

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia



Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Carolina María Gómez Pérez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Economía

Asesor

Jorge Hugo Barrientos Marín, Doctor (PhD) en Economía

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Maestría en Economía
Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Cita	(Gómez Pérez C. M., 2022)
Referencia	Gómez Pérez C. M. (2022). <i>Impacto de la regulación sobre el precio spot de la energía eléctrica en Colombia: Diseño regresión discontinua en el tiempo</i> . [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Economía, Cohorte XVIII.



Centro de Documentación Economía

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Sergio Iván Restrepo Ochoa

Jefe departamento: Wilman Arturo Gómez Muñoz

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Resumen

La formación del precio de la energía eléctrica (\$/kWh) es un tema de amplia discusión en especial en países en vía de desarrollo. En principio se espera que éste refleje los costos marginales de generación y se afecte principalmente por la disponibilidad de recursos primarios para la producción de energía eléctrica y la interacción de los agentes en el mercado. Sin embargo, la regulación puede generar cambios en este comportamiento esperado. En particular, en varios estudios se ha señalado que el Cargo por confiabilidad tiene un impacto relevante en la formación del precio spot a pesar de que este esquema tiene una remuneración independiente al mercado y este ingreso debe reflejar los costos asociados a la confiabilidad. En el presente trabajo se realiza una evaluación de impacto sobre la serie de tiempo del precio spot de electricidad de Colombia con el fin de establecer si la Resolución CREG071/06 afectó de forma significativa la formación del precio de bolsa. Los resultados sugieren que la Resolución en estudio generó un incremento en la oferta de los generadores en el corto y el largo plazo acompañado de un aumento alrededor del 12% (en promedio) en el precio spot de la energía eléctrica en Colombia.

Palabras clave: RDiT, regulación, precio de bolsa, Cargo por confiabilidad.

Clasificación JEL: C22, Q41, Q48

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Abstract

The electricity pricing (\$/kWh) is a topic of wide discussion, especially in developing countries. Initially, it is expected that it reflects the marginal costs of generation, and that it is mainly affected by the availability of primary resources for electric energy production and the interaction of agents in the market, however, regulation can generate changes in this expected behavior. Several studies have pointed out how the Reliability charge (“Cargo por confiabilidad”) has an important impact on the formation of spot price, even though this scheme has a remuneration independent of the market and this income must reflect the costs associated with reliability. In the current paper, an impact evaluation is carried out on the time series of the electricity spot price of Colombia in order to establish if the Resolution CREG071/06 significantly affected the formation of the spot market price. The results suggest that the Resolution under study increased the bid of generators in the short and long term, which was accompanied by an increase of around 12% in the spot price of electricity in Colombia.

Keywords: RDiT, regulation, spot price, Reliability charge.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla de contenido

Resumen	3
Abstract	4
Introducción y propósito general.....	9
Contexto mercado de energía eléctrica en Colombia.....	11
Cargo por confiabilidad (CREG071/06)	13
Revisión de literatura	15
Metodología y marco teórico	17
Datos.....	17
1. Serie del precio de bolsa	17
2. Covariables	19
3. Capacidad efectiva neta	21
Identificación.....	21
1. Marco Teórico: Regresión Discontinua en el tiempo	21
2. Ecuación de identificación.....	23
3. Supuestos de identificación.....	24
Resultados	25
Pruebas de robustez.....	29
1. Efecto de covariables	29
2. Ventanas de estimación.....	29
3. Regresiones lineales a ambos lados del umbral	31
4. Prueba placebo	32
5. Estimación en dos etapas.....	32
6. Estimación no paramétrica	34

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

7. Aplicación ITSA (Análisis de interrupción de series de tiempo).....	34
Mecanismo	36
1. Precio de oferta.....	38
2. Contratos	40
Discusión.....	42
Conclusiones	43
Referencias	45
Anexos.....	50
Anexo 1. Agregaciones sobre el precio de bolsa.....	50
Anexo 2. Eventos exógenos en el precio de bolsa	50
Anexo 3. Análisis de las covariables.....	51
Anexo 4. Pruebas y transformación de covariables	56
Anexo 5. Resumen comparación entre el marco RD cross-section y RDiT (Hausman & Rapson, 2018).....	57
Anexo 6. Pruebas sobre residuales de estimación RDiT.....	58
Anexo 7. Detalle prueba de robustez no paramétrica.....	59
Anexo 8. Pruebas ITSA.....	60

Tabla de Figuras

Figura 1 Formación del precio spot.	12
Figura 2 Capacidad Efectiva Neta en el Sistema Eléctrico Colombiano. Elaboración propia con datos de XM.	13
Figura 3 Panel A: Precio de bolsa horario. Panel B: Agregaciones precio spot. Elaboración propia con datos tomados de XM.	18
Figura 4 Precio de bolsa con eventos.....	19
Figura 5 Capacidad Efectiva Neta.....	21
Figura 6 Evento prueba placebo.....	33
Figura 7 Oferta por recurso	38
Figura 8 Covariables modelo oferta.....	39
Figura 9 Costo promedio de contratos.	41
Figura 10 Covariables energía entre 2000-01 hasta 2022-01.....	52
Figura 11 Covariables clima entre 2000-01 hasta 2022-01	53
Figura 12. Covariables energía entre 2000-01 hasta 2022-01 transformadas	54
Figura 13. Covariables clima entre 2000-01 hasta 2022-01 transformadas.....	55
Figura 14. Matriz correlación variables principales.....	56
Figura 15 Pruebas sobre residuales de estimación RDiT.....	59
Figura 16 Estimación no paramétrica.	60

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla de Tablas

Tabla 1. Balanceo de covariables – Energía.....	25
Tabla 2. Balanceo covariables - Clima.....	26
Tabla 3 Estimación Evento y efectos en función del tiempo	27
Tabla 4 Regresión discontinua estimada del evento Resolución CREG 071/2006.....	28
Tabla 5 Efectos de inclusión de covariables	30
Tabla 6 Estimación con variación de ventanas	31
Tabla 7 Estimación regresiones a ambos lados del umbral.....	32
Tabla 8 Estimación prueba placebo.....	33
Tabla 9 Estimación en dos etapas.....	35
Tabla 10 Estimación ITS	37
Tabla 11 Estimación oferta con efectos fijos por planta	39
Tabla 12 Estimación precio de contratos.	41
Tabla 13 Eventos exógenos en Precio de bolsa.....	50
Tabla 14 Estadísticos descriptivos precio de bolsa y covariables.	53
Tabla 15 Pruebas y transformación de covariables	56
Tabla 16 Pruebas sobre residuales de estimación RDiT	58
Tabla 17 Estimación no paramétrica con cambio de ancho de banda.....	60
Tabla 18 Estimación itsa.model	61
Tabla 19 Pruebas ITSA	61

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Introducción y propósito general

Con el inicio del Cargo por confiabilidad en Colombia, el regulador buscó un mecanismo para garantizar la atención de la demanda de energía eléctrica en el largo plazo, independiente de las condiciones climáticas. Sin embargo, esta medida pudo haber generado un incremento en el precio de oferta de generación acompañada naturalmente de un aumento al precio spot. En principio, se espera que el precio de bolsa de la energía eléctrica refleje la interacción entre los agentes económicos y por tanto represente los costos marginales de generar energía en el corto y largo plazo. No obstante, las regulaciones pueden formar incentivos que impactan de manera significativa el precio, produciendo por ejemplo cambios de nivel. Considerando que este bien, es un factor fundamental de la producción agregada y por tanto, su disponibilidad y confiabilidad impactan directamente en el crecimiento económico (Burke et al., 2018), es relevante analizar los cambios en el precio ya que tienen un impacto directo en el producto nacional (Cortés & Londoño, 2017).

En Colombia, la entidad encargada de la regulación en materia de energía eléctrica es la Comisión de Energía y Gas - CREG – la cual fue constituida por el Congreso de la República (Ley Eléctrica - Ley 143 de 1994, 1994) con el objetivo de garantizar el suministro de electricidad por medio de un mercado liberalizado que asegure una operación eficiente, segura y confiable que promueva y preserve la competencia. Asimismo, se destina el mercado de energía mayorista como un mercado competitivo para coordinar los intercambios de grandes bloques de energía en el Sistema Interconectado Nacional – SIN- a precios que reflejen los costos marginales de generación (Colombia. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2022).

Con lo anterior, se espera que las regulaciones propendan por mantener precios que aseguren el acceso y disponibilidad del servicio de energía eléctrica, pero estas pueden tener efectos no esperados en variables fundamentales. Por tanto, es importante evaluar el impacto de las regulaciones en las variables relevantes de las transacciones de energía eléctrica con el fin de evidenciar los costos y beneficios netos ocasionados por las normas.

El objetivo de este trabajo es evaluar si existe un impacto significativo en el precio spot por el inicio de la Resolución CREG071/06 (Cargo por Confiabilidad). Al respecto, (Botero et al., 2016) y (García et al., 2015) concluyen que esta norma tiene un impacto positivo y significativo en el precio de la energía eléctrica de 0.12 y 0.18 respectivamente. En su análisis, hacen uso de un

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

modelo de regresión tipo ARCH con la inclusión de una variable binaria para capturar el impacto de esta resolución. Por otro lado, en (Castaño & Sierra, 2012) y (Barrientos et al., 2018) se realiza un análisis sobre la tendencia en el precio de bolsa, donde la Resolución del Cargo por confiabilidad es un evento que genera un cambio de nivel en el precio, para esto hacen uso de un procedimiento de “*de - jumping*” y realizan una prueba de raíz unitaria en presencia de varios cambios de nivel. En ambos trabajos concluyen que no existe raíz unitaria en el precio mensual y en consecuencia los eventos elegidos son significativos.

En el presente trabajo se busca evaluar el impacto de la Resolución CREG071/2006 en el precio de bolsa mensual de la energía eléctrica haciendo uso de una Regresión Discontinua en el tiempo (RDiT). En particular se considera apropiada esta metodología ya que se tiene una variable independiente, se aprecia una discontinuidad en la variable de interés la cual es de impacto local y por tanto es conveniente evaluar alrededor del evento, creando las condiciones adecuadas para la herramienta RDiT. Asimismo, se considera que esta metodología acompañada de los mecanismos y pruebas de robustez expuestas en el presente trabajo provee evidencia empírica más robusta sobre el impacto y magnitud que causó la resolución del Cargo por confiabilidad en el precio spot de la energía eléctrica en Colombia.

Se resalta la relevancia de la evaluación de una política, en tanto que: i) en el ciclo regulatorio, permite al regulador identificar si la norma ha cumplido con los objetivos y en qué medida los impactos esperados y no esperados han generado cambios en el mercado, con el fin de considerar los costos y beneficios netos causados por la norma; ii) da cuenta del comportamiento de los agentes en respuesta a los incentivos creados; iii) evidencia la relevancia de incluir las normas en el pronóstico de precios como parte de los cambios exógenos ((Castaño & Sierra, 2012), (Barrientos et al., 2018)) y iv) permite considerar este aspecto como parte de la modelación del proceso generador de datos del precio.

En cuanto a la aplicación de RDiT, en el ámbito internacional se identifican los trabajos de (Gugler et al., 2020) y (Lang & Siler, 2013) como referentes de aplicación en el área de la energía y evaluación de políticas. No obstante, son pocos los estudios que hacen uso de esta herramienta para el análisis de impacto. Algunos casos pioneros en su aplicación se exponen en (Hausman & Rapson, 2018).

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

En concreto, las contribuciones del presente trabajo son: i) realizar una aplicación en el contexto del mercado de energía eléctrica en Colombia de una metodología RDiT, considerando que actualmente, no se identifican trabajos que hagan uso de este método para analizar el impacto de regulaciones sobre series de tiempo en Colombia. ii) Presentar evidencia causal de la afectación de la regulación en el precio spot de la energía eléctrica, considerando que, un cambio en el precio se refleja en la tarifa de los consumidores, por tanto, son los ciudadanos colombianos, usuarios del servicio de energía eléctrica los receptores de las consecuencias de cambios en el precio spot.

Para cumplir con el objetivo expuesto en el presente trabajo se expone una contextualización del mercado de energía eléctrica en Colombia y el cargo por confiabilidad, se realiza una revisión de literatura, presentación de los datos, estrategia de identificación, exposición de resultados, pruebas de robustez, mecanismos y finalmente conclusiones.

Contexto mercado de energía eléctrica en Colombia

Este mercado esta conformado por las siguientes actividades:

- Generación, es la producción de electricidad, es un mercado en competencia donde los generadores ofertan disponibilidad y precio, y el CND¹ determina la cantidad horaria de producción.
- Transmisión, es el transporte de la electricidad para entregarla a los usuarios. Es una actividad regulada y solo la expansión está en competencia.
- Distribución, consiste en suministrar la energía desde las subestaciones a usuarios finales, sus ingresos igualmente estan regulados.
- Comercialización, es la representación de la demanda ante el mercado
(Trespacios et al., 2017)

La electricidad tiene la característica que la oferta y la demanda se deben igualar en todo momento y hasta hoy no existen mecanismos de almacenamiento eficientes que permitan tener inventarios para vender energía en el futuro. En consecuencia, la electricidad se debe negociar en todo momento implicando significativos cambios en el precio (Trespacios et al., 2017). La

¹ Centro Nacional de Despacho: Dependencia encargada de la planeación, supervisión y control de la operación del SIN (<https://www.xm.com.co>)

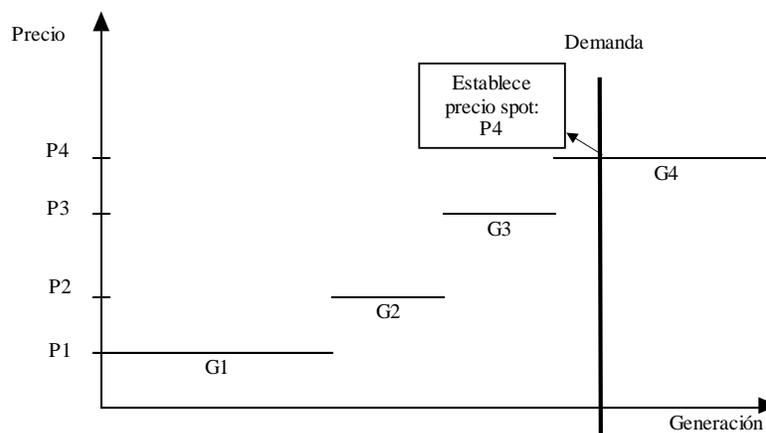
Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

formación del precio spot releja el precio por el cual se entrega la energía en cada hora. Para su determinación se requiere de una entidad central, que en Colombia es XM² (Botero et al., 2016).

