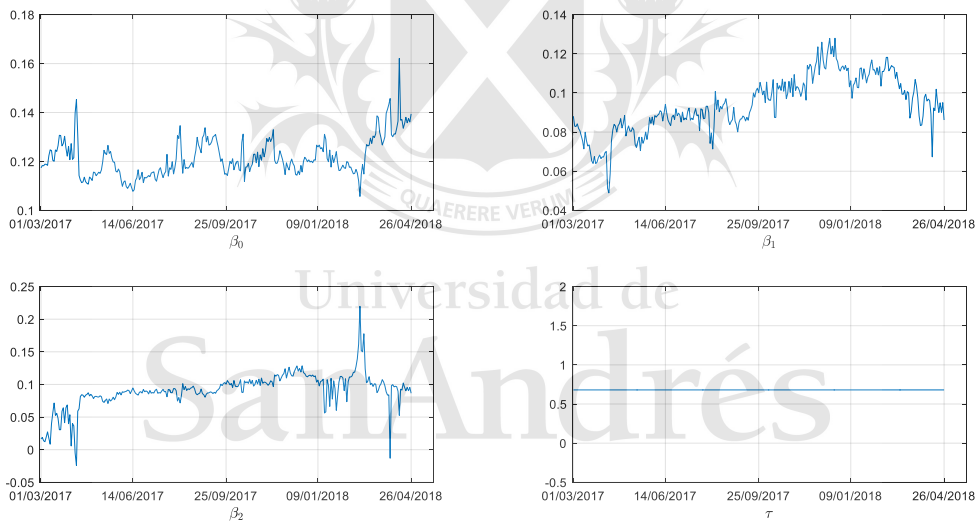
En función de la aplicación práctica para la administración de carteras que se va a desarrollar, es necesario reducir el número de parámetros a estimar (y mejorar la estabilidad de los parámetros restantes). Autores como Nelson y Siegel, Barrett (1995) y Willner (1996) han observado que los parámetros de nivel, pendiente y curvatura obtenidos del modelo de Nelson y Siegel son insensibles a la elección del  $\tau$ . Por ejemplo, Annaert (2013) estimó los parámetros de Nelson y Siegel para la curva de tasas spot de la zona euro utilizando un  $\tau$  fijo en 1.37 y en 3; obteniendo resultados similares, por lo que no pudo concluirse qué valor de  $\tau$  resultara más adecuado. En nuestro caso, se procede a fijar  $\tau$  en 0.68 (el promedio resultante de la estimación anterior) y se vuelve a minimizar la función:

$$\min_{\beta_{t,0}, \beta_{t,1}, \beta_{t,2}} = \sum_{i=1}^n w_i * (p_{mercado,i} - p_{teórico,i})^2 + \left( \frac{r_{modelo} - r_{plazo\ fijo}}{r_{plazo\ fijo}} * 100 \right)^2$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:



**Gráfico 6:** Curva cupón cero con  $\tau$  fijo.

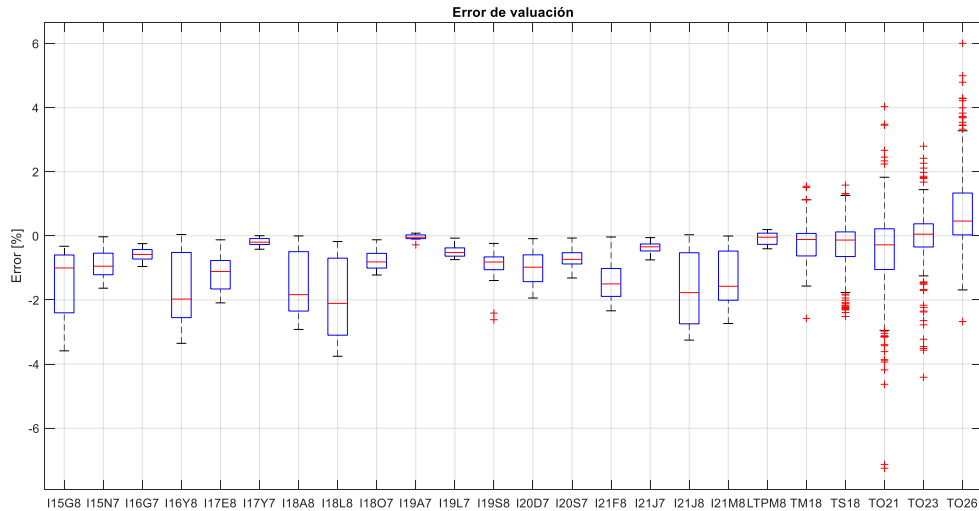


**Gráfico 7:** Parámetros del modelo de Nelson y Siegel con  $\tau$  fijo.

$\beta_0$ : La tasa de interés en pesos de largo plazo se ubica consistentemente en el rango de 11-13%, con una tendencia en el alza hacia el final del período analizado en conjunción con crisis cambiaria que estaba iniciando.

