



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
Facultad de Ciencias Económicas y de Administración
Instituto de Estadística

Análisis de los métodos de estimación de curvas de rendimiento en deuda soberana aplicados en Uruguay

Andres Sosa;

Setiembre, 2019

Serie Documentos de Trabajo

DT (19/4) - ISSN : 1688-6453

Forma de citación sugerida para este documento:

Sosa, Andrés. Análisis de los métodos de estimación de curvas de rendimiento en deuda soberana aplicados en Uruguay. Serie Documentos de Trabajo, DT (19/4). Instituto de Estadística, Facultad de Ciencias Económicas y de Administración, Universidad de la República, Uruguay.

Análisis de los métodos de estimación de curvas de rendimiento en deuda soberana aplicados en Uruguay.

Andrés Sosa¹

Departamento de Métodos Cuantitativos, Instituto de Estadística, Facultad de Ciencias Económicas y de Administración, Universidad de la República

RESUMEN

Las curvas de rendimiento en la deuda soberana brindan la relación entre las tasas de rendimiento de los activos que la componen con respecto a su vencimiento. La modelación es de vital importancia en la macroeconomía, las finanzas en general y en el contexto de la política monetaria. El trabajo se enfoca en analizar el comportamiento de los métodos estáticos que son utilizados en Uruguay. Basicamente, se observa que estos métodos utilizados pueden ser inestables cuando se utilizan pocos precios de activos transados en la estimación -situación que puede corresponder a Uruguay-. Se propone examinar otro enfoque de estudio al utilizar modelos que tengan en cuenta la dinámica en las curvas de rendimiento.

Palabras clave:Deuda soberana; curva de rendimiento; modelos estáticos; B-splines .

CÓDIGOS JEL: H63, C58, G15

Clasificación MSC2010:91B82, 62-07, 91G30

¹*email:* asosa@iesta.edu.uy, ORCID:

ABSTRACT

The yield curves in sovereign debt provide the relationship between the rates of return of the assets that compose it with respect to its maturity. Modeling is of vital importance in macroeconomics, finance and in the context of monetary policy. The work focuses on analyzing the behavior of static methods that are used in Uruguay. Basically, it is observed that these methods used can be unstable when few prices of traded assets are used on the estimation - a situation that may correspond to Uruguay. It is proposed to examine another study approach when using models that take into account dynamics in performance curves

Key words: Sovereign debt; term structure; static models; B-splines

JEL CODES: H63, C58, G15

Mathematics Subject Classification MSC2010: 91B82, 62-07 , 91G30 .

1. Introducción

La deuda soberana es el conjunto de la deuda pública que mantiene con respecto a sus acreedores. Esta deuda principalmente se genera a través de la emisión de activos de renta fija en los mercados financieros.

Al analizar el comportamiento de los precios de sus activos se percibe que la evolución temporal en sus tasas de rendimiento depende de una gran cantidad de variables. Estas variables inciden tanto en el mercado primario al emitirse el activo como en el mercado secundario al ser transados por agentes financieros. En la demanda de esta clase de activos influye el nivel crediticio del emisor, la liquidez que presentan los activos, el tipo de cambio del país emisor y las tasas de interés esperadas, en otras posibles inversiones. En cuanto a la oferta de activos soberanos se destaca las necesidades financieras del estado emisor, las oportunidades de costos y beneficios en el momento de emisión y el valor esperado de diversas variables macroeconómicas como lo pueden ser la tasa de inflación y el tipo de cambio.

En la composición de la deuda soberana existe una gran cantidad de activos financieros que se diferencian entre sí por diversas razones. Para el objetivo del trabajo, es necesario resaltar esencialmente el vencimiento del activo financiero y la moneda de emisión. Esto se debe a que entre los activos que presentan el mismo riesgo crediticio, misma liquidez y mismas características en las cláusulas del contrato pero se diferencian en sus vencimientos es posible que las tasas de rendimientos inducidas sean distintas.

Se establece que la *curva de rendimiento* (term structure) en una determinada moneda es la función que relaciona las tasas de rendimiento con los vencimientos en los activos financieros. En este caso, se entiende que la tasa de rendimiento es aquella tasa de interés que iguala el precio transado del activo con su valor presente del flujo futuro de pagos.