En el mercado mayorista de electricidad en Colombia se tiene dos alternativas para transar energía, en el largo plazo contratos bilaterales entre comercializadores y generadores y en el corto plazo, el mercado spot, que es diario con resolución horaria. El precio de este último, denominado precio de bolsa o precio spot, presenta en mayor medida las señales del mercado. Su formación se da por una subasta de sobre cerrado, donde se asignan cantidades según la disponibilidad de las plantas con menores precios hasta satisfacer la demanda real y en donde la planta marginal es quien establece el precio spot. Este proceso puede verse en la **Figura 1**.

Figura 1

Formación del precio spot.



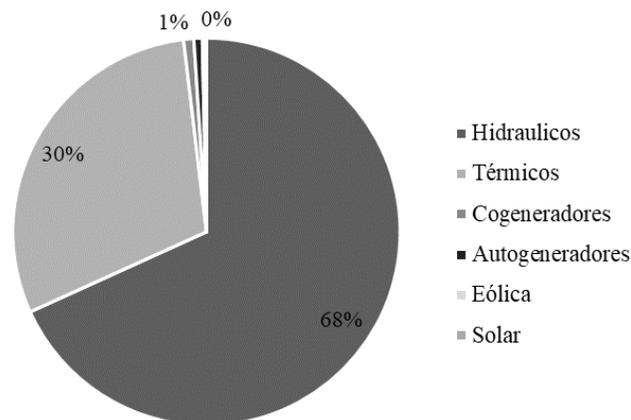
Como esta formación se da por una oferta diaria, el precio es muy volátil, y se ve principalmente afectado por las condiciones que impactan la capacidad de generación. En Colombia, la matriz de energía eléctrica se compone por un 68% de recursos hidráulicos y un 30% recursos térmicos (**Figura 2**). Otras fuentes de generación como energía solar y eólica aún no presentan una participación significativa en la generación nacional y, su disponibilidad no afecta el precio. Con lo anterior, las variables que generan mayor impacto son la disponibilidad de agua y el costo de combustibles (Toro Restrepo, 2015).

² XM en su calidad de Operador y Administrador del mercado de energía eléctrica mayorista.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 2

Capacidad Efectiva Neta en el Sistema Eléctrico Colombiano. Elaboración propia con datos de XM.



Adicional a la capacidad de generación, el precio spot también se afecta por las reglas que determinan su formación, por tanto las regulaciones también se vuelven relevantes en el comportamiento de este precio (Olarte Gómez, 2017), (Poveda, 2012).

El rol del precio spot en el mercado es fundamental ya que i) es el precio al que se transa la energía en el corto plazo y ii) este precio se utiliza como referencia para las condiciones de contratos de largo plazo. Adicionalmente, también es utilizado como señal de mercado para condiciones de desabastecimiento (Res.CREG209/20) y de escasez (Res.CREG140/19).

Por otro lado, es importante aclarar que la demanda en el mercado de energía eléctrica, puede clasificarse en 2 tipos de usuarios:

- Usuarios regulados, tienen un consumo menor de 55 MWh en un mes y su tarifa es determinada por la CREG.
- Usuarios no regulados, tienen un consumo mayor o igual a 55 MWh en un mes y pueden pactar libremente la tarifa de generación y comercialización.

Cargo por confiabilidad (CREG071/06)

Para la generación de energía se requieren grandes inversiones y un tiempo significativo para instalación e inicio de operación (Arango et al., 2008). Marcel Boitreux, en sus trabajos sobre

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

tarificación concluyó que una tarifa de electricidad optima debe ser igual al costo marginal más un cargo por capacidad, así este cargo puede ser parte del precio del mercado.

En Colombia, se implementó un cargo por capacidad para reducir el riesgo y estimular la inversión con el fin de garantizar el suministro de energía eléctrica a largo plazo con precios eficientes. Posterior, mediante estudios y con los agentes del mercado, se definió un nuevo esquema denominado Cargo por Confiabilidad el cual aún está vigente.

El Cargo por capacidad consistía en la remuneración a los agentes del mercado por la capacidad que tenían disponible en el mes, este se pagaba al costo de un KW instalado de la tecnología de menor costo, sin embargo, desde el inicio de su aplicación se identificó insuficiencia de incentivos en especial para expansión del parque generador y por tanto se definió el nuevo esquema (Arango et al., 2008). Por su parte el Cargo por Confiabilidad se define como:

Remuneración que se paga a un agente generador por la disponibilidad de activos de generación con las características y parámetros declarados para el cálculo de la ENFICC, que garantiza el cumplimiento de la Obligación de Energía Firme que le fue asignada en una Subasta para la Asignación de Obligaciones de Energía Firme o en el mecanismo que haga sus veces. (Resolución CREG 071 de 2006, 2006) Subrayado

Este esquema busca remunerar una cantidad de energía por un periodo de tiempo establecido, esto se denomina Obligaciones de Energía en Firme (OEF), las cuales son asignadas mediante subastas y buscan garantizar el suministro de electricidad a la demanda en condiciones críticas de abastecimiento en el mediano y largo plazo mediante la estabilización de los ingresos de los generadores. En consecuencia, los generadores se comprometen a entregar en generación de electricidad la cantidad de OEF cuando el sistema se encuentre en condiciones de escasez. (Documento CREG Cargo Por Confiabilidad., 2006). Para su recaudo, el costo equivalente de esta energía (CERE) se cobra a través de la energía despachada mediante el pago de la demanda.

Considerando además que, parte del objetivo final de este esquema es hacer viable la inversión en plantas de generación para poder garantizar la atención eficiente de la demanda en el mediano y largo plazo, a diferencia del cargo por capacidad, este busca garantizar la oferta de energía eléctrica y tener incentivos de inversión en el largo plazo. Sin embargo, este esquema aún

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

tiene críticas debido a la inestabilidad regulatoria presentada en especial en condiciones climáticas críticas donde quienes han salido mejor librados han sido los generadores que tienen OEF (Jovinao, 2021).

Revisión de literatura

En relación con las imperfecciones regulatorias, es pertinente resaltar a Paul Joskow, (Joskow, 2011), quien argumenta que, en la evaluación de la regulación en los mercados se debe reconocer que esta se da en una realidad que es imperfecta y por lo tanto la comparación de las imperfecciones de la regulación debe hacerse contra las imperfecciones del mercado y no con condiciones teóricas ideales, por tanto, hacer el balance entre los beneficios y costos netos (Joskow, 2020), (Joskow, Paul L; Sloan, 2010). Este análisis propone una revisión cualitativa del contexto de la norma.

Considerando que el presente trabajo busca realizar una estimación cuantitativa del impacto de la regulación en el precio de bolsa se resalta la contribución anterior debido a que estos análisis cuantitativos deben ir acompañados de una revisión del objetivo de la norma y las imperfecciones de mercado que esta busca corregir.

A pesar del consenso entre especialistas de las consecuencias de la regulación, no se identifican trabajos que realicen evaluación de impacto en el precio de bolsa en el mercado de energía eléctrica colombiano. La mayor parte de estudios acerca del precio spot hacen una descripción de sus determinantes donde se identifican ciertas regulaciones relevantes en su estimación. En cuanto a la metodología de evaluación de impacto no se encuentran estudios previos que la apliquen en el precio spot colombiano, pero se encuentra un conjunto de trabajos que realizan evaluaciones con la metodología RDiT para medir las consecuencias de regulaciones y eventos exógenos en otros sectores y otros países. El trabajo de (Lang & Siler, 2013) es el primer trabajo que realiza una aplicación de RDiT en el área de energía, donde se establece el impacto de ahorro por la instalación de sensores en edificaciones.

En relación con el precio spot en Colombia, trabajos como (Barrientos & Toro, 2017), (Barrientos et al., 2018), (Gaviria, 2018), (Garcia et al., 2011) y (Castaño & Sierra, 2012) centran su análisis en sus características. En (Barrientos & Toro, 2017) y (Castaño & Sierra, 2012) utilizan series de tiempo para establecer los determinantes del precio spot, incluyen variables dummies para

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

incluir el efecto de la Resolución CREG071/06 y según su coeficiente y significancia concluyen que es un factor relevante del precio de bolsa.

Mediante otro enfoque, los trabajos de (Botero et al., 2016), (García et al., 2015), (Garces, 2013) y (Arango et al., 2008) analizan el Cargo por Confiabilidad en Colombia. En (Botero et al., 2016) se utiliza una regresión en dos etapas con estructura ARCH para evaluar el impacto del Cargo por Confiabilidad en el precio spot, se incluye como regresor una variable binaria para esta resolución y analiza el valor del estimador como la medición del impacto. De manera similar, (García et al., 2015) analiza el efecto de algunas resoluciones CREG en la determinación del precio. Para esto se incluyen como covariables determinantes del precio y algunas resoluciones elegidas (como CREG071/2006) en un modelo de regresión ARCH.

A modo de consenso los estudios concluyen que la resolución CREG071/2006 tiene un impacto positivo y significativo en el precio spot de electricidad y cuestionan el uso del mecanismo del cargo por confiabilidad en el mercado de electricidad. Asimismo, la metodología más frecuente para este análisis es la regresión para series de tiempo con estructura ARCH.

Por otro lado, en el ámbito internacional, se identifican estudios de análisis de políticas sobre precios utilizando metodologías como Diferencias en Diferencias (DiD), (Faruqui & Sergici, 2010), (Cheng, 2020), (Lang & Siler, 2013) y (Leccese, 2021), simulación de sistemas (Poveda, 2012), (Garces, 2013), (Sáenz de Miera et al., 2008) modelos económicos (Barwick et al., 2019), análisis estadísticos (P. M. R. Bento et al., 2021), (Feger & Radulescu, 2020) e intervención en series de tiempo (Box & Tiao, 1975).

Adicionalmente, en cuanto a la evaluación de políticas que afectan directamente los precios se recopilan como principales metodologías de análisis Regresión discontinua RD (Jin et al., 2021), (Lou et al., 2021), (Nataraj & Hanemann, 2011), (Z. Zhang et al., 2017), (Zhou et al., 2019), (Luo & Zhou, 2020), Diferencias en Diferencias DiD (Zou et al., 2020), (Hindriks & Serse, 2022), (Yang et al., 2021), estudio de eventos ES (Capitán et al., 2021) y control sintético (Leroutier, 2022).

Por su parte, en cuanto a la aplicación de la metodología RDiT se identifican trabajos de revisión de literatura, teóricos y otros empíricos. En (Hausman & Rapson, 2018) se presenta una recopilación de trabajos que aplican RDiT para análisis de impacto, asimismo enumera consideraciones empíricas para su aplicación. Se resalta que esta es una metodología en expansión y expone que se utiliza principalmente en políticas ambientales y energéticas, asimismo enfatiza la

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

importancia de considerar las características de alta frecuencia de las series de tiempo en estas aplicaciones. Por otro lado, (Moraffah et al., 2021) presenta una revisión de métodos de evaluación de inferencia causal para análisis de series de tiempo, expone una recopilación de desarrollos y presenta una herramienta de RD aplicada a datos de series de tiempo.

En cuanto a análisis de impacto de políticas con RDiT, el trabajo de (Gugler et al., 2020) calcula el impacto de una política energética en el Reino Unido, donde estima una reducción efectiva en las emisiones por un impuesto al carbono. Por otro lado, los trabajos (Yudhistira et al., 2020), (Leccese, 2021) y (Shen et al., 2021) utilizan el método RDiT para la evaluación de impactos sobre precios debido a eventos. Puntualmente, en (Shen et al., 2021) se concluye que dos de tres eventos analizados disminuyen el consumo de electricidad y en consecuencia su precio.

Adicional, se identifica un conjunto significativo de trabajos recientes que realizan evaluaciones con metodología RDiT para analizar el efecto del virus COVID-19 y las cuarentenas impuestas por los gobiernos en ámbitos como la salud mental (Bakolis et al., 2021), los precios de los vegetales (Ruan et al., 2021), la calidad del aire (Gao et al., 2021), (Zeng & Wang, 2022) y (J. Zhang et al., 2021), el crimen (Chen et al., 2021), la formación y cierre de empresas (Camino-Mogro & Segundo, 2020), (Liu et al., n.d.) entre otros.

Por consiguiente, se reconoce que el uso de RDiT se ha expandido recientemente, tomando mayor relevancia a partir del COVID-19 y las restricciones gubernamentales establecidas. Este trabajo pretende evaluar la política en la que se establece el Cargo por Confiabilidad con el método RDiT y aportar evidencia en el análisis del precio spot de la energía eléctrica, con el fin de identificar si la aplicación de algunas políticas energéticas ha tenido un impacto local, significativo sobre el precio de la electricidad.

Metodología y marco teórico

Datos

1. Serie del precio de bolsa

Se utilizan los valores del precio de bolsa con desagregación horaria tomados de Sinergox³, entre 2000-01 y 2022-01. Inicialmente se analiza el precio spot con desagregación horaria el cual se presenta en la **Figura 3** Panel A, en donde se puede ver que el comportamiento tiene grandes

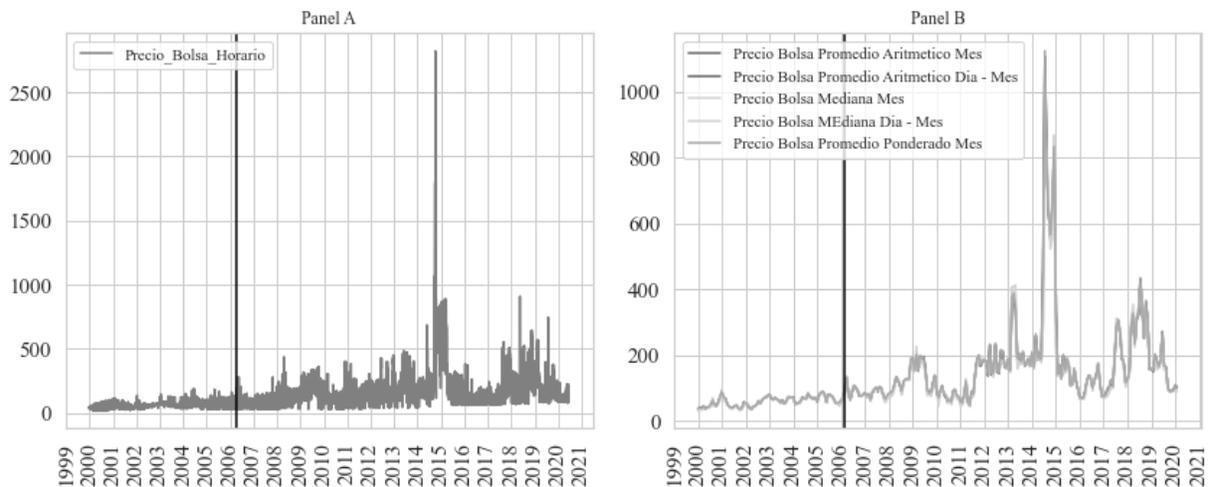
³ Portal de información XM

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

fluctuaciones, debido a la hidrología regular y a los eventos extremos como el niño. Por tanto, se construyen agregaciones que permitan identificar el comportamiento tendencial, estas se detallan en el **Anexo 1**.