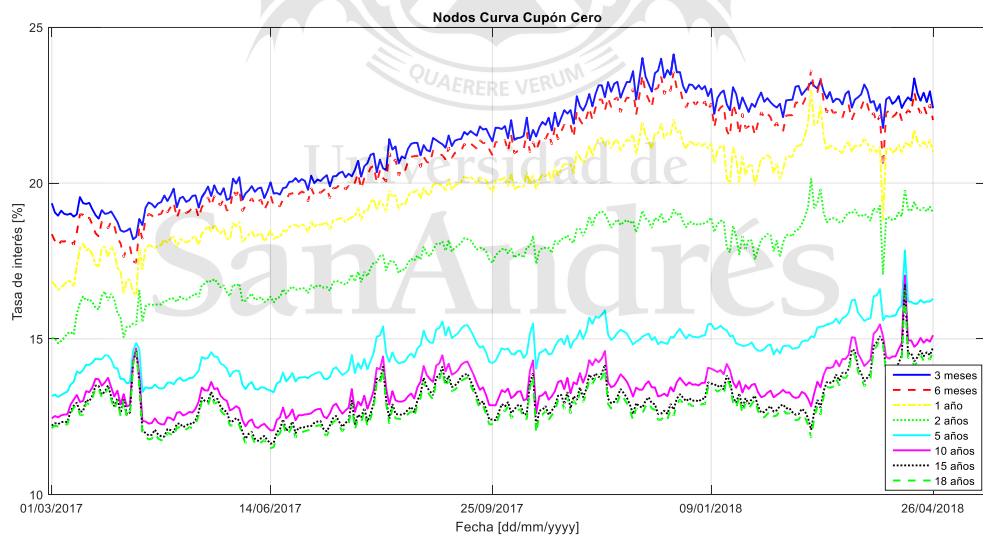
$\beta_1$ : Nos muestra que el diferencial entre la tasa de rendimiento de corto y largo plazo sufrió un leve incremento durante todo el 2017, mientras comenzó a descender en 2018 al tiempo que se incrementaba  $\beta_0$ . Que  $\beta_1$  sea positivo indica que la pendiente de la curva es negativa (curva invertida).

$\beta_2$ : La joroba del modelo es poco significativa y se mantiene estable hasta principios de 2018.



**Gráfico 8:** Error de valuación por instrumento, optimización con  $\tau$  fijo.

El diagrama de cajas y bigotes muestra que en la mayoría de los bonos el ajuste es bueno ya que las medianas de los errores están ubicadas en torno al -2/0%, con una tendencia a subestimar los precios para los instrumentos de corto plazo y levemente sobreestimarlos para el largo plazo.