La utilidad de conocer la curva de rendimiento presenta varias perspectivas. Desde el análisis macroeconómico, las autoridades monetarias extraen información sobre las expectativas de tasas de interés y tasas de inflación futuras del mercado con el fin de planificar políticas públicas. Desde el análisis financiero existen diferentes alternativas, entre ellas se destacan los estudios de sensibilidad en activos dentro de un portafolio de renta fija y la valuación de otros activos como son los derivados financieros.

Existe evidencia empírica en que existe relación entre la fijación de los precios de los diferentes activos y la eficiencia que presenta dicho mercado financiero. Esto se debe que a criterios adecuados en la valuación de los activos permiten comprender de mejor manera sus riesgos asociados. La propuesta del trabajo se basa en realizar un análisis profundo

en algunos modelos y métodos de estimación de curvas de rendimiento, con énfasis en el mercado en Uruguay.

2. Modelos y métodos de estimación

La curva de rendimiento es una función de las tasas de interés con respecto a sus vencimientos que se observa de manera empírica sólo en ciertos tiempos futuros. En las últimas décadas, la profundización en los modelos matemáticos teóricos y los métodos de estimación al utilizar la información disponible en el mercado se transformó en un área de desarrollo tanto en ámbitos académicos como en los agentes financieros participantes de los mercados.

La pregunta natural es, si existen modelos que presentan mejores propiedades específicas con respecto a los demás. La respuesta general es que no existen tales modelos al ser dependientes de su utilidad y de la naturaleza de los datos utilizados en la estimación. Sin embargo, existen características que pueden mejorar los resultados bajo ciertas circunstancias, entre ellos se destacan la flexibilidad en el rango de curvas que alcanza y la suavidad de las curvas generadas principalmente en los vencimientos de largo plazo. Esta situación presenta como consecuencia que si bien los agentes financieros tienen sus propios modelos de referencia para el análisis, se encuentran interesados en la investigación en estos temas.

2.1. Selección de modelos

Al seleccionar el modelo para utilizar en la estimación de las curvas de rendimiento es posible establecer ciertos objetivos deseados. Entre ellos se destaca la necesidad de que la curva de rendimiento estimada replique exactamente los precios transados en el mercado. Por ejemplo, esta característica es requerida en el contexto de valuación de portafolios pero en varias situaciones su costo negativo es la forma irregular e inestable de la estimación.

La perspectiva más utilizada en los mercados financieros es la estimación estática en la cual se analiza de manera transversal a todos los activos transados en un determinado momento. Es decir, no se explora la dimensión temporal en las tasas de rendimiento. Dentro de todos los modelos estáticos existen diferentes enfoques para abordar el problema. Una manera de clasificar a los modelos son modelos paramétricos y modelos no paramétricos.

2.2. Modelos utilizados en Uruguay

En una exploración del mercado uruguayo, las bolsas de valores en Uruguay –Bolsa Electrónica de Valores Sociedad Anónima (BEVSA) y Bolsa de Valores de Montevideo (BVM)– publican estimaciones diarias de curvas de rendimiento del mercado (en algunas monedas). Cada institución, presenta un informe técnico en el cual se establecen las metodologías de estimación y los criterios que se emplean en la construcción de las curvas de rendimiento. También existe una metodología implementada en el Banco Central del Uruguay (BCU), que si bien no se comporta como una habitual curva de rendimiento, es un criterio de fijación de todos los precios de activos emitidos por el estado uruguayo. Estos precios se publican de manera diaria y presentan una vital importancia en el mercado financiero uruguayo debido a que las Administradoras de Ahorro Previsional (AFAP) y las empresas de Seguros y Reaseguros se encuentran obligadas a utilizar tales precios para la valuación contable de los activos que forman parte de sus portafolios de inversión.

En el caso de la BEVSA se publican a diario las curvas de rendimientos en las tres principales monedas de emisión de la deuda soberana en Uruguay (dólares, unidades indexadas y pesos uruguayos). El documento explicativo sobre el modelo, el método de estimación y los datos a utilizar se encuentra en d.t. BEVSA (2016). En el caso de la BVM, se publica únicamente la curva de rendimiento diaria en unidades indexadas. El enfoque de estimación que utiliza es la metodología mediante funciones. Para finalizar, el BCU publica de manera diaria los precios de todos los activos que circulan en el mercado mediante la aplicación de un criterio de valuación preestablecido, en el denominado *Vector de Precios*. Por más información ver d.t. BCU (2019).