Figura 3

Panel A: Precio de bolsa horario. Panel B: Agregaciones precio spot. Elaboración propia con datos tomados de XM.



En la **Figura 3** Panel B se presenta las series con las agregaciones y puede verse que el comportamiento del precio no es estadísticamente diferente entre las agregaciones, por tanto, se continúa trabajando con la serie con promedio aritmético día y mes.

En el presente trabajo se busca identificar si los cambios de nivel de la serie del precio de bolsa mensual detallados en el **Anexo 2** y en la **Figura 4** se pueden atribuir a la aplicación de regulaciones particulares, específicamente la Resolución CREG071/2006 (lo cual se marca en la gráfica), siguiendo las conclusiones de los trabajos (Castaño & Sierra, 2012) y (Barrientos et al., 2018), donde se plantea que el precio de bolsa mensual de electricidad no tiene raíz unitaria, sino que el proceso es estacionario alrededor de los cambios de nivel producidos por eventos exógenos. Para esto se inicia con prueba Box-Cox se realiza una transformación logarítmica.

Con el objetivo de evaluar el efecto en el precio de bolsa de la Resolución CREG071/2006 es relevante considerar:

- Los eventos tienen cambios locales sobre el precio spot mensual.
- No se tienen observaciones cross section debido a que el precio spot es único.

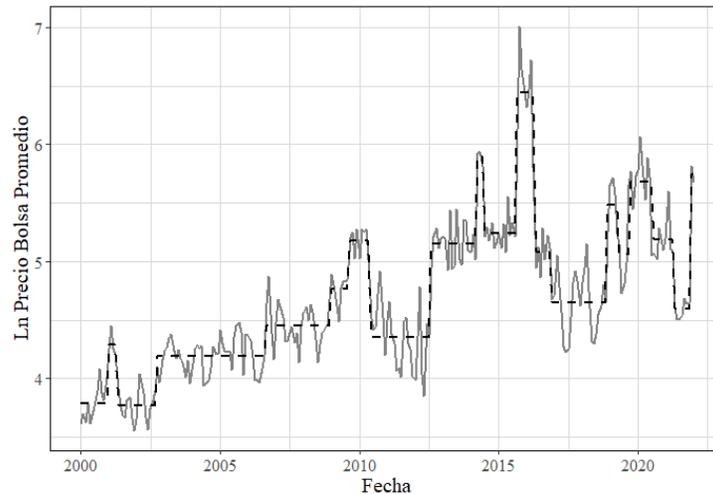
Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

- Se tiene un evento con fecha conocida.

Con lo cual se tiene el marco de aplicación de RDiT, para lo que se establece una ventana alrededor de la aplicación de la norma.

Figura 4

Precio de bolsa con eventos



2. Covariables

Se reúnen algunas de las covariables descritas en trabajos anteriores como (Barrientos & Toro, 2017), (Barrientos et al., 2018), (García et al., 2015), (García et al., 2011), (Botero et al., 2016) entre otros. Asimismo, se adicionan otras covariables y se presentan a continuación las que se incluyen.

- Demanda de energía (kWh), agregación mensual de la demanda (suma de la generación para cada periodo y para cada día). Relevante ya que representa el punto de equilibrio donde se igualan oferta y demanda y se determina el precio spot.
- Disponibilidad Declarada (kWh), oferta de generación (suma de la disponibilidad para cada periodo y para cada día). Relevante ya que es parte de la oferta que determina el precio spot.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

- Nivel agregado de los embalses (m³), cantidad de agua que hay disponible en los embalses del sistema. Se construye como la suma del nivel de volumen útil de los embalses para cada día y el promedio para el mes.
- Aportes de energía (kWh), caudales en energía de los ríos que aportan agua a un embalse del SIN. Se construye como el promedio mensual de los aportes diarios. Relevante debido a que parte significativa de la generación de electricidad se da por plantas filo de agua.
- Costo equivalente de la energía CERE (\$/kWh), presenta el precio del cargo por capacidad y del cargo por confiabilidad. Importante debido a que es determinada por la regulación y hace parte de la oferta. Este valor es mensual.
- Costos promedio de los combustibles (\$/MBTU), es el precio promedio de los combustibles usados para la generación de energía en el sistema.

Adicional a las variables descritas se incluyen variables en relación con el clima ya que afectan significativamente la expectativa del costo de oportunidad de la generación de electricidad. Puntualmente se incluyen las variables temperatura, precipitación, humedad relativa e índice ONI⁴. Este último es una medida de la condición de oscilación del niño y sus fases cálida y fría.

Los datos de la demanda, disponibilidad declarada, nivel de embalses, aportes de energía, CERE y costo promedio de combustibles se descargan de Sinergox; los datos de temperatura, humedad y precipitación se descargan de la base de datos NSRDB del National Renewable Energy Laboratory (NREL)⁵, laboratorio del departamento de energía de Estados Unidos, estas se toman para las ciudades principales conectadas al SIN y se calcula el promedio aritmético. Finalmente, el índice ONI se toma del National Oceanic and atmospheric Administration (NOAA)⁶ el cual pertenece al departamento de Comercio de Estados Unidos.

En el **Anexo 3** se exponen las gráficas de las covariables, estadísticos descriptivos y las transformaciones realizadas para la aplicación metodológica.

⁴ Variable relevante en Colombia porque el fenómeno de niño afecta la disponibilidad de agua y en consecuencia la capacidad de generación por la conformación de la matriz energética.

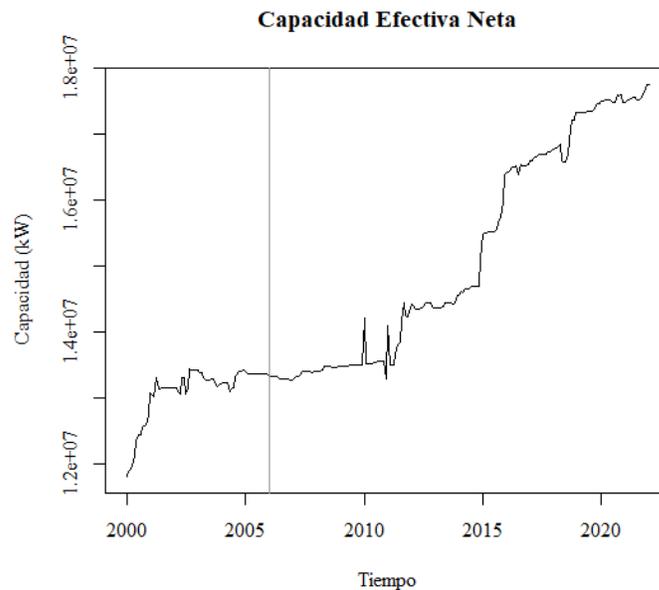
⁵ <https://www.nrel.gov/index.html>

⁶ <https://www.noaa.gov/>

3. Capacidad efectiva neta

Por otro lado, en la **Figura 5** se presenta el comportamiento de la capacidad instalada de generación, en donde se aprecia que posterior al inicio de la Resolución CREG071/2006 (línea vertical) se empezó a ver incrementos en la capacidad del sistema, lo cual se atribuye a los incentivos creados con el esquema del Cargo por confiabilidad. Esto se identifica en particular porque los incrementos se dan en los periodos donde las subastas asignaron compromisos para las plantas nuevas.

Figura 5
Capacidad Efectiva Neta



Identificación

1. Marco Teórico: Regresión Discontinua en el tiempo

En el marco RDiT, el investigador busca analizar el impacto de una fecha conocida z_0 donde identifica una discontinuidad en una variable de interés discreta en el tiempo (Hausman & Rapson, 2018). Se entiende que para todas las fechas $t > z_0$, la unidad es tratada y en otro caso no es tratada. La configuración del RDiT utiliza una variable discreta en el tiempo, para observaciones con alguna periodicidad.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

El método de RDiT es una aplicación de RD (Regresión Discontinua) donde la variable instrumental que determina el umbral de aplicación del tratamiento es el tiempo. RD parte del supuesto que las observaciones antes de ser tratadas, que están cerca al umbral, es un contrafactual válido para evaluar el efecto del tratamiento versus las observaciones tratadas cerca del umbral. (Bernal et al., 2017), (Frölich & Sperlich, 2019).

En la aplicación del presente trabajo se presenta un diseño de RD nítido, el cual se utiliza cuando la probabilidad de ser tratado cambia entre 0 y 1 en el punto de aplicación del tratamiento. En esta aplicación el efecto causal (ATE^7) en el umbral z_0 puede expresarse de acuerdo con la Ecuación (1).

$$ATE(z_0) = E[Y^1 - Y^0 | Z = z_0] \quad (1)$$

Donde Y^1 es la variable de salida en las observaciones con tratamiento en el umbral y Y^0 en las observaciones sin tratamiento. Sin embargo, como no es posible observar Y^1 y Y^0 para z_0 se utiliza una aproximación haciendo uso de la definición lateral de límite a ambos lados del umbral lo cual se expresa en la Ecuación (2)

$$ATE(z_0) = \lim_{z \rightarrow z_0^+} E[Y|Z = z] - \lim_{z \rightarrow z_0^-} E[Y|Z = z] \quad (2)$$

Se puede ver que el estimador es más preciso cuanto más cercano se está del umbral, por tanto, en RD se deben escoger ventanas de identificación alrededor de la aplicación del tratamiento que permitan la estimación sin que alejarse del umbral pueda generar sesgo de selección ya que las observaciones dejan de ser contrafactuales válidos. Finalmente, para estimar el efecto del programa se utiliza la Ecuación (3).

$$y_i = \beta_0 + \tau_i * D_i + \varepsilon_i \quad (3)$$
$$D_i = \begin{cases} 1 & \text{cuando } z \geq z_0 \\ 0 & \text{cuando } z < z_0 \end{cases}$$

⁷ Average Treatment effect, efecto promedio del tratamiento.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Donde D_i es la variable dummy del tratamiento y el efecto promedio del programa (ATE), coincide con el valor estimado en el parámetro τ_i . Posteriormente, con el fin de refinar el estimador del efecto del programa es común incluir en la ecuación (3) variables relevantes en la estimación de la variable de interés y polinomios antes y después del umbral en función del instrumento, con el fin de capturar efectos no lineales de la variable de interés alrededor de la aplicación del programa.

Finalmente, aplicando lo anterior al caso de RDiT, con el fin de estimar el ATE, con un método paramétrico, una forma generalmente usada para la especificación empírica identificada en (Hausman & Rapson, 2018), (Lang & Siler, 2013), (A. Bento et al., 2013) basado en la metodología análoga de RD (Bernal et al., 2017), (Khandker et al., 2010), se presenta en la Ecuación (4)

$$y_t = \beta_0 + \beta_{tratamiento} * D_t + X'_t * \beta + f(t) + \varepsilon_t \quad (4)$$

Donde $\beta_{tratamiento}$ representa el efecto promedio del tratamiento, D_t presenta el indicador de tratamiento, X_t es un vector de covariables, $f(t)$ es una función polinómica donde se captura tendencias temporales no lineales antes y después del tratamiento.

En (Hausman & Rapson, 2018) se realiza una comparación entre el marco RD cross-section y RDiT, en el **Anexo 5**, se presenta un resumen de las diferencias allí identificadas.

2. Ecuación de identificación

Aplicando RDiT, se plantea la especificación de acuerdo con la ecuación (5)

$$y_t = \beta_0 + \beta_{Res} * DRes_t + \rho y_{t-1} + X'_t \beta + f(t) + \varepsilon_t \quad (5)$$

Donde y_t es el precio de bolsa en \$/kWh, $DRes_t$ es una variable binaria de la Resolución que está siendo analizada, X_t es un vector de covariables donde se incluyen las covariables expuestas en la sección anterior.

Es importante aclarar que en el caso particular del precio de bolsa no se espera que la función $f(t)$ sea significativa, debido a que se ha demostrado en trabajos anteriores que esta es una

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

serie estacionaria con cambios de nivel ((Castaño & Sierra, 2012), (Barrientos et al., 2018)). Sin embargo, se realiza una prueba incluyéndolo y se presenta en los resultados. Por otro lado, para la identificación se debe hacer una elección de ventana alrededor del evento, por tanto, esta se toma desde el evento anterior al evento de análisis y hasta el evento siguiente (es decir entre 2002-10 y 2008-12).

3. Supuestos de identificación

Para una correcta aplicación de RDiT se debe cumplir los supuestos de identificación, los cuales en el presente trabajo se cumplen de la siguiente manera.

- Se identifica como instrumento el tiempo el cual determina el inicio de aplicación de la resolución.
- El tiempo se considera como una variable independiente ya que la elección de la aplicación de la norma es exógena a los agentes del mercado. Por lo tanto, no hay variables que afecten al instrumento y a la variable de salida.
- Se identifica que no hay otras variables que afectan el precio de bolsa para la misma fecha de aplicación de la resolución de interés. Esto a su vez se identifica en las figuras expuestas en el **Anexo 4**.

Adicionalmente, en la **Tabla 1** se presenta el balanceo de covariables, en donde se realiza una regresión de cada una de las covariables sobre el evento analizado y se encuentra que en ninguna de las variables es significativo la aplicación de la resolución. En el índice ONI se identifica un comportamiento autorregresivo por tanto se incluye su primer rezago. En particular para las variables temperatura, humedad y precipitación se realiza una regresión SUR con el fin de considerar la posible relación entre ellas.

Con lo anterior, se considera que RDiT es una alternativa adecuada para el presente trabajo debido a que esta metodología permite identificar el efecto causal de un evento exógeno sobre una variable y el objetivo desarrollado en este trabajo es hacer una evaluación del impacto generado por una resolución (evento exógeno) en el precio de bolsa (variable de interés). Adicionalmente, por el comportamiento del precio de bolsa, es conocido que los eventos son locales influenciados principalmente por la alta volatilidad y variabilidad de la serie situación que está en coherencia con la aplicación del método RDiT el cual permite identificar el ATE alrededor del umbral (local). Por

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

su parte, se identifica el tiempo como instrumento adecuado que afecta la aplicación de la norma y a través de esta impacta la variable de salida cumpliendo los supuestos del marco RDiT.