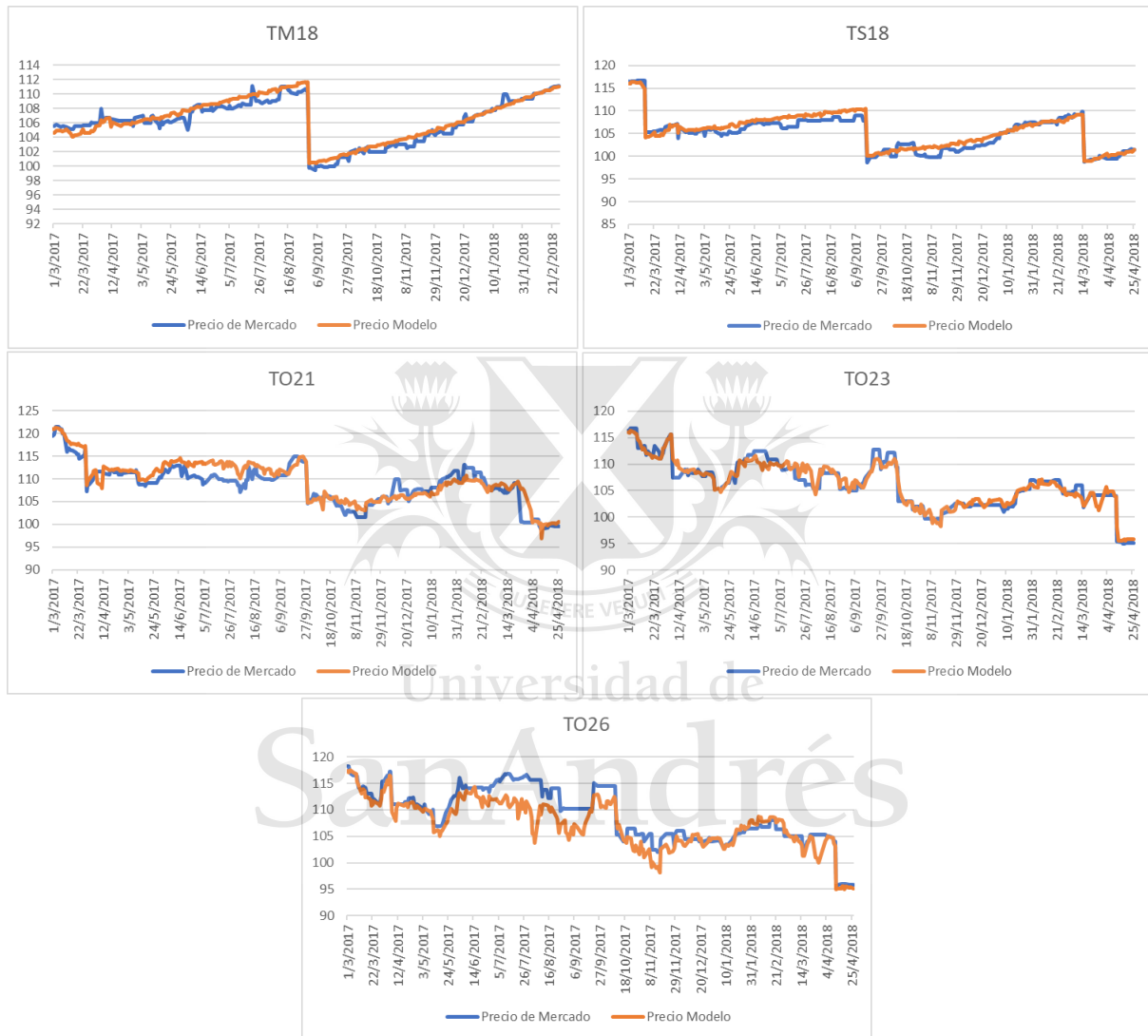


**Gráfico 9:** Evolución temporal de las tasas de interés en nodos relevantes, optimización con  $\tau$  fijo.

En el gráfico anterior podemos apreciar que se logró obtener estimaciones suaves y sin presencia de valores extremos a través del tiempo (aunque no exenta de algunos movimientos bruscos puntuales). Esto es una característica de los modelos parsimoniosos como el de Nelson y Siegel.

La evolución temporal de las tasas de interés permite ver la inversión de la curva de pesos en Argentina, las tasas de corto plazo son más del doble que las de largo. Además, se puede constatar como las tasas de hasta 2 años fueron subiendo durante 2017, mientras que las tasas de largo plazo recién comienzan a subir a fines del primer trimestre de 2018.

A continuación, se muestra la comparación entre los precios observados en el mercado y los precios estimados por el modelo de Nelson y Siegel considerando el  $\tau$  fijo para los cinco bonos vigentes. Como se puede observar, si bien el comportamiento del precio modelado es mucho más suave y estable que el precio real en el mercado, el modelo otorga una representación bastante correcta de los precios de estos instrumentos y no parece encontrarse una tendencia clara (subestimación / sobreestimación) en el desvío observado.



**Gráfico 10:** Comparación precios observados vs. Precios estimados por el modelo de Nelson y Siegel, optimización con  $\tau$  fijo.