2.3. Descripción de los modelos

En esta sección se analizan las dos principales metodologías utilizadas en Uruguay con el fin de comprender sus fundamentos. Es importante destacar que la teoría matemática se desarrolla en el entorno habitual de cada uno de los modelos.

Metodología de estimación mediante splines

El método de estimación general mediante spline se basa en encontrar una función $d(T)$ desconocida desde un conjunto de $N + 1$ coordenadas $\{t_0, \dots, t_N\}$ (puntos vértices) con sus correspondientes valores $\{d(t_0), \dots, d(t_N)\}$ al imponer ciertas restricciones de suavidad en el intervalo $[t_0, t_N]$. En el análisis, la función $d(T)$ es la función de descuento del mercado, es decir, el precio de un bono cupón cero en todos los vencimientos.

De manera general, la propuesta es ajustar uno o varios polinomios de grado k ($k = 1$ lineales, $k = 2$ cuadráticos, $k = 3$ cúbicos, entre otros) que cumplan ciertas características

relacionadas a los datos. De acuerdo a la cantidad de parámetros establecidos en la función, es necesario agregar ciertas condiciones, que pretenden suavizar las funciones en los puntos vértices. En el caso que se considera un conjunto de gran cantidad de datos, el número de parámetros a estimar es excesivo, por lo cual con el fin de reducir dicho número se desarrolla la metodología que se denomina *B-splines cúbicos*. En este método se fija con anterioridad una base de polinomios de grado 3 y se establece que la función $d(T)$ es una combinación lineal entre los polinomios. Se consideran $q + 1$ nodos diferentes $t_0 < t_1 < \dots < t_q$ en el período de tiempo de análisis y se agregan tres nodos más antes del inicio $t_{-3} < t_{-2} < t_{-1}$ y tres nodos más después del final $t_{q+1} < t_{q+2} < t_{q+3}$. Los $q + 3$ polinomios que forman parte de la base B-spline son las funciones ψ_k en el intervalo $[t_0, t_q]$ dadas mediante

$$\psi_k(T) = \sum_{j=k}^{k+4} \left(\prod_{i=k, i \neq j}^{k+4} \frac{1}{t_i - t_j} \right) (T - t_j)_+^3, \quad k = -3, -2, \dots, q - 1.$$

El elemento ψ_k de la base de B-splines es un polinomio cúbico que toma valores estrictamente positivos en el intervalo determinado por los nodos $[t_k, t_{k+4}]$ y es cero fuera de él. En cada valor de T del dominio $[t_0, t_q]$ existen sólo cuatro polinomios diferentes de cero. Por más detalles en el método de B-spline cúbicos, ver Filipovic (2009) y Jamieson and Scott (2002). La curva de descuento del mercado se establece mediante una combinación lineal de las funciones de la base, es decir la función

$$d(T) = \sum_{k=-3}^{q-1} a_k \psi_k(T).$$

Si se denota a P como el vector de precios del mercado de los n activos que se utilizan en la estimación; a C como la matriz de dimensión $n \times N$ (N es la cantidad total de tiempos de pagos entre todos los activos) en la cual la fila j establece los flujos de fondos del activo j ; a Ψ como la matriz de dimensión $N \times m$ ($m = q + 3$) donde la columna i es la función ψ_k evaluada en cada tiempo y a Θ como el vector de dimensión $m \times 1$ de parámetros del modelo. El problema estadístico que resulta es encontrar los parámetros Θ que cumplen la optimización

$$\min_{\Theta \in \mathbb{R}^m} |P - C\Psi\Theta|^2.$$

Metodología de estimación mediante funciones

La segunda metodología considera el ajuste de la función desconocida a curvas paramétricas predeterminadas. Estos modelos no utilizan varios polinomios para el ajuste sino que existe una única función definida en todos los vencimientos. Las dos ventajas que presentan estos modelos frente a los modelos de splines es la menor cantidad de parámetros

involucrados en la estimación y la suavidad de la curva de rendimientos que se obtiene. El desarrollo de estos modelos se realiza en la tasa de interés forward, la cual es la tasa de interés que genera una inversión en tiempo futuro con horizonte temporal que tiende a cero.