Tabla 1.
Balaceo de covariables – Energía

	Demanda	Disponibilidad declarada	Aportes de energía	Nivel Embalses	CERE	Costo Combustible	Índice ONI
(Intercept)	-0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.01 (0.03)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.03 (0.04)	-0.01 (0.04)
tiempo	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	0.02 (0.03)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.09 (0.05)	0.02 (0.05)
Evento R071	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.01)	-0.03 (0.08)	-0.00 (0.01)	-0.00 (0.01)	-0.18 (0.18)	-0.10 (0.16)
Tiempo*	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.00	0.10	0.00
Evento R071							
	(0.01)	(0.01)	(0.07)	(0.01)	(0.01)	(0.14)	(0.13)
Rezago ONI							0.66 *** (0.03)
N	75	75	75	75	75	75	75
R2	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.10	0.93

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** p < 0,001; ** p < 0,01; * p < 0,05.

Resultados

Se inicia la estimación con el modelo más simple (Ecuación (3)) donde no se incluyen rezagos ni covariables. Estos resultados se presentan en la **Tabla 3** como Modelo 1. Posteriormente, se agregan efectos temporales antes y después del umbral con el fin de controlar comportamientos no lineales, de acuerdo con la recomendación de RD y se presentan en la misma tabla siguiendo:

- Modelo 2: $f(t) = t + t * DRes_t$
- Modelo 3: $f(t) = t + t * DRes_t + t^2 + t^2 * DRes_t$
- Modelo 4: $f(t) = t + t * DRes_t + t^2 + t^2 * DRes_t + t^3 + t^3 * DRes_t$

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 2.

Balanceo covariables - Clima

	Humedad	Precipitación	Temperatura
(Intercept)	0.001 (0.003)	-0.004 (0.01)	0.00 (0.00)
tiempo	-0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
Evento R071	-0.02 (0.01)	0.07 (0.04)	-0.01 (0.01)
Tiempo* Evento R071	0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
Humedad		3.70*** (0.169)	-0.76*** (0.08)
Precipitación	0.26*** (0.012)		0.19*** (0.02)
Temperatura ₁	-0.823*** (0.096)	2.84*** (0.388)	
N	75	75	75

Con los resultados expuestos en la **Tabla 3** se determina que el comportamiento temporal no es relevante para la estimación del efecto de la resolución, asimismo, se identifica que el efecto es mayor a cero en los modelos 1, 2 y 3. Finalmente, considerando que no se aprecian comportamientos no lineales se elige como base el modelo 1.

Posterior, se realiza la estimación considerando las covariables y se controla la persistencia en el modelo incluyendo el rezago de la variable de interés. Esta estimación se presenta en la **Tabla 4**, donde el Modelo 1 presenta la estimación con covariables y el Modelo 2 con covariables y rezago. Se identifica que es significativo incluir el rezago cuyo coeficiente, como se esperaba, es menor de 1, acorde a la hipótesis sobre el precio de bolsa, que presenta un comportamiento autorregresivo estacionario con cambios de nivel.

Por su parte se aprecia que al incluir el rezago se ajusta el valor del coeficiente del efecto de la resolución y este continúa siendo significativo. Asimismo, los coeficientes que acompañan las covariables no se ven significativamente afectados por la inclusión de la mencionada variable y finalmente, se toma como base el Modelo 2. Sobre este, se realiza una revisión de los errores

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

obtenidos. Las pruebas realizadas sobre estos residuales se presentan en el **Anexo 6**, de donde puede verse un comportamiento de acuerdo con lo esperado.

Tabla 3
Estimación Evento y efectos en función del tiempo

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
(Intercept)	4.19 *** (0.02)	4.18 *** (0.04)	4.13 *** (0.06)	4.26 *** (0.11)
Evento_R071	0.26 *** (0.04)	0.49 (0.31)	3.78 (2.19)	11.39 (18.06)
Tiempo		0.00 (0.00)	0.01 (0.01)	-0.02 (0.02)
Tiempo* Evento		-0.00 (0.01)	-0.12 (0.07)	-0.47 (0.90)
Tiempo ²			-0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
Tiempo ² * Evento			0.00 (0.00)	0.01 (0.01)
Tiempo ³				-0.00 * (0.00)
Tiempo ³ *Evento				-0.00 (0.00)
nobs	75	75	75	75
adj.r.squared	0.39	0.38	0.39	0.41
statistic	43.44	14.95	9.64	7.57
p.value	0.00	0.00	0.00	0.00

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar.

Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Por lo tanto, es posible ver que el efecto de la Resolución CREG071/2006 es significativo en el precio de bolsa y este generó un incremento en el precio de alrededor 12%. Igualmente, es relevante apreciar que el precio presenta un componente autorregresivo de orden uno, el cual es significativo. Finalmente, de las covariables incluidas, solo se identifica relevante el nivel de los embalses.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 4

Regresión discontinua estimada del evento Resolución CREG 071/2006

	Modelo 1	Modelo 2
(Intercept)	4.21 *** (0.03)	4.25 *** (0.02)
Demanda	-0.02 (0.03)	-0.01 (0.02)
Disponibilidad declarada	-0.00 (0.03)	-0.01 (0.02)
Nivel de embalses	-0.06 (0.03)	-0.06 * (0.03)
Aportes energía	-0.01 (0.03)	-0.03 (0.02)
CERE	-0.01 (0.02)	-0.01 (0.02)
Costo Combustibles	-0.00 (0.02)	-0.00 (0.02)
Precipitación	-0.02 (0.05)	-0.03 (0.04)
Humedad	-0.00 (0.06)	0.01 (0.05)
Temperatura	0.02 (0.03)	0.01 (0.03)
ONI	-0.02 (0.03)	-0.01 (0.04)
Evento R071	0.23 *** (0.06)	0.12 * (0.05)
Rezago precio bolsa		0.10 ** (0.03)
N	75	75
R2	0.50	0.65

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Pruebas de robustez

1. Efecto de covariables

A pesar que las covariables son relevantes en la estimación RDiT, el efecto del evento debe ser robusto al cambio en estas características, por tanto, para evaluar la sensibilidad del efecto del evento sobre la variable de interés se realizan regresiones incluyendo diferentes covariables, los resultados se presentan en la **Tabla 5** donde se inicia incluyendo el evento, posterior se adicionan covariables iniciando con el rezago del precio y luego aquellas que afectan directamente la capacidad de generación, como nivel de embalses, aportes de energía y precio de combustibles, luego CERE, índice ONI, temperatura, humedad y precipitación y finalmente, componentes de la oferta como capacidad declarada y la demanda.

En la **Tabla 5** puede verse que con la inclusión de covariables el estimador del efecto del tratamiento varía entre 0.26 y 0.11, presentando un efecto más estable alrededor de 0.15 y 0.11 una vez se incluye el rezago con el fin de controlar la persistencia en los residuales de la estimación. Se encuentra que en todos los casos es positivo y significativo.

Por tanto, se puede ver que los resultados no son sensibles a la selección de covariables. Sin embargo, es importante resaltar que las mayores variaciones en el coeficiente de interés se presentan al no incluir la variable de rezago, el Nivel de embalse y la temperatura, lo cual acorde con la teoría, son las condiciones que más afectan la capacidad de generación y, en consecuencia, son las que se espera tenga mayor relación con el precio. Por tanto, al omitirlas se incurre en un posible sesgo de variable omitida.

2. Ventanas de estimación

Con el fin de evidenciar si la elección de ventanas de estimación afecta los resultados del efecto del evento, se realiza una estimación con diferentes ventanas. Para esto se parte del modelo base y se remueven 3, 6 y 9 meses al inicio y final de la ventana.

Los resultados se presentan en la **Tabla 6**, donde en todas las estimaciones se incluyen el total de las covariables del modelo base. De los resultados se aprecia que el cambio de ventanas de estimación no genera una variación sobre los resultados estimados del efecto de la Resolución sobre el precio de bolsa.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 5
Efectos de inclusión de covariables

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10
(Intercept)	4.19 *** (0.02)	4.23 *** (0.02)	4.24 *** (0.02)	4.24 *** (0.02)	4.24 *** (0.02)	4.24 *** (0.02)	4.24 *** (0.02)	4.25 *** (0.02)	4.25 *** (0.02)	4.25 *** (0.02)
Evento R071	0.26 *** (0.04)	0.15 ** (0.05)	0.14 *** (0.04)	0.13 ** (0.04)	0.13 ** (0.04)	0.13 ** (0.04)	0.13 * (0.05)	0.11 * (0.05)	0.11 * (0.05)	0.11 * (0.05)
Rezago precio bolsa		0.09 *** (0.02)	0.10 *** (0.03)	0.10 *** (0.02)	0.10 *** (0.03)	0.10 *** (0.03)	0.10 *** (0.03)	0.11 *** (0.03)	0.11 *** (0.03)	0.11 *** (0.03)
Nivel embalses			-0.06 ** (0.02)	-0.05 ** (0.02)	-0.05 ** (0.02)	-0.05 ** (0.02)	-0.05 ** (0.02)	-0.06 ** (0.02)	-0.07 ** (0.02)	-0.07 ** (0.03)
Aportes energía				-0.05 ** (0.01)	-0.05 ** (0.01)	-0.04 ** (0.01)	-0.05 ** (0.02)	-0.02 (0.02)	-0.02 (0.02)	-0.02 (0.02)
Costo combustible					0.00 (0.02)	0.00 (0.02)	-0.00 (0.02)	0.00 (0.02)	0.00 (0.02)	-0.00 (0.02)
CERE						-0.01 (0.02)	-0.01 (0.02)	-0.00 (0.02)	-0.00 (0.02)	-0.01 (0.02)
ONI							-0.01 (0.03)	-0.01 (0.03)	-0.01 (0.03)	-0.01 (0.04)
Temperatura								0.04 * (0.01)	0.04 * (0.02)	0.04 ** (0.02)
Humedad								0.01 (0.03)	0.01 (0.04)	0.01 (0.04)
Disponibilidad declarada								-0.03 (0.03)	-0.03 (0.03)	-0.03 (0.03)
Demanda									0.01 (0.02)	0.01 (0.02)
Costo combustible										-0.02 (0.02)
R2	0.39	0.51	0.59	0.64	0.64	0.64	0.64	0.67	0.67	0.68

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** p < 0,001; ** p < 0,01; * p < 0,05...

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 6

Estimación con variación de ventanas

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
(Intercept)	4.25 *** (0.02)	4.25 *** (0.02)	4.25 *** (0.02)	4.23 *** (0.03)
Rezago precio bolsa	0.10 ** (0.03)	0.10 ** (0.03)	0.10 ** (0.03)	0.10 * (0.04)
Evento R071	0.12 * (0.05)	0.11 (0.06)	0.13 (0.07)	0.14 (0.07)
N	75	69	63	57
Covariables	Si	Si	Si	Si
R2	0.65	0.63	0.64	0.64

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad.

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$...

3. Regresiones lineales a ambos lados del umbral

Con el fin de probar la sensibilidad del efecto de tratamiento, se realiza una regresión lineal a cada lado del umbral donde el efecto del tratamiento se puede interpretar como la diferencia de las constantes. Los resultados de ambas regresiones se presentan en la **Tabla 7** donde el Modelo 1 es la estimación antes del tratamiento y el Modelo 2 después de tratamiento.

Es posible apreciar que en ambos casos la constante es significativa y positiva, asimismo que en el caso del modelo 2 se obtiene un valor mayor de constante lo cual es generado por el evento de análisis. Por tanto, el efecto del tratamiento es aproximadamente de 0.26, a pesar de que este valor es superior al modelo base considerado en los resultados, es coherente en tanto que se obtiene un valor positivo y significativo como efecto del inicio de la norma en el precio de bolsa.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 7

Estimación regresiones a ambos lados del umbral

	Modelo 1	Modelo 2
(Intercepto)	4.19 *** (0.02)	4.45 *** (0.04)
Rezago precio de bolsa	0.10 *** (0.02)	0.04 (0.05)
N	47	28
Covariables	Si	Si
R2	0.66	0.46

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$...

4. Prueba placebo

Con el fin de evaluar que el método utilizado no identifica eventos en fechas donde no se presentan discontinuidades en la serie de interés, se plantea una prueba placebo. Esta consiste en evaluar el efecto sobre el precio de bolsa en un punto de no discontinuidad, con lo cual se espera obtener que dicho evento no es significativo. Para esto se utiliza el precio de bolsa en el periodo 2002-10 a 2006-09 y se plantea un evento en la mitad de este periodo, donde por inspección visual no se identifican discontinuidades lo cual se puede ver en la **Figura 6**.

Los resultados de esta prueba se presentan en la **Tabla 8** en donde se incluyen las covariables. Puede verse que de acuerdo con lo esperado el evento placebo no es significativo y por tanto la identificación apunta a ser válida para identificar discontinuidades.

5. Estimación en dos etapas

En (Hausman & Rapson, 2018) se propone un procedimiento para la aplicación de RDiT, el cual consiste en realizar una estimación en 2 etapas, donde la primera se realiza una regresión de la variable de interés sobre las covariables, esta etapa se realiza sobre la serie completa, es decir sin ventanas de identificación alrededor del umbral.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 6

Evento prueba placebo

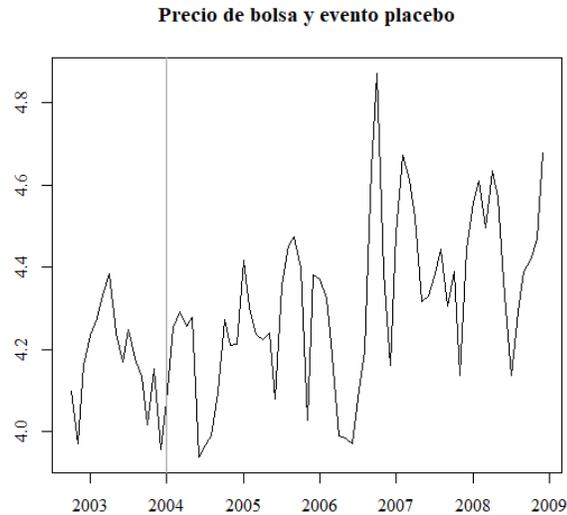


Tabla 8

Estimación prueba placebo

	Modelo 1
(Intercepto)	4.17 *** (0.02)
Rezago precio de bolsa	0.11 *** (0.02)
Evento Placebo	0.07 (0.04)
N	48
Covariables	Si
R2	0.70

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$...

Posterior, se procede a realizar la segunda etapa, esta consiste en utilizar los residuales de la primera etapa para hacer una regresión sobre el evento de interés. En este caso utilizando ventanas alrededor del umbral. En particular, se resalta que esta metodología puede contribuir a un

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

mejor aislamiento de los efectos de las covariables, ya que en la primera etapa del procedimiento se utiliza la serie completa con lo que se aumenta las observaciones para aislar el efecto de estas sobre la salida de interés, aumentando el poder de la especificación. Siendo así, en el mencionado artículo se sugiere como prueba de robustez. Siguiendo lo anterior, se realiza el procedimiento descrito. Los resultados de la primera y segunda etapa se presentan en la **Tabla 9**.