## Inmunización de cartera

Como argumentamos anteriormente, los administradores de carteras necesitan contar con herramientas que les permitan proteger el valor de los activos ante cambios imprevistos en la curva de tasas de interés. En esta línea, Litterman y Scheinkman (1991) han identificado que tres componentes principales son suficientes para explicar más del 90% del movimiento histórico de la curva de interés en un mercado completo y líquido; éstos son: nivel, pendiente y curvatura. Adicionalmente, han comprobado que cuando los administradores utilizan la duración como herramienta para inmunizar las carteras, están dejando de lado los efectos de la pendiente y la curvatura.

Willner (1996) propone armar una cartera de cobertura para neutralizar una cartera inicial a la exposición de la curva en su totalidad (o a cada factor individualmente), tomando como punto de partida el modelo de Nelson y Siegel.

En primer lugar, partimos de la ecuación de la tasa de interés para el modelo de Nelson y Siegel. Habiendo fijado  $\tau$  en la optimización del modelo (por lo que es conocida y constante), y considerando que  $m$  también es conocida, la ecuación queda expresada linealmente en términos de los factores que se buscan cubrir: nivel, pendiente y curvatura:

$$r_m(l, s, c) = l + s * K_m + c * (K_m - k_m)$$

Siendo:

- $l$  el nivel de la tasa de interés (asociado al largo plazo)
- $s$  la pendiente de la curva
- $c$  la convexidad
- $K_m = \frac{1-k_m}{\frac{m}{\tau}}$
- $k_m = e^{-\frac{m}{\tau}}$

A partir de esta expresión podemos escribir el precio de un bono de la siguiente manera:

$$P(l, s, c) = \sum_{i=1}^T C_{m_i} * e^{-r_{m_i} * m_i}$$
$$P(l, s, c) = \sum_{i=1}^T C_{m_i} * e^{-(l+s*K_{m_i}+c*(K_{m_i}-k_{m_i})) * m_i}$$

De esta forma el precio del bono sólo depende de  $l$ ,  $s$  y  $c$  de forma independiente.

Ahora, calculamos sus sensibilidades a los distintos factores:

$$SL = \frac{\partial P}{\partial l} = \sum_{i=1}^T C_{m_i} * e^{-(l+s*K_{m_i}+c*(K_{m_i}-k_{m_i})) * m_i} * (-m_i)$$
$$SS = \frac{\partial P}{\partial s} = \sum_{i=1}^T C_{m_i} * e^{-(l+s*K_{m_i}+c*(K_{m_i}-k_{m_i})) * m_i} * (-m_i * K_{m_i})$$

$$SC = \frac{\partial P}{\partial c} = \sum_{i=1}^T C_{m_i} * e^{-\left(l+s*K_{m_i}+c*(K_{m_i}-k_{m_i})\right)*m_i} * (-m_i * (K_{m_i} - k_{m_i}))$$

Como las sensibilidades son aditivas, podemos plantear que las sensibilidades de una cartera (B) es la suma ponderada de las sensibilidades de los activos que contiene, siendo  $Q_i$  los nominales de cada instrumento i:

$$SLB_{l,s,c} = \sum_{i=1}^N Q_i * SL_i$$

$$SSB_{l,s,c} = \sum_{i=1}^N Q_i * SS_i$$

$$SCB_{l,s,c} = \sum_{i=1}^N Q_i * SC_i$$

Como las funciones son continuas e infinitamente derivables, podemos utilizar una aproximación de Taylor de primer orden para analizar cómo cambia el valor de cartera ante un cambio en los factores de riesgo:

$$B_{l,s,c} \cong G_{l_0,s_0,c_0} + SLB_{l_0,s_0,c_0} * (l - l_0) + SSB_{l_0,s_0,c_0} * (s - s_0) + SCB_{l_0,s_0,c_0} * (c - c_0)$$

Ahora bien, dado una cartera inicial B, el administrador buscará anular las sensibilidades a los factores de riesgo. Para eso, vamos a definir una cartera de cobertura H con costo 0:

$$\begin{cases} SLB_{l_0,s_0,c_0} + SLH_{l_0,s_0,c_0} = 0 \\ SSB_{l_0,s_0,c_0} + SSH_{l_0,s_0,c_0} = 0 \\ SCB_{l_0,s_0,c_0} + SCH_{l_0,s_0,c_0} = 0 \\ \sum_{i=1}^N Q_i * H_i = 0 \end{cases}$$