La diferencia entre los modelos en este método de estimación radica en la elección de la función. En esta subsección se desarrollan los dos modelos más utilizados en la estimación de curvas de rendimiento mediante esta metodología. La estimación de los parámetros se realiza mediante la minimización de las diferencias entre las tasas de interés del mercado y las tasas de interés del modelo, la cual se ejecuta a través de algoritmos de optimización no lineales.

En el trabajo Nelson and Siegel (1987), los autores asumen que la forma de la función de la tasa de interés forward $f(t, T)$ en el momento t para tiempo T es dada mediante

$$f(t, T) = \alpha + \beta e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \gamma \frac{T}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}}; \quad (1)$$

donde los parámetros α , β , γ y τ_1 son coeficientes que cumplen $\tau_1 > 0$.

La función que se determina mediante la ecuación (1) es capaz de capturar varias formas de curvas de rendimiento que se observan en el mercado. Esto se debe a que la función $f(t, T)$ consta de tres sumandos en el cual cada uno aporta diferentes características. El primer sumando es una función constante que tiene su mayor importancia en el largo plazo; el segundo sumando es una función exponencial decreciente que tiene importancia en la pendiente de la función y el tercer sumando es una función positiva que comienza en cero, tiene límite cero en infinito y que presenta un único máximo el cual tiene importancia en la curvatura.

Al analizar el rol de cada parámetro, se examina la ecuación (1). Cuando el vencimiento T tiende a infinito, la pendiente y la curvatura tienden a cero, por lo cual se observa que el parámetro α se interpreta como la tasa de rendimiento de largo plazo. En cambio, cuando el vencimiento tiende a cero sólo la curvatura tiende a cero y se obtiene que la suma de los parámetros $(\alpha + \beta)$ se interpreta como el rendimiento a corto plazo. Por lo tanto, si es negativo tiene pendiente inicial positiva y si es positivo tiene pendiente inicial negativa. La curvatura se controla a través del parámetro γ y el máximo o mínimo de la función a través el parámetro τ_1 . En general, si se cumple $|\beta| \geq |\gamma|$ la función es monótona y en caso contrario existe un punto estacionario para el cual cuanto mayor sea la diferencia en valor absoluto entre $|\gamma|$ y $|\beta|$ más se realza la curvatura (concavidad o convexidad) de la función.

Desde la existencia de este modelo, varios otros han sido propuestos al incorporar mayor flexibilidad. La extensión más popular es el modelo propuesto en Svensson (1994) bajo el costo de agregar dos parámetros más al modelo. En el modelo propuesto, a la ecuación (1) se le agrega un sumando responsable de permitir otro punto de inflexión adicional. Es decir,

$$f(t, T) = \alpha + \beta e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \gamma \frac{T}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \delta \frac{T}{\tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}};$$

donde los parámetros α , β , γ , δ , τ_1 y τ_2 son coeficientes que cumplen $\tau_1 > 0$ y $\tau_2 > 0$.

Los roles que cumplen los parámetros en este nuevo modelo son similares a los que cumplen en el modelo de Nelson-Siegel. A causa de la gran flexibilidad que presentan las funciones exponenciales el modelo tiene como consecuencia la posibilidad de obtener resultados de curvas monótonas crecientes, decrecientes, formas de U y formas de S.

3. Aplicación al Mercado en Uruguay

3.1. Situación empírica

Con el fin de analizar las curvas de rendimiento publicadas en el mercado uruguayo y las tasas de rendimiento inducidas por el Vector de Precios publicado por el BCU, se considera el caso de la deuda soberana nominada en unidades indexadas el día viernes 09 de marzo de 2018. En este día, existían en circulación 5 bonos globales con vencimiento entre los años 2018 y 2037 y 11 notas de tesorería con vencimiento entre los años 2018 y 2030. Sin embargo, en el mercado local se transaron cuatro bonos globales de vencimientos en los años 2018, 2027, 2028 y 2037 y la nota de tesorería serie 19 (vencimiento en el año 2022).

En la Figura 1, se encuentran (aproximaciones) de las curvas de rendimiento publicadas en ambas bolsas de valores y las tasas de rendimiento derivadas de los precios de los activos publicados por el BCU. Se observa gran disparidad entre las dos curvas de rendimientos publicadas.