Se puede ver de la etapa uno que las variables significativas en el precio de bolsa son el índice ONI, los aportes de energía y la disponibilidad declarada, donde el primero tiene una relación positiva con el precio y los dos últimos tienen una relación negativa con el precio.

Esto es concordante con la teoría debido a que mayor disponibilidad de agua representa mayor capacidad de generación por tanto menores precios. Por otro lado, índices ONI positivos se relacionan con el fenómeno del niño, situación con baja disponibilidad de agua y en consecuencia de generación hidráulica, lo cual implicaría incrementos en el precio. Por su parte de la etapa 2 vemos que el evento es significativo y se estima un efecto sobre el precio de bolsa aproximadamente de 19%. Por tanto, la estimación es robusta a aplicar un método de estimación en 2 etapas.

6. Estimación no paramétrica

Se procede a realizar una estimación no paramétrica a ambos lados del umbral con el fin de identificar si la diferencia de la esperanza condicional de la variable de salida coincide con los resultados previamente presentados. Los resultados se detallan en el **Anexo 7** y estos confirman que el efecto del tratamiento es positivo, es decir, la resolución genera un incremento en el precio de bolsa y que estos resultados son robustos al tipo de kernel elegido y al ancho de banda. Siendo así, esta prueba presenta evidencia en donde no se fuerzan los datos a una forma funcional predefinida y se sigue obteniendo un efecto positivo y relevante.

7. Aplicación ITSA (Análisis de interrupción de series de tiempo)

Finalmente, se utiliza una metodología alterna para verificar los resultados obtenidos. Para esto se hacen 2 aplicación de análisis de interrupción de series de tiempo.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 9

Estimación en dos etapas

	Model 1	Model 2
(Intercept)	4.71 *** (0.04)	-0.47 *** (0.03)
Demanda	0.03 (0.06)	
Disponibilidad declarada	-0.08 (0.05)	
Nivel embalses	0.02 (0.05)	
CERE	-0.03 (0.05)	
Aportes energía	-0.10 (0.05)	
Costos combustibles	0.04 (0.04)	
Precipitación	0.04 (0.07)	
Humedad	-0.01 (0.07)	
Temperatura	-0.02 (0.05)	
ONI	0.21 *** (0.05)	
Rezago variable		0.20 *** (0.03)
Evento R071		0.19 *** (0.05)
N	238	75
R2	0.17	0.68

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$...

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Primero, siguiendo (Box & Tiao, 1975) se plantea que la intervención de la serie de tiempo consiste en un efecto tipo impulso adicional a un tipo paso. Para esto se sigue la siguiente forma (McDowall et al., 2019)

$$y_t = \rho y_{t-1} + \beta_1 * t + \beta_2 * t * DRes_t + \beta_3 * DRes_t + \beta_4 * \nabla DRes_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

Donde y_t es el precio de bolsa en \$/kWh, $DRes_t$ es una variable binaria de la Resolución que está siendo analizada la cual tiene un valor de 1 posterior a la aplicación de la norma, $\nabla DRes$ es una variable tipo impulso en el periodo de aplicación de la norma.

Se estiman modelos variando la inclusión de la variable de la resolución tipo impulso y tipo paso y cuyos resultados se exponen en la **Tabla 10** en donde se puede ver que ambos efectos del evento sobre el precio de bolsa son significativos y que este se incrementó con la aplicación de la resolución analizada, presentando inicialmente un sobrepaso de aproximadamente 35% y posteriormente estabilizándose con un efecto sobre el precio de bolsa de 11.9%.

Posterior, se realiza una prueba utilizando la función `itsa.model` en R cuyos resultados se detallan en el **Anexo 8**. Finalmente, con ambas aplicaciones se puede ver que el efecto del evento analizado sobre la variable de precio de bolsa es robusto a un cambio en el método de estimación entre RD e ITSA.

Mecanismo

En esta sección se explora el mecanismo potencial para los resultados obtenidos. Para esto es importante entender cuál fue el cambio que trajo la Resolución CREG071/2006.

Como se explicó en el contexto, esta resolución fue el mecanismo que quedó en firme para derogar el Cargo por capacidad y establecer una nueva alternativa denominada Cargo por confiabilidad. Uno de los principales cambios consistió en que el pago ya no se realiza sobre capacidad instalada sino sobre compromisos, denominados OEF. Las OEF se asignan principalmente por subastas y asignaciones administradas. Cuando las empresas adquieren esta obligación se están comprometiendo a atender la demanda a un precio techo cuando el sistema se encuentre en condiciones críticas (poca disponibilidad de generación con precios de bolsa superiores a precio de escasez).

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Tabla 10
Estimación ITS

	Model 1	Model 2	Model 3
(Intercept)	4.23 *** (0.02)	4.28 *** (0.02)	4.23 *** (0.02)
Rezago precio bolsa	0.09 *** (0.02)	0.12 *** (0.02)	0.09 *** (0.02)
Evento R071	0.15 ** (0.05)		0.13 ** (0.04)
Evento R071 Salto		0.39 *** (0.04)	0.33 *** (0.04)
N	75	75	75
R2	0.51	0.52	0.58

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Las subastas se enfocan en la construcción de plantas nuevas o mejoras a plantas existentes, las cuales al recibir un certificado de OEF garantizan un ingreso en el momento de inicio de esta obligación, con lo cual facilita la adquisición de préstamos y el interés de inversionistas para la construcción de plantas nuevas. Se puede ver que el Cargo por Confiabilidad trae mayores compromisos para los generadores, ya que deben garantizar la OEF (con su propia disponibilidad o respaldos contratados) para poder recibir la remuneración. A su vez, este esquema busca aumentar la capacidad de generación con la creación de nuevas plantas, por tanto, se espera mayor competencia para los generadores.

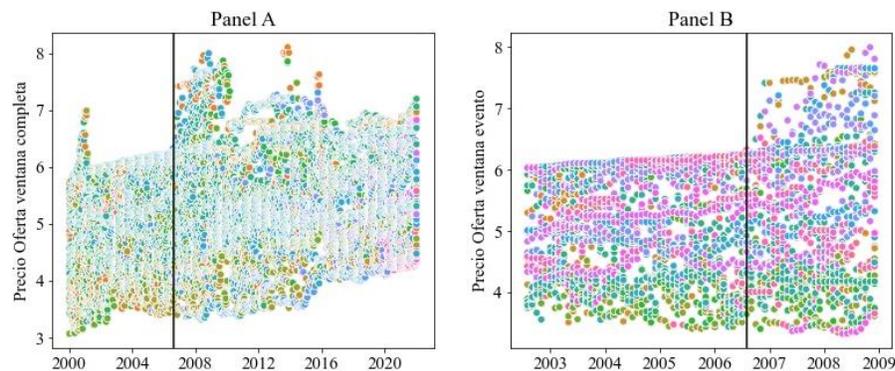
En síntesis, este esquema representa mayores compromisos para los generadores, cuya remuneración se debe asociar al pago por las OEF y no trasladarse al mecanismo del mercado. Sin embargo, al aumentar las responsabilidades de los generadores, se podría presentar que este esquema pudiera crear un incremento en el costo de generar energía eléctrica, por tanto, se daría un cambio en la oferta de los generadores acompañado de un aumento en el precio de bolsa y los contratos de energía.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

1. Precio de oferta

Para analizar este mecanismo, inicialmente se presenta en la **Figura 7** Panel A la oferta durante la ventana completa de análisis para los recursos de generación y donde cada color representa la oferta de una planta. Se omite la relación entre colores y planta ya que no representa información relevante para el análisis expuesto. En el Panel B de la misma figura, se presenta la oferta alrededor del umbral del evento de Res.CREG071/2006. Ambas se presentan con una transformación lineal logarítmica. En esta se puede ver que posterior al evento se presenta un incremento en la oferta de los generadores.

Figura 7
Oferta por recurso



Finalmente, para evaluar el mecanismo propuesto se realiza una regresión panel de efectos fijos en la ventana alrededor del evento de análisis. Se incluyen como covariables las ventas en contratos de energía (kWh), disponibilidad declarada (kWh), nivel de los embalses (m³), aporte hídrico de los ríos (kWh) y CEE (\$/kWh). En la **Figura 8** se presentan las covariables descritas y puede verse que solo el precio de oferta presenta una discontinuidad en el evento de análisis.

Se realiza la regresión descrita y se agrega una prueba variando las covariables con el fin de probar la sensibilidad a su inclusión. Los resultados se exponen en la **Tabla 11**, donde el evento es significativo en todos los casos teniendo un efecto entre 0.2 hasta 0.4 sobre la oferta. Sin embargo, es apreciable que las covariables tienen efectos significativos sobre la variable de interés, por tanto, como modelo base de análisis se toma el Modelo 1 en el que se incluyen la totalidad de las covariables.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 8

Covariantes modelo oferta

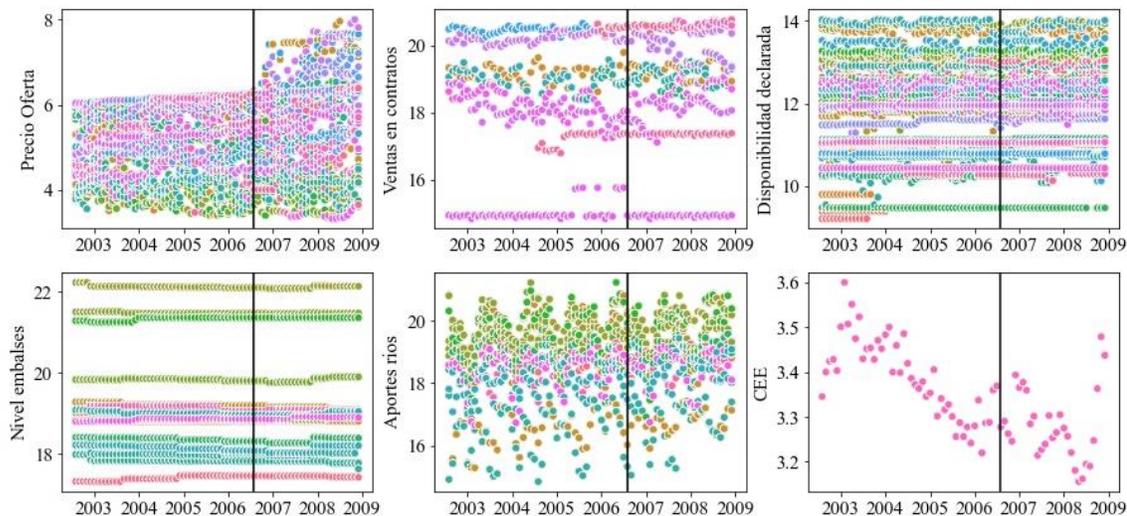


Tabla 11

Estimación oferta con efectos fijos por planta

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
No. Observations	48098	48098	48098	94657	54704
R-Squared (Overall)	-4.6443	-4.9412	-5.4341	0.0219	-6.5287
F-statistic	1034	1580.4	1803.3	1683.9	1188.1
P-value (F-stat)	0	0	0	0	0
(Intercepto)	36.498***	53.354***	52.620***	18.263***	43.747***
	-17.404	-45.64	-44.853	-70.161	-40.607
Evento R071	0.3484***	0.3373***	0.4043***	0.2150***	0.2002***
	-47.667	-48.75	-66.701	-45.967	-31.559
Ventas en contratos	-0.6026***	-0.6458***	-0.6625***	-0.5135***	
	(-50.687)	(-56.777)	(-58.173)	(-61.893)	
Disponibilidad declarada	0.0823***	0.0227	0.0286	-0.1491***	
	-4.5173	-1.2716	-1.5944	(-9.8964)	
Nivel embalse	-1.5458***	-1.6038***	-1.6837***		-1.7256***
	(-26.418)	(-27.457)	(-28.776)		(-31.315)
Aportes rios	-0.2905***	-0.2002***	-0.1813***		-0.2147***
	(-41.324)	(-35.879)	(-32.850)		(-48.724)
CEE	-0.4229***	-0.6397***		-0.4782***	-0.5656***
	(-11.696)	(-19.809)		(-21.872)	(-17.613)
Precipitación	0.3845***				
	-5.1001				

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Humedad relativa	1.8654***				
	-8.3418				
Temperatura	1.9893***				
	-7.1902				
ONI	-0.0811***				-0.0208***
	(-16.567)				(-5.0149)
Effects	Entity	Entity	Entity	Entity	Entity
T-stats reported in parentheses					

De los resultados obtenidos puede verse que el evento de la Resolución CREG071/2006 incrementó la oferta de los generadores aproximadamente un 34%, la cual acompañó el aumento del precio de bolsa.

2. Contratos

Por otro lado, con el fin de identificar el efecto de la resolución y el incremento del precio en el mercado de largo plazo se analiza el comportamiento de los costos promedio de los contratos. Inicialmente, para analizar este efecto, en la **Figura 9** se presenta el comportamiento del precio de todos los contratos, de los contratos del mercado no regulado y los del mercado regulado. De la imagen se aprecia que a partir de la resolución se da un incremento en el mismo periodo del precio de los contratos del mercado no regulado. Sin embargo, en el caso del mercado regulado, el incremento se da después de unos periodos. Por tanto, el precio promedio total incrementa inicialmente, en menor medida y unos meses después incrementa significativamente la totalidad del precio promedio de los contratos. Igualmente se puede ver que el efecto en los contratos no presenta un cambio de nivel para el periodo de análisis, sino que a partir de la norma hay un comportamiento creciente en el precio de los contratos.

Adicional se presenta un análisis de regresión sobre el precio de los contratos sin incluir covariables en la **Tabla 12**. En donde se puede ver que el efecto de la norma fue un comportamiento cuadrático positivo en el precio promedio de los contratos. Finalmente, con lo anterior es apreciable que la oferta tuvo un efecto también en el mercado de contratos debido a la Resolución CREG 071/2006.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 9

Costo promedio de contratos.