Entonces en  $t = 0$ , busco los  $Q_i$  tal que satisfagan el sistema de ecuaciones planteado arriba. Es importante destacar que se necesita un bono en la cartera de cobertura (con flujo de fondos linealmente independiente) por cada factor de riesgo que se busca neutralizar, y uno adicional para lograr que la cobertura no tenga costos. En el caso de cubrir los tres factores, serían necesarios 4 bonos, con lo que el sistema de ecuaciones quedaría:

$$\begin{cases} q_1 SL_1 + q_2 SL_2 + q_3 SL_3 + q_4 SL_4 = -SLB \\ q_1 SS_1 + q_2 SS_2 + q_3 SS_3 + q_4 SS_4 = -SSB \\ q_1 SC_1 + q_2 SC_2 + q_3 SC_3 + q_4 SC_4 = -SCB \\ q_1 H_1 + q_2 H_2 + q_3 H_3 + q_4 H_4 = 0 \end{cases}$$

Ahora bien, en  $t = 1$  hay que reajustar la cobertura para que siga manteniendo su eficiencia, dado que cambiaron los valores de los factores de riesgo y las sensibilidades de los instrumentos. Teniendo en cuenta que el valor de la cobertura H ya no es cero, el nuevo sistema de ecuaciones a optimizar es el siguiente:

$$\left[ \begin{array}{l} SLP_{l_1, s_1, c_1} + SLH_{l_1, s_1, c_1} = 0 \\ SSP_{l_1, s_1, c_1} + SSH_{l_1, s_1, c_1} = 0 \\ SCP_{l_1, s_1, c_1} + SCH_{l_1, s_1, c_1} = 0 \\ \sum_{i=1}^N Q_{i,1} * H_{i,1} = \sum_{i=1}^N Q_{i,0} * H_{i,0} \end{array} \right.$$

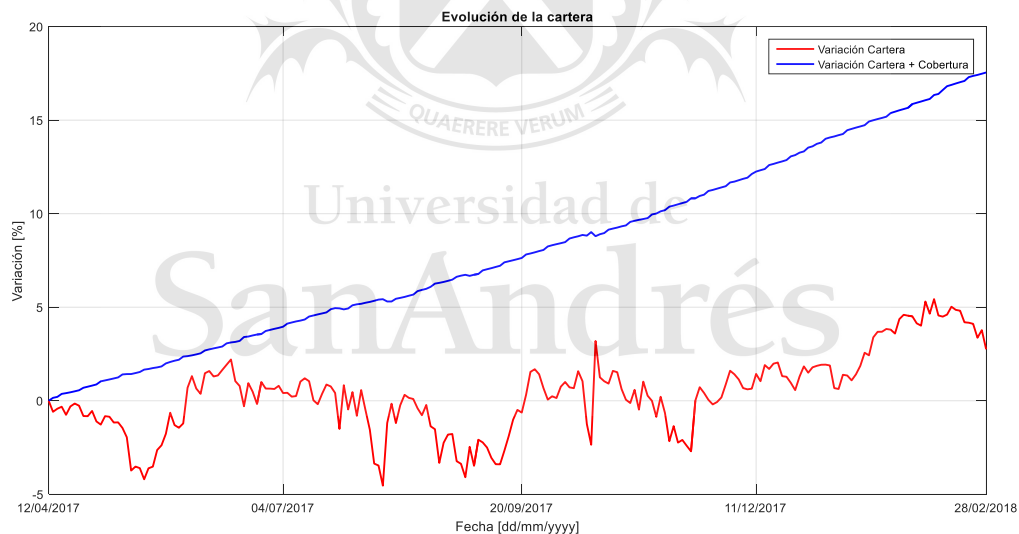
Al querer implementar esta estrategia de cobertura utilizando la curva de tasas de interés en pesos que calibramos anteriormente, vuelve a surgir uno de los problemas que comentamos al inicio: la falta de instrumentos en el mercado local. Sólo contamos con 5 bonos de mediano / largo plazo (4 de ellos con flujos de fondos independientes). Armamos la siguiente estrategia:

Cartera inicial: 100 TO23 (considerando precios base 100, es decir, equivalente a 10.000 nominales)