3.2. Estimación de modelos

En el trabajo se propone implementar el método de B-spline, el método de Nelson-Siegler y el método de Svensson con el fin de comparar los resultados con la información publicada en el mercado.

Se realizan tres estimaciones de los modelos planteados con diferente cantidad de información disponible del día 09 de marzo de 2019. En todas las estimaciones se utiliza el precio

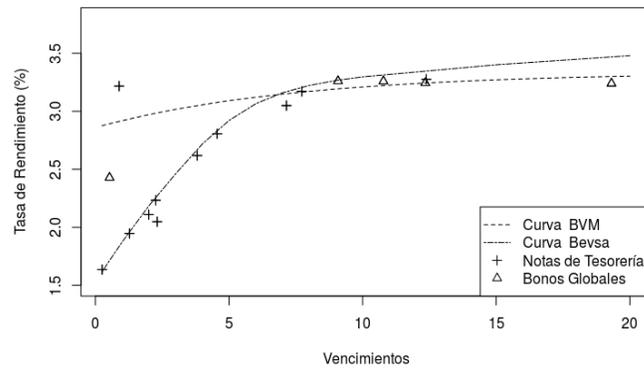


Figura 1: Información publicada en el mercado uruguayo el día viernes 09 de marzo de 2018. (Fuente: Elaboración propia sujeta a datos publicados en los diferentes medios.)

de los cinco activos financieros transados en el mercado y se adicionan otros activos de acuerdo a ciertas estrategias con el fin de analizar los cambios en la estructura de las curvas estimadas. En el primer caso, se agregan las cuatro notas de tesorería que presentan mayor circulante. En el segundo caso, se agrega el bono global de vencimiento en el año 2030 y las cuatro notas de tesorería que generan la mejor distribución en los vencimientos de los activos utilizados. En el tercer caso, se utilizan todos los activos financieros en circulación. Las curvas de rendimiento en cada estimación se encuentran en la Figura 2 y los parámetros asociados a las estimaciones mediante funciones se encuentran en el Cuadro 1.

	N.S. 1	Sv. 1	N.S. 2	Sv. 2	N.S. 3	Sv. 3
α	3.57	7.25	0.04	11.56	0.67	14.06
β	35.79	-3.98	1.73	-8.35	0.83	-11.75
γ	-50.42	-8.59	8.12	-11.63	7.66	-10.50
τ_1	0.21	1.21	9.61	1.41	8.01	1.81
δ	—	-11.32	—	-23.17	—	-29.836
τ_2	—	15.61	—	13.01	—	13.81

Tabla 1: Estimación de parámetros en los modelos de Nelson-Siegel (N.S.) y Svensson (Sv.). (Fuente: Elaboración propia.)

Es posible concluir que en los modelos utilizados se obtienen estructuras de curvas de rendimiento que dependen fuertemente de los activos utilizados. A su vez en el caso de las metodologías vía funciones, los valores en los parámetros presentan mucha variabilidad.