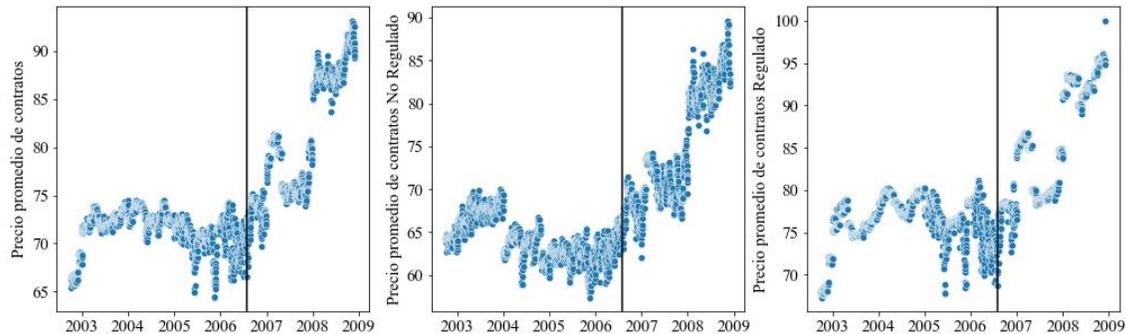


Tabla 12

Estimación precio de contratos.

	Precio promedio de contratos	Precio promedio de contratos Mercado No Regulado	Precio promedio de contratos Mercado Regulado
(Intercepto)	4.08 *** (0.15)	3.98 *** (0.16)	4.13 *** (0.17)
Evento R071	0.64 (0.40)	0.65 (0.42)	0.66 (0.46)
Tiempo	0.08 * (0.03)	-0.08 * (0.04)	0.16 *** (0.04)
Tiempo* Evento	-0.87 * (0.40)	-0.73 (0.43)	-0.96 * (0.47)
Tiempo ²	-0.15 ** (0.05)	0.08 (0.06)	-0.25 *** (0.05)
Tiempo ² * Evento	0.71 ** (0.22)	0.51 * (0.23)	0.81 ** (0.25)
N	75	75	75
R2	0.89	0.91	0.85

Todos los predictores continuos están centrados en la media y escalados por 1 desviación estándar. Los errores estándar son robustos a la heteroscedasticidad. *** p < 0,001; ** p < 0,01; * p < 0,05..

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Discusión

En el presente trabajo se realizó un análisis del impacto de la Resolución CREG071/06 sobre el precio de bolsa de la electricidad en Colombia, donde se evidencia que con el inicio de la norma se introdujo un incremento significativo en el precio spot.

Considerando que el Cargo por confiabilidad es un esquema que tiene su remuneración independiente del ingreso de la interacción del mercado de corto y largo plazo, se espera que en esta remuneración se conserven los costos asociados a mantener el respaldo de las OEF en el corto y largo plazo. Por tanto, no se esperaría tener un incremento adicional en el precio spot aparte del recaudo que se realiza por medio del CERE. Sin embargo, en este trabajo se evidencia que, a partir de la publicación de la norma, incluso antes de tener OEF vigentes, se presenta un incremento en las ofertas, así como en los precios de los contratos.

Recordando que la remuneración del Cargo por confiabilidad está asociada con la disponibilidad que tiene cada planta. A partir de la norma, la oferta hace parte del respaldo que presentan los agentes y con la cual se remunera la OEF. Con esto, el mercado de confiabilidad establecido con la Resolución CREG071/2006 generó compromisos adicionales a las plantas desde la oferta con lo que se puede interpretar su incremento como una prima de confiabilidad con la que los generadores evidencian las responsabilidades asumidas por las plantas desde la oferta de generación.

No obstante, se vuelve relevante desde la regulación incluir elementos de control y garantizar que el precio, en este caso del mercado de confiabilidad, cubra sus riesgos y costos, con el fin de no afectar variables relevantes del mercado como el precio spot cuando se introducen esquemas adicionales.

De igual manera, es conveniente señalar que, en cuanto a la capacidad del sistema, se evidencia el incremento en los años posteriores al inicio de esquema, específicamente cuando se tenían compromisos producto de las subastas de OEF. Por tanto, se evidencia que parte de los objetivos de la norma se han cumplido debido a que se ha logrado aumentar la matriz generadora del país.

Por último, se resalta que se cumple de manera exitosa el objetivo planteado en el presente trabajo de realizar una aplicación de RDiT con el fin de evaluar el impacto de una política sobre el precio de bolsa de la energía eléctrica de Colombia. Adicionalmente, se invita a continuar

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

realizando evaluaciones de impacto de las normas en el mercado de energía eléctrica, ya que con la aplicación de regulaciones se generan cambios en variables relevantes del mercado, las cuales no siempre son planeadas ni esperadas por el regulador ni por el mercado y las que deben ser consideradas en los costos y beneficios netos de la norma.

Conclusiones

Se analiza el efecto del inicio del Cargo por confiabilidad en el precio de bolsa de la energía eléctrica en Colombia. Se encontró que este evento generó un incremento significativo de alrededor de 12% en el precio spot. Estos resultados se mantienen ante revisión de comportamientos no lineales, cambio de las covariables incluidas para describir el comportamiento del precio spot, análisis antes y después de la política, cambio en las ventanas de estimación, aplicación de una estimación en dos etapas y metodología alternativa.

Se realiza un análisis sobre los mecanismos para el incremento en el precio spot y se evidencia que una de las posibles vías para este efecto se dio por medio de la oferta, donde los agentes generadores incrementaron su oferta en el mercado de corto y largo plazo a partir de la norma. Considerando que a partir del Cargo por confiabilidad la oferta tiene una afectación directa sobre la remuneración de este esquema, esta puede entenderse como el respaldo que tienen los generadores de sus responsabilidades al adquirir OEF. Por tanto, la oferta representa el respaldo para la OEF asignada presente y futura. Siendo así, este incremento en el precio se propone interpretar como una prima por compromiso con la que los generadores trasladan sus costos de confiabilidad y los riesgos asociados a mayores responsabilidades, en mayores precios en el mercado.

Los resultados de este estudio están en concordancia con resultados utilizando otras metodologías de análisis como lo son (Barrientos & Toro, 2017) y (Castaño & Sierra, 2012).

En cuanto al marco RDiT, se considera que es adecuado para evaluar el impacto de políticas en variables de series de tiempo. Siendo, fundamental el cumplimiento de los supuestos de identificación en especial la restricción exclusiva donde se debe verificar que en el evento de análisis no estén ocurriendo otros eventos que puedan afectar de manera simultánea la variable de interés.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Por último, en la aplicación de la metodología RDiT, se debe tener en cuenta consideraciones especiales de las series de tiempo como la inclusión de efectos autorregresivos, de covariables relevantes y revisar comportamientos no lineales dependientes del tiempo alrededor del umbral

Referencias

- Arango, S., Restrepo, M. I., & Vélez, L. G. (2008). La confiabilidad en los sistemas eléctricos competitivos y el modelo colombiano de cargo por confiabilidad. *Revista Universidad Nacional de Colombia*, 31(56), 199–223.
- Bakolis, I., Stewart, R., Baldwin, D., Beenstock, J., Bibby, P., Broadbent, M., Cardinal, R., Chen, S., Chinnasamy, K., Cipriani, A., Douglas, S., Horner, P., Jackson, C. A., John, A., Joyce, D. W., Lee, S. C., Lewis, J., McIntosh, A., Nixon, N., ... Landau, S. (2021). Changes in daily mental health service use and mortality at the commencement and lifting of COVID-19 “lockdown” policy in 10 UK sites: A regression discontinuity in time design. *BMJ Open*, 11(5), 1–13. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-049721>
- Barrientos, J., Tabares, E., & Velilla, E. (2018). Forecasting electricity price in Colombia: A comparison between neural network, ARMA process and hybrid models. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(3), 97–106.
- Barrientos, J., & Toro, M. (2017). Análisis de los fundamentales del precio de la energía eléctrica: evidencia empírica para Colombia. *Revista de Economía Del Caribe*, 2106(19), 34–63.
- Barwick, P. J., Li, S., Ligu, L., & Zou, E. (2019). From Fog to Smog: The Value of Pollution Information. In *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3441954>
- Bento, A., Kaffine, D., Roth, K., & Zaragoza, M. (2013). The Effects of Regulation in the Presence of Multiple Unpriced Externalities: Evidence from the Transportation Sector. *American Economic Journal: Economic Policy*, 6. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2219491>
- Bento, P. M. R., Mariano, S. J. P. S., Calado, M. R. A., & Pombo, J. A. N. (2021). Impacts of the COVID-19 pandemic on electric energy load and pricing in the Iberian electricity market. *Energy Reports*, 7, 4833–4849. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.058>
- Bernal, J. L., Cummins, S., & Gasparrini, A. (2017). Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: A tutorial. *International Journal of Epidemiology*, 46(1), 348–355. <https://doi.org/10.1093/ije/dyw098>
- Botero, J. P., García, J. J., & Velásquez, H. (2016). Efectos del cargo por confiabilidad sobre el precio spot de la energía eléctrica en Colombia. *Cuadernos de Economía (Colombia)*, 35(68), 491–519. <https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v35n68.52732>
- Box, G. E. P., & Tiao, G. C. (1975). Intervention Analysis with Applications to Economic and Environmental Problems. *Journal of the American Statistical Association*, 70(349), 70. <https://doi.org/10.2307/2285379>
- Burke, P. J., Stern, D. I., & Bruns, S. B. (2018). The impact of electricity on economic development: A macroeconomic perspective. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 12(1), 85–127. <https://doi.org/10.1561/101.00000101>
- Camino-Mogro, & Segundo. (2020). Turbulence in startups: Effect of COVID-19 lockdown on creation of new firms and its capital. *MPRA*, 104502.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

- Capitán, T., Alpízar, F., Madrigal-Ballesteros, R., & Pattanayak, S. K. (2021). Time-varying pricing may increase total electricity consumption: Evidence from Costa Rica. *Resource and Energy Economics*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2021.101264>
- Castañón, E., & Sierra, J. (2012). Sobre la existencia de una raíz unitaria en la serie de tiempo mensual del precio de la electricidad en Colombia. *Lecturas de Economía*, 76, 259–291.
- Chen, P., Kurland, J., Piquero, A., & Borrion, H. (2021). Measuring the impact of the COVID-19 lockdown on crime in a medium-sized city in China. *Journal of Experimental Criminology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11292-021-09486-7>
- Cheng, H. (2020). *Essays on the Effectiveness and Implications of Governments' Green Product Incentives* (Vol. 5, Issue 1). <http://www.akrabjuara.com/index.php/akrabjuara/article/view/919>
- Documento CREG Cargo por Confiabilidad., 4 (2006). [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/7c7ee4f6ee5328880525785a007a6d04/\\$FILE/CARGO POR CONFIABILIDAD.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/7c7ee4f6ee5328880525785a007a6d04/$FILE/CARGO POR CONFIABILIDAD.pdf)
- Resolución CREG 071 de 2006, 70 (2006). <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resolucion-2006-Creg071-2006>
- Ley Eléctrica - Ley 143 de 1994, 347 (1994). http://www.minminas.gov.co/documents/10180/667537/Ley_143_1994.pdf/c2cfbda4-fe12-470e-9d30-67286b9ad17e
- Colombia. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2022). *Mercado de Energía Mayorista*. <http://webdav.superservicios.gov.co:8080/Energia-y-gas/Energia/Mercado-de-Energia-Mayorista2>
- Cortés, S., & Londoño, A. A. (2017). Energía Renovables en Colombia desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25, 375–390.
- English, P. (2019). *The its . analysis R package - Modelling short time series data Reviewing Time Series Methods and the Interrupted Time Series Framework*. 1–14. <https://cran.r-project.org/web/packages/its.analysis/its.analysis.pdf>
- Faruqui, A., & Sergici, S. (2010). Household response to dynamic pricing of electricity: A survey of 15 experiments. *Journal of Regulatory Economics*, 38(2), 193–225. <https://doi.org/10.1007/s11149-010-9127-y>
- Feger, F., & Radulescu, D. (2020). When environmental and redistribution concerns collide: The case of electricity pricing. *Energy Economics*, 90, 104828. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104828>
- Frölich, M., & Sperlich, S. (2019). *Impact Evaluation. Treatment Effects and Causal Analysis*. In *Impact Evaluation* (1st ed.). University Printing House, Cambridge, United Kingdom. <https://doi.org/10.1017/9781107337008>
- Gao, C., Li, S., Liu, M., Zhang, F., Achal, V., Tu, Y., Zhang, S., & Cai, C. (2021). Impact of the

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

- COVID-19 pandemic on air pollution in Chinese megacities from the perspective of traffic volume and meteorological factors. *Science of the Total Environment*, 773, 145545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145545>
- Garces, E. (2013). *Evaluación de políticas para garantizar el abastecimiento de energía eléctrica en Colombia* [Universidad Nacional de Colombia Facultad]. <http://bdigital.unal.edu.co/39641/1/1037589263.2014.pdf>
- García, J., Gaviria, A., & Salazar, L. (2011). Determinantes Del Precio De La Energía Eléctrica En El Mercado No Regulado En Colombia. *Revista Ciencias Estratégicas*, 19(26), 225–246.
- García, J. J., Arango, S., & Ortiz, A. F. (2015). Impacto de la regulación en la eficiencia asignativa del mercado spot eléctrico colombiano. *Docuementos de Trabajo Economía y Finanzas*, 15, 1–34.
- Gaviria, J. C. (2018). *Pronóstico de precios diarios de electricidad: Regresiones dinámicas con variables explicativas de mercados hidrotérmicos*. Universidad Nacional de Colombia Facultad.
- Gugler, K., Haxhimusa, A., & Liebensteiner, M. (2020). *Carbon Pricing and Emissions: Causal Effects of Britain's Carbon Tax*. 1–34.
- Hausman, C., & Rapson, D. S. (2018). Regression Discontinuity in Time: Considerations for Empirical Applications Catherine. *Annual Review OfResource Economics*, May, 1–20.
- Hindriks, J., & Serse, V. (2022). The incidence of VAT reforms in electricity markets: Evidence from Belgium. *International Journal of Industrial Organization*, 80, 102809. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2021.102809>
- Jin, J., Wang, Y., & Zheng, X. (2021). District heating versus self-heating: Estimation of energy efficiency gap using regression discontinuity design. *China Economic Quarterlyly International*, 1(3), 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.ceqi.2021.08.003>
- Joskow, Paul L; Sloan, A. P. (2010). Market imperfections versus regulatory imperfections. *CESifo DICE Report*, 8(3), 1–7.
- Joskow, P. L. (2011). Incentive Regulation in Theory and Practice: Electricity Distribution and Transmission Networks. *SSRN Electronic Journal*, March 2006. <https://doi.org/10.2139/ssrn.848325>
- Joskow, P. L. (2020). Transmission Capacity Expansion Is Needed to Decarbonize the Electricity Sector Efficiently. *Joule*, 4(1), 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.011>
- Juvinao, J. C. (2021). Lessons from the implementation of the reliability payment mechanism in Colombia as an incentive for electricity generation. *Desarrollo y Sociedad*, 2021(87), 113–148. <https://doi.org/10.13043/DYS.87.4>
- Khandker, S. R., Kooleal, G. B., & Samad, H. A. (2010). *Handbook on impact evaluation quantitative methods and practices* (T. I. B. for R. and D. / T. W. Bank (ed.)).
- Lang, C., & Siler, M. (2013). Engineering estimates versus impact evaluation of energy efficiency