Cartera de cobertura: TM18, TS18, TO21, TO26

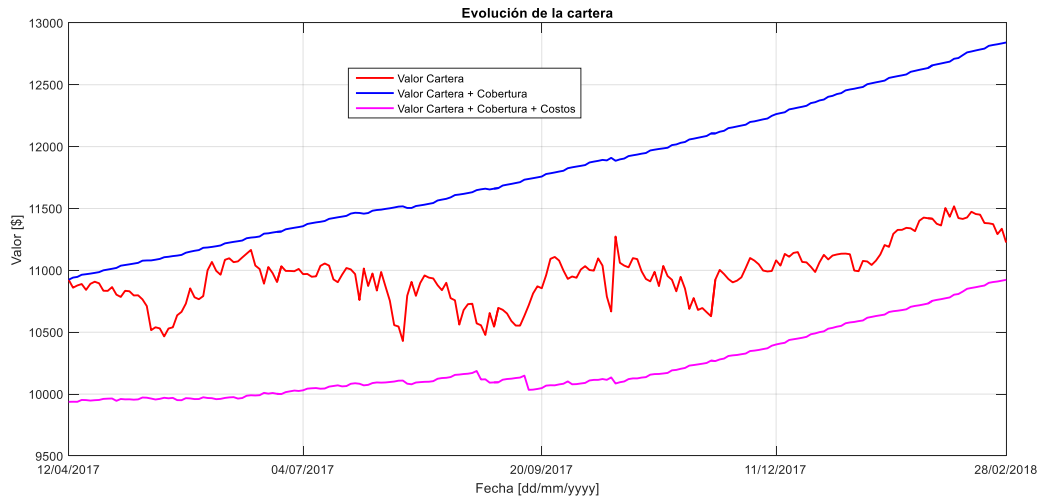
Período: 12/04/2017 – 28/02/2018

La valuación de los activos se realiza considerando los precios estimados por el modelo de Nelson y Siegel. Diariamente se recalcula la cobertura.



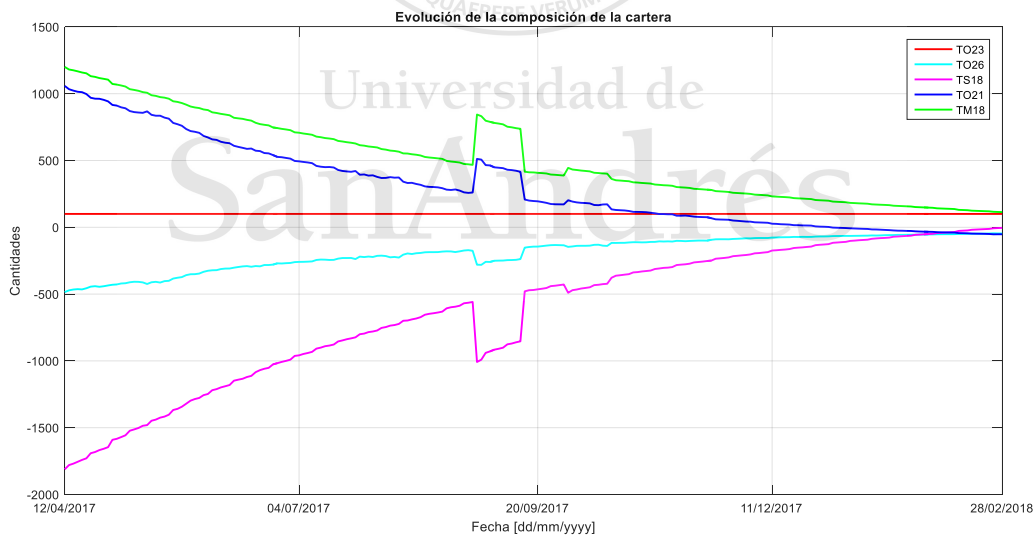
**Gráfico 11:** Evolución del rendimiento de la cartera y de la cartera más la cobertura.

En función de gráfico obtenido de la estrategia, se evidencia que el resultado de la cobertura más cartera es ampliamente superior en rentabilidad y estabilidad al de la cartera en soledad. Sin embargo, estos resultados no se sostienen si consideramos costos de 20 bps por transacción sobre la cobertura y su rebalanceo diario:



**Gráfico 12:** Evolución del rendimiento de la cartera y de la cartera más la cobertura, considerando costos de transacción.