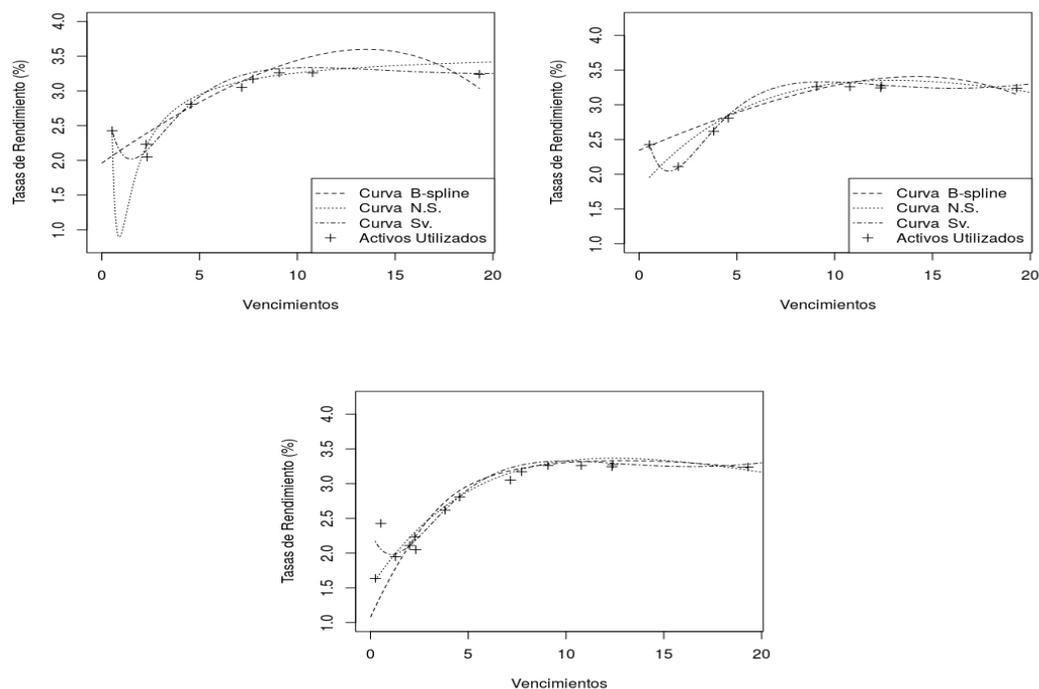


Figura 2: Estimaciones de curvas de rendimiento en modelos estáticos para el día 09/03/2018. A la izquierda la primera estimación, a la derecha la segunda estimación y abajo la tercera estimación (Fuente: Elaboración propia.)

Esta característica hace muy difícil asociar el comportamiento de la curva de rendimiento a la interpretación teórica de cada parámetro que se establece en la Subsección 2.3. Como aspecto a destacar es importante establecer que la estructura en las curvas de rendimiento se conservan tanto en el modelo de B-spline como en el modelo de Svensson.

3.3. Valoración de los modelos

En la literatura existen consensos en que son los modelos más utilizados en los mercados financieros y que presentan una gran cantidad de aspectos positivos. Sin embargo, en sintonía a las conclusiones que se obtienen en el análisis anterior, también existen algunas críticas a los modelos que se enfocan principalmente en ciertos análisis empíricos. Las críticas se basan en ciertas propiedades no deseadas, entre las que se destacan el ajuste a los precios de mercado, la adecuación a los activos utilizados y la perspectiva teórica de la economía.

Una crítica general es el compromiso entre cantidad de parámetros en los modelos y cantidad de datos a utilizar en la estimación. Esta situación presenta relevancia principalmente en mercados financieros ilíquidos. Esto se debe, a que si únicamente se utilizan activos financieros transados en el mercado en varias ocasiones es posible que no se transen la cantidad suficiente de activos como para estimar de manera robusta los parámetros del modelo, por ejemplo ver Orsag and Zoricic (2013). A este aspecto, se adicional que en el caso de poca información es posible que las estimaciones de las curvas de rendimiento sean muy volátiles al ingreso de nueva información. Entre otras referencias se encuentra Xie et al. (2006).

Con respecto al método de estimación vía B-spline, la principal crítica radica en la dependencia en la cantidad de polinomios de la base y en la ubicación de los nodos de la base. Si bien existen metodologías que establecen candidatos a nodos a seleccionar (ver por ejemplo Dung and Tjahjowidodo (2017)), en caso que no se establezca o se disponga de la información certera, es posible que este método sea considerado “modelos de caja negra”, al no poder replicar los resultados exactos. Con respecto al método de Nelson y Siegel o Svensson, existen varios trabajos que apuntan a críticas sobre las estimaciones en algunas situaciones empíricas, principalmente se centran en el problema de multicolinealidad al estimar el modelo. En varios trabajos se proponen modificaciones a la forma funcional de la curva de tasa de interés forward con el fin de adecuarse a la liquidez presente en el mercado, por ejemplo ver Dutta et al. (2005).

4. Propuesta para abordar el problema

En la actualidad, existe una gran preocupación en la investigación en esta área por estudiar modelos y métodos de curvas de rendimiento en mercados ilíquidos. Los problemas usuales de poca información disponibles para realizar la estimación se traducen en obtener una matriz esparsa en los precios de activos, el cual es un área de investigación importante en el análisis numérico.