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

- projects: Regression discontinuity evidence from a case study. *Energy Policy*, 61(October 2009), 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.122>
- Leccese, M. (2021). Disruptive Competition and the Cost of Leveling the Playing Field: Evidence from the Taxi Industry. *SSRN Electronic Journal*, 1–67. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3824453>
- Leroutier, M. (2022). Carbon pricing and power sector decarbonization: Evidence from the UK. *Journal of Environmental Economics and Management*, 111(July 2021), 102580. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102580>
- Liu, X., Fang, Y., & Ye, Q. (n.d.). *Differential Effects of the COVID-19 Pandemic on Crowdfunding Project Performance: Role of Project Design Features*.
- Lou, J., Qiu, Y. (Lucy), Ku, A. L., Nock, D., & Xing, B. (2021). Inequitable and heterogeneous impacts on electricity consumption from COVID-19 mitigation measures. *IScience*, 24(11). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103231>
- Luo, D., & Zhou, W. (2020). *The Development of Regression Discontinuity Design and its Application in the Financial Field*. 146(Isbcd 2019), 370–373. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.200708.071>
- McDowall, D., McCleary, R., & Bartos, B. J. (2019). Interrupted Time-Series Analysis. In *Oxford university press* (Vol. 1, Issue 1). <https://doi.org/10.2307/3324157>
- Moraffah, R., Sheth, P., Karami, M., Bhattacharya, A., Wang, Q., Tahir, A., Raglin, A., & Liu, H. (2021). Causal inference for time series analysis: problems, methods and evaluation. *Knowledge and Information Systems*, 63(12), 3041–3085. <https://doi.org/10.1007/s10115-021-01621-0>
- Nataraj, S., & Hanemann, W. M. (2011). Does marginal price matter? A regression discontinuity approach to estimating water demand. *Journal of Environmental Economics and Management*, 61(2), 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2010.06.003>
- Olarte Gómez, L. P. (2017). *Análisis del comportamiento de los precios de oferta de energía eléctrica en Colombia del año 2000 al 2016* [Universidad Nacional de Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/64462/1/1098625489.2017.pdf>
- Poveda, M. (2012). *Modelamiento del precio de bolsa incluyendo costos de arranque y parada en el Mercado Eléctrico Colombiano*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ruan, J., Cai, Q., & Jin, S. (2021). Impact of COVID-19 and Nationwide Lockdowns on Vegetable Prices: Evidence from Wholesale Markets in China. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(5), 1574–1594. <https://doi.org/10.1111/ajae.12211>
- Sáenz de Miera, G., del Río González, P., & Vizcaíno, I. (2008). Analysing the impact of renewable electricity support schemes on power prices: The case of wind electricity in Spain. *Energy Policy*, 36(9), 3345–3359. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.022>
- Shen, X., Qiu, Y., Luo, L., & Zheng, X. (2021). The impacts of special environmental events on short-run electricity-saving behaviors. *Environmental Research Letters*, 16(9).

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1629>

- Toro Restrepo, D. (2015). *Descripción e influencia de las variables hidrológicas en la determinación del precio spot de la energía eléctrica en Colombia*. UNIVERSIDAD EAFIT.
- Trespalacios, A., Pantoja, J. O., & Fernández, Ó. A. (2017). *Análisis de mercados de electricidad* (C. Cadavid (ed.)). Editorial Eafit.
- Yang, M., Yuan, Y., & Sun, C. (2021). The economic impacts of China's differential electricity pricing policy: Evidence from energy-intensive firms in Hunan Province. *Energy Economics*, 94, 105088. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105088>
- Yudhistira, M. H., Sastiono, P., & Meliyawati, M. (2020). Exploiting unanticipated change in block rate pricing for water demand elasticities estimation: Evidence from Indonesian suburban area. *Water Resources and Economics*, 32, 100161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wre.2020.100161>
- Zeng, J., & Wang, C. (2022). Temporal characteristics and spatial heterogeneity of air quality changes due to the COVID-19 lockdown in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 181(December 2021), 106223. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106223>
- Zhang, J., Li, H., Lei, M., & Zhang, L. (2021). The impact of the COVID-19 outbreak on the air quality in China: Evidence from a quasi-natural experiment. *Journal of Cleaner Production*, January, 1–13.
- Zhang, Z., Cai, W., & Feng, X. (2017). How do urban households in China respond to increasing block pricing in electricity? Evidence from a fuzzy regression discontinuity approach. *Energy Policy*, 105(May 2016), 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.025>
- Zhou, Y., Ma, R., Su, Y., & Wu, L. (2019). Too big to change: How heterogeneous firms respond to time-of-use electricity price. *China Economic Review*, 58(August), 101342. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2019.101342>
- Zou, H., Luan, B., Zheng, X., & Huang, J. (2020). The effect of increasing block pricing on urban households' electricity consumption: Evidence from difference-in-differences models. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120498>

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Anexos

Anexo 1. Agregaciones sobre el precio de bolsa

- Promedio aritmético mensual: promedio incluyendo los valores para cada periodo de todos los días del mes
- Promedio aritmético diario y luego mensual: promedio de los 24 periodos del día y luego promedio de los días del mes.
- Mediana mensual: mediana de los valores para cada periodo de todos los días del mes
- Mediana diaria y luego mensual: mediana de los 24 periodos del día y luego mediana de los días del mes.
- Promedio ponderado mensual con la generación real

Anexo 2. Eventos exógenos en el precio de bolsa

Tabla 13

Eventos exógenos *en Precio de bolsa.*

Evento	Fecha	Duración	Media	Mediana	Desv. Est.
No eventos	2000-01	12	3.789	3.774	0.156
Expectativa Res. CREG	2001-01	4	4.294	4.257	0.110
Estabilización expectativa	2001-05	17	3.772	3.762	0.139
Niño	2002-10	47	4.194	4.213	0.147
Res. CREG 071/06	2006-09	28	4.453	4.444	0.175
Expectativa CREG 06/09	2009-01	8	4.769	4.819	0.129
Niño	2009-09	9	5.177	5.247	0.118
Niña	2010-06	26	4.354	4.375	0.267
No eventos	2012-08	20	5.151	5.156	0.169
Expectativa niño (Riesgo de	2014-04	3	5.894	5.924	0.071
Anuncio El Niño	2014-07	14	5.242	5.223	0.122
Condición escasez	2015-09	8	6.443	6.458	0.370
Fin condición escasez	2016-05	7	5.081	5.116	0.151
Aumento de embalses	2016-12	24	4.649	4.661	0.259
Disminución de embalses	2018-12	5	5.488	5.572	0.223
Aumento de embalses	2019-05	5	5.066	4.992	0.366
Res. CREG 060/19	2019-10	10	5.682	5.752	0.279

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Res. CREG 044/20	2020-08	9	5.185	5.111	0.176
Expectativa altos niveles de embalse	2021-05	7	4.592	4.610	0.070
Expectativa niño	2021-12	6	5.742	5.742	0.103

Anexo 3. Análisis de las covariables

En la **Figura 10** y **Figura 11** se presentan las covariables con la marca del evento de la Resolución CREG071/2006. Es relevante resaltar que estas covariables no presentan discontinuidad en la fecha de aplicación de la resolución de estudio, por tanto, cumple la restricción de RD que se expone en la sección de identificación. En la **Tabla 14** se presentan estadísticos descriptivos del precio de bolsa y las covariables utilizadas en el presente trabajo sin transformaciones. Se puede ver una diferencia entre ambos periodos en las variables que presentan tendencia como la demanda, costo de combustible y disponibilidad declarada.

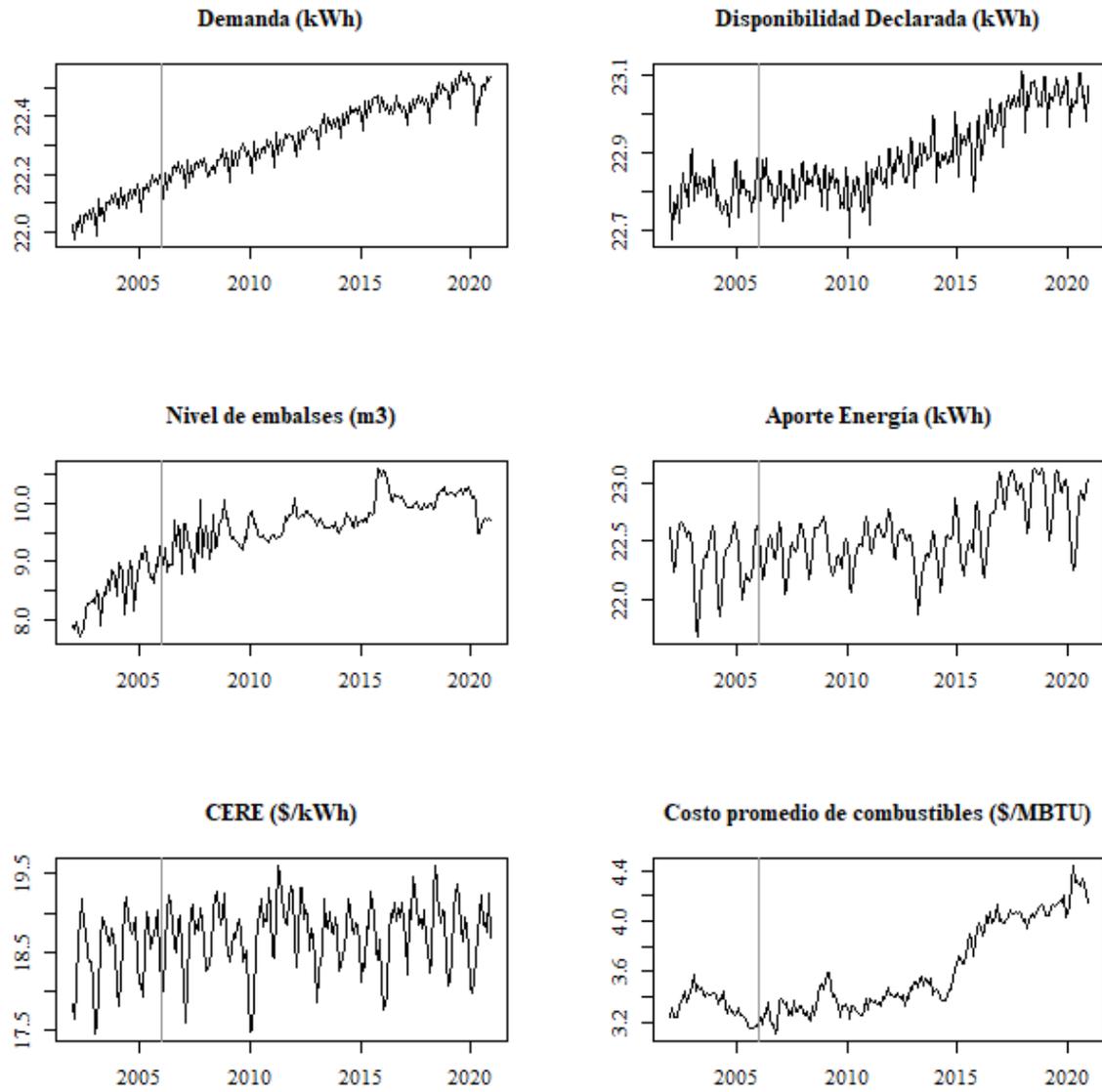
Inicialmente se realiza un análisis exploratorio, se realiza la prueba Box Cox para estabilización de varianza, con estos resultados se define realizar una transformación lineal logarítmica de las series. Se realiza la visualización del ACF y PACF, de donde se identifican series no estacionarias y se utilizan pruebas ADF para raíces unitarias y pruebas Hegy para raíces estacionales, los resultados de estas pruebas se presentan en el **Anexo 4**.

Para realizar el ajuste estacional de las series se utiliza una librería del programa Census X13 – Arima en R. Las series transformadas se exponen en la **Figura 12** y **Figura 13**. Posterior, se presenta en la **Figura 14** una matriz de correlación entre las variables principales para la aplicación de RDiT, en la ventana de evaluación de la política. En donde se identifica que el precio de bolsa tiene correlación positiva con el costo de combustibles y correlación negativa con el aumento de disponibilidad, nivel de embalses y aportes.

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 10

Covariables energía entre 2000-01 hasta 2022-01.



Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 11

Covariantes clima entre 2000-01 hasta 2022-01

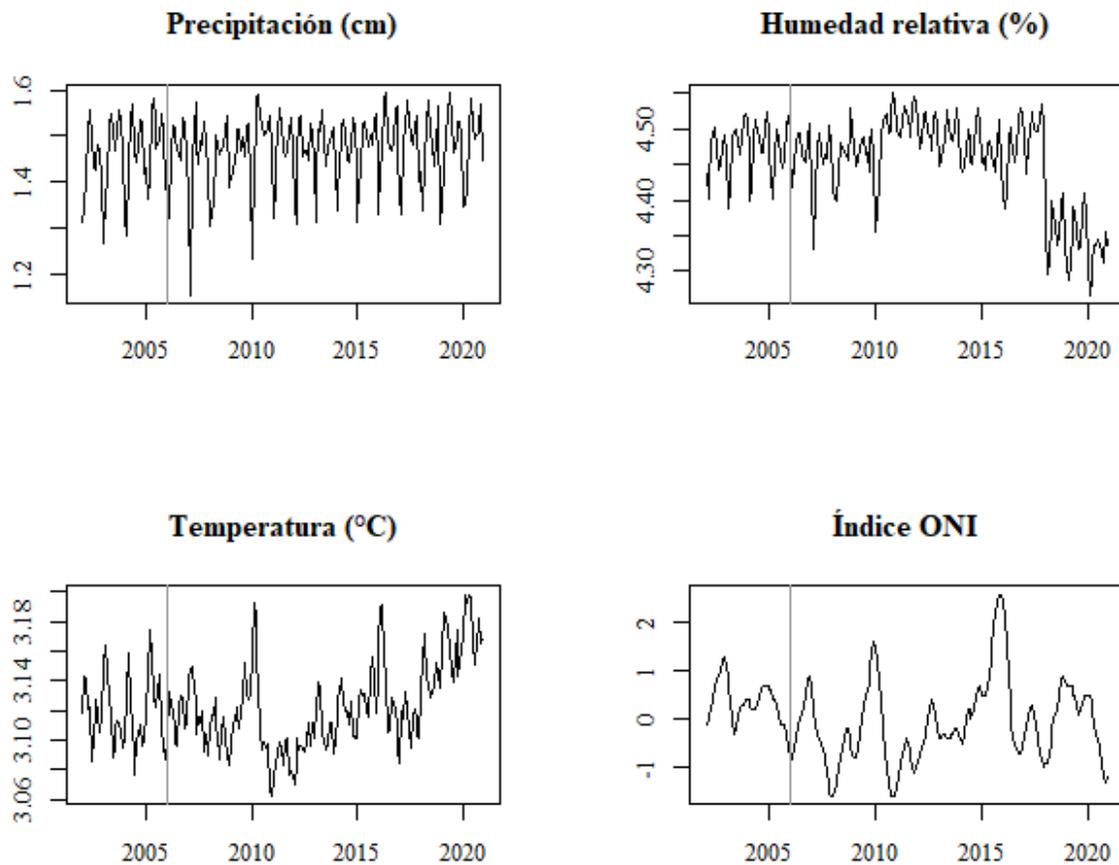


Tabla 14

Estadísticos descriptivos precio de bolsa y covariantes.