Como se observa en el gráfico 12, el resultado de la cartera más la cobertura nunca se recupera de los costos de transacción iniciales para armar la cobertura y los rebalances diarios reducen la pendiente de rentabilidad. Esto se debe a que las cantidades de bonos a transar para constituir la cobertura son significativamente mayores a la cartera (una relación de 30 a 1 con respecto a los nominales considerados en la cartera), lo que vuelve inviable la estrategia. A continuación, se ilustra la evolución de las cantidades de cada bono en el tiempo:



**Gráfico 13:** Evolución de la composición de la cobertura.

Este gráfico permite inferir dos comportamientos curiosos sobre la evolución de la cobertura: 1) la reducción paulatina de las cantidades utilizadas en la cobertura en el tiempo a medida que se acerca el vencimiento de los títulos con vencimiento en 2018; 2) El brusco salto de las cantidades de la cobertura a principios de setiembre y su posterior corrección 15 días después en consonancia con las fechas de corte de cupón de cada uno de los títulos con mayor cantidad de nominales en la estrategia.

## Conclusiones

---

En este trabajo, se ha podido desarrollar una estimación de la curva cero cupón soberana en pesos utilizando el modelo de Nelson y Siegel, consiguiéndose parámetros estables y un error moderado en un contexto de un mercado incompleto y con poca liquidez.

También se establecieron los pasos para realizar una cobertura de una cartera a toda la curva de tasa de interés, y no sólo a la duración, como es la práctica más difundida en la profesión. Si bien los resultados en principio resultaron alentadores, al incorporar los costos de transacción al ejercicio, queda en evidencia su inviabilidad económica dado los grandes volúmenes de títulos que implica la constitución de la cobertura. En futuros trabajos, queda la posibilidad de desarrollar estrategias que reduzcan la incidencia de los costos de transacción para realizar dichas coberturas.

Más allá de los resultados puntuales obtenidos, lo que se destaca es la dificultad para lograr resultados confiables ante lo incompleto del mercado financiero argentino, las dificultades para tener disponibilidad de instrumentos de largo plazo en una economía inflacionaria, y la falta de volumen de operaciones para contar con precios diarios en todos los activos.

En conclusión, los modelos de estimación muestran la suficiente flexibilidad como para ajustar a los datos locales con todas las limitaciones antes mencionadas. Sin embargo, estas limitaciones de la economía argentina, que se exacerban en el mercado en pesos, ponen en jaque la confianza sobre los resultados de los modelos y reprimen su uso cotidiano en la práctica profesional para la toma de decisiones.



## Referencias bibliográficas

---

- Andrada Félix, Julián, Fernandez-Perez, Adrian y Fernández Rodriguez, Fernando. *Fixed income strategies based on the prediction of NS parameters*, 2015.
- Bank for International Settlements. *Zero Cupon yield curves: technical documentation*, 2005.
- Bolder, David y Stréliski, David. *Yield curve modelling at the Bank of Canada*, 1999.
- Caporazzo, Lucas. *Estimación de la curva cupón cero de la Provincia de Buenos Aires*. Documento de trabajo, 2018.
- Cox, John, Ingersoll, Jonathan y Ross, Stephen, *A theory of the Term Structure of Interest Rates*, 1985.
- De Battista, Gastón. *Estimación de estructura de tasas de interés en Argentina: Curva soberana en dólares bajo ley extranjera*. Documento de trabajo, 2018.
- García Riesco, Javier. *Estructura de tasas de interés nominales y reales en Chile*, 2003.
- Litterman, R. y Scheinkman, J. *Common Factors Affecting Bond Returns*” *Journal of Fixed Income*, 1996.
- Luir Manieu Espinosa, José. *Valorización de instrumentos financieros en mercados con pocas transacciones: análisis de una metodología basada en un modelo dinámico para la tasa cero real en Chile*, 2005.
- Nelson, Charles B. y Siegel, Andrew. *Parsimonious Modeling of Yield Curves*, *Journal of Business*, Vol. 60, 473-489, 1987.
- Stel, Germán. *Estimación de la Curva Cupón Cero de Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF S.A.)*. Documento de trabajo, 2018.
- Svensson, Lars. *Estimating and Interpreting Forward Interest Rates: Sweden 1992-1994*, 1994.
- Willner, Ram. *A New Tool For Cartera Managers Level, Slope, and Curvature Duracións*, 1996.
- Zincenko, Marcelo. *A Methodology to estimate the Argentine Term Structure of Interest Rates*. Documentos de Trabajo, 2015.