Desde nuestra visión, el problema de estimación de curvas de rendimiento en el Uruguay es posible abordarlo desde el punto de vista dinámico. Existen desarrollos teóricos que intentan captar el comportamiento dinámico de las tasas de interés desde diferentes enfoques. El objetivo general es establecer modelos que incluyan avances temporales (en tiempo discreto o continuo) que tiendan a representar la evolución de las diferentes curvas de rendimiento respecto al vencimiento.

El análisis implica el estudio de series de tiempo de tasas de rendimiento de ciertos ac-

tivos financieros en contraposición a los modelos estáticos en los cuales se consideran las tasas de rendimiento de manera transversal. Se pretende que las curvas de rendimiento estimadas dependan de manera débil de los activos transados en cierto día en particular.

La teoría de la modelación dinámica en tasas de interés ha evolucionado al adecuarse a los nuevos activos que se desarrollaron en el mercado. De breve manera, es posible establecer que existen principalmente tres enfoques que presentan características diferentes y utilizan distintas clases de datos del mercado para su estimación. Sin embargo, debido a la naturaleza de los activos disponibles en la deuda soberana en Uruguay desde nuestra opinión es posible aplicar el enfoque de los modelos de tasa de interés spot instantánea (short rate models). La literatura es extensa, entre los libros de referencia se encuentran Bjork (2009), Brigo and Mercurio (2006), Filipovic (2009) y Musiela and Rutkowski (2005). Los métodos de estimación se complejizan porque implican el estudio de algunas series de tasas de rendimiento de ciertos activos. Existen una gran cantidad de estudios que proponen nuevos métodos de estimación, en el libro Harvey (1992) se presenta la base matemática de algunos de ellos.

Referencias Bibliográficas

- Banco Central del Uruguay. <https://www.bcu.gub.uy/Comunicados/segco19114.pdf>.
- Bjork, T., *Arbitrage Theory in Continuous Time*. Third Edition Oxford Finance, 2009.
- Brigo, D. and Mercurio, F., *Interest Rate Models Theory and Practice with Smile, Inflation and Credit*. Second Edition Springer Verlag, 2006.
- Dung, V. and Tjahjowidodo, T., *A direct method to solve optimal knots of B-spline curves: An application for non-uniform B-spline curves fitting* PLoS ONE 12(3): e0173857. 2017.
- Dutta, G., Basu, S., and Vaidyanathan, K., *Term Structure Estimation in Illiquid Government Bond Markets: An Empirical Analysis*. Journal of Emerging Market Finance, Vol 4, pp 63-80. 2005.
- Filipovic, D., *Term Structure Models*. Springer Finance. 2009.
- Harvey, A., *Forecasting, structural time series models and the Kalman filter*. Cambridge University Press (1992).
- Jamieson, D. and Scott, G., *Exponentials, Polynomials, and Fourier Series: More Yield Curve Modelling at the Bank of Canada*. Working Paper - Bank of Canada, 2002.
- Mara, G., *Temas Generales para las Curvas de BEVSA*. <https://web.bevsa.com.uy/Descargas/Temas/20Generales/20para/20las/20Curvas.pdf>.
- Musiela, M. and Rutkowski M., *Martingale Methods in Financial Modeling*. Second Edition, Springer, 2005.
- Nelson, C. and Siegel, A., *Parsimonious Modeling of Yield Curves*. Journal of Business, Vol 60, No 4, 473-489, 1987.
- Orsag, S. and Zoricic, D., *Parametric Yield Curve Modeling in an Illiquid and Undeveloped Financial Market* Journal of Economics. Vol 4, No 3, 2013.
- Svensson, L., *Estimating and Interpreting Forward Interest Rates: Sweden 1992-1994*. Institute for International Economic Studies. Papers 579, 1994.
- Xie, C., Chen, H. and Yu, X., *Yield Curve Estimation in the Illiquid Market: framework, models and empirical study*. International Journal of Information Technology & Decision Making, Vol 5, No 3, 2006.

Instituto de Estadística

Documentos de Trabajo



Eduardo Acevedo 1139. CP 11200 Montevideo, Uruguay

Teléfonos y fax: (598) 2410 2564 - 2418 7381

Correo: ddt@iesta.edu.uy

www.iesta.edu.uy

Área Publicaciones

Setiembre, 2019

DT (19/4)