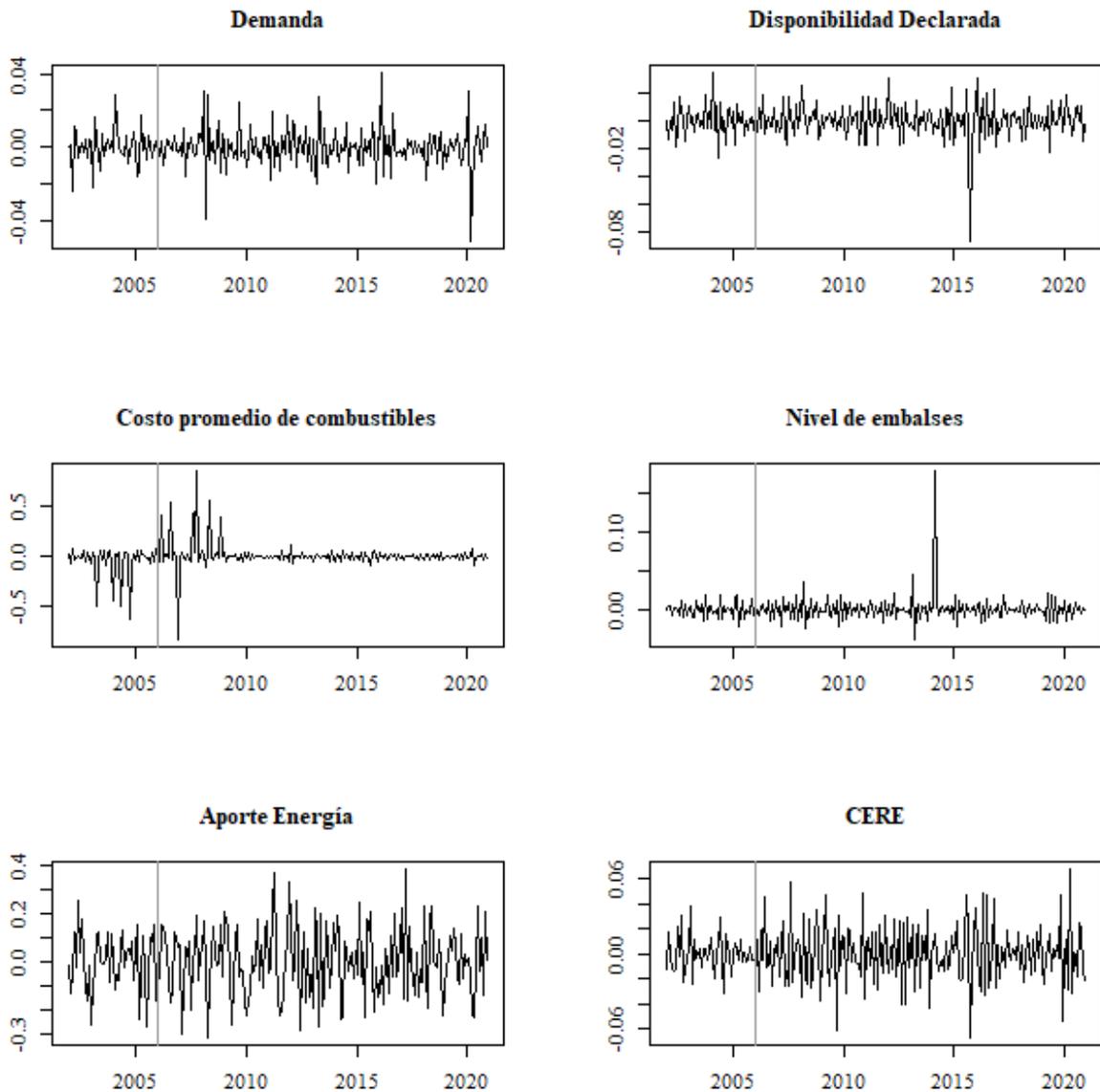
Variable	Promedio ventana	Promedio antes de evento	Promedio después de evento	Mínimo	Máximo
Precio bolsa (\$/kWh)	74.50	66.96	87.16	51.35	130.51
Demanda (GWh)	4238.23	4081.64	4501.07	3534.38	4775.72
Disponibilidad declarada (GWh)	8096.75	8089.04	8109.69	7282.75	8908.48
Nivel embalses (Mm3)	5349.31	5123.25	5728.78	2596.60	7301.25
Aportes energía (GWh)	131.64	124.19	144.15	37.86	235.23
CERE (\$/kWh)	27.83	27.99	27.56	22.35	35.84
Costo combustibles (\$/MBTU)	9047.86	6700.50	12988.08	2708.08	23274.45

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Precipitación	4.32	4.35	4.29	3.18	4.86
Humedad	87.29	87.60	86.77	76.00	92.76
Temperatura (°C)	22.56	22.59	22.50	21.67	23.90
Índice ONI	-0.04	0.22	-0.48	-1.60	1.30

Figura 12.

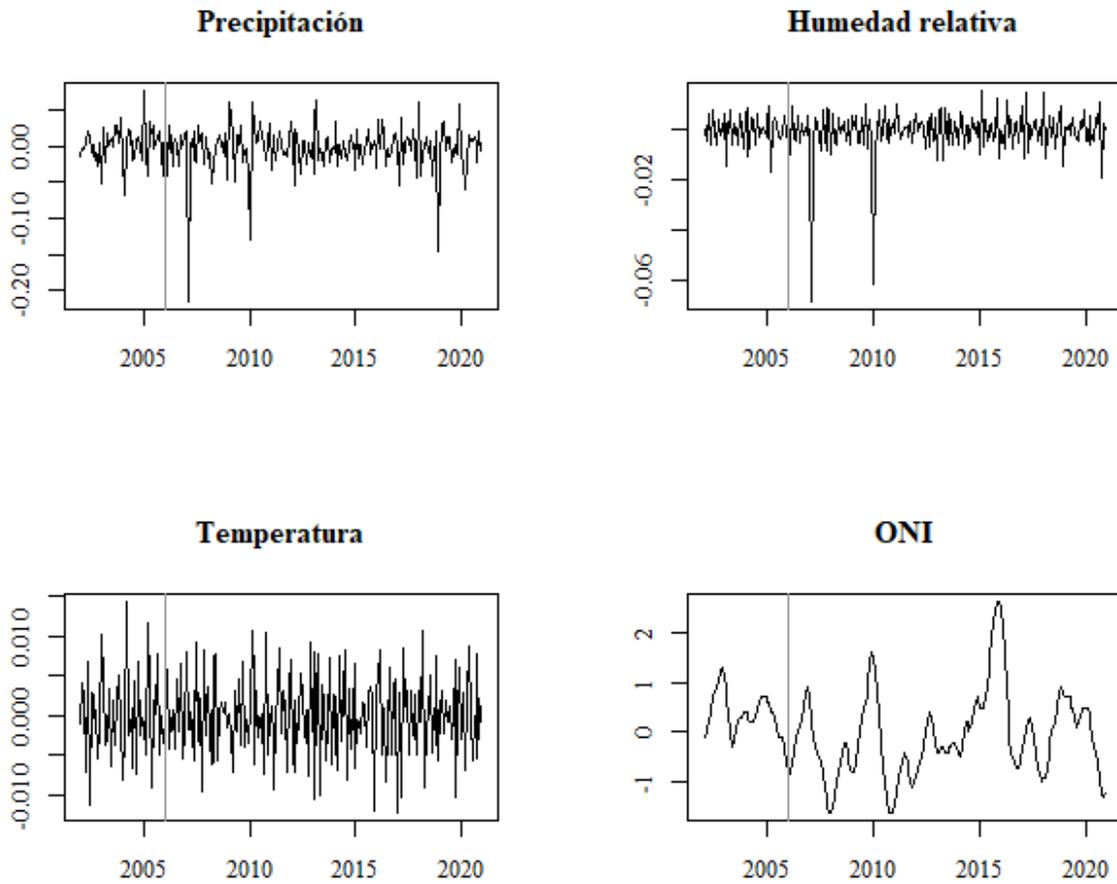
Covariables energía entre 2000-01 hasta 2022-01 transformadas



Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 13.

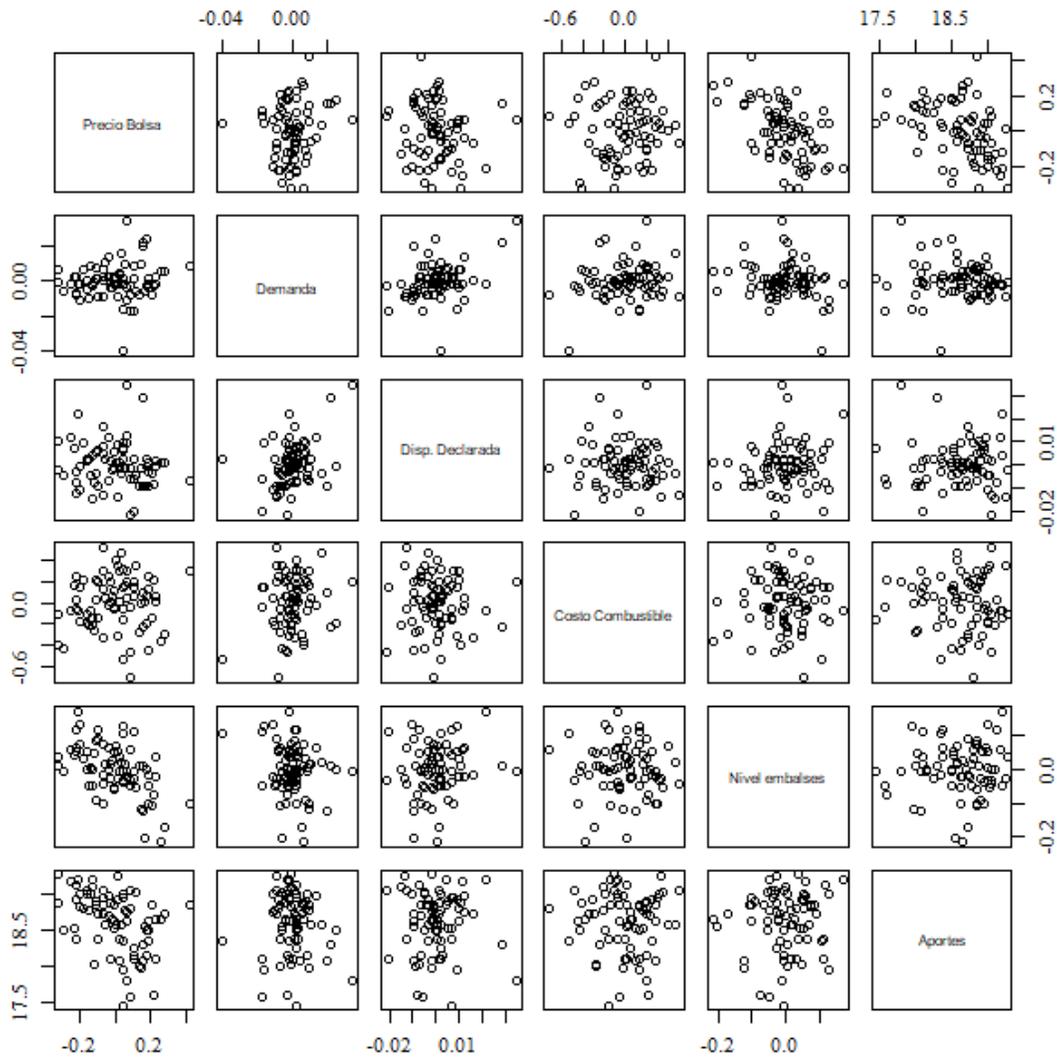
Covariables clima entre 2000-01 hasta 2022-01 transformadas



Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 14.

Matriz correlación variables principales.



Anexo 4. Pruebas y transformación de covariables

Tabla 15

Pruebas y transformación de covariables

Variable	Prueba Hegy	Census X13	ADF posterior transformación
Demanda	Raíz unitaria no estacional	Estacional anual	-14.0285

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

	Tendencia	Tendencia	
Disponibilidad declarada	Raíz unitaria no estacional Tendencia	Estacional anual Tendencia	-13.0532
Costos de combustibles	Raíz unitaria no estacional Tendencia	Estacional anual Tendencia	-10.2448
Nivel embalses	Raíz unitaria no estacional Tendencia	Estacional anual Tendencia	-11.6437
Aportes	Tendencia	Estacional anual Tendencia	-10.9508
CERE	Raíz unitaria no estacional Tendencia	Estacional anual Tendencia	-16.1342
Precipitación	Tendencia	Estacional anual Tendencia	-12.4249
Humedad	Raíz unitaria no estacional Tendencia	Estacional anual Tendencia	-12.4618
Temperatura	Raíz unitaria no estacional Tendencia	Estacional anual Tendencia	-15.77
Índice ONI	NA	NA	-5.9374

Anexo 5. Resumen comparación entre el marco RD cross-section y RDiT (Hausman & Rapson, 2018)

- Interpretación; en RD es claro que se identifica un efecto local alrededor de un umbral que permite aleatorización. Sin embargo, en RDiT la discontinuidad concuerda con el punto de corte, pero la aleatorización no es tan clara debido a que el tiempo no es una variable que se pueda controlar, por lo tanto, se debe analizar

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

con detenimiento cada caso. En el caso de la aplicación del presente trabajo, se identifica que la determinación del umbral es exógena para los agentes del mercado por que se determinó por una entidad externa (CREG).

- Como el tamaño de muestra puede crecer, en RD se identifica con N dimensiones, permitiendo aumentar la muestra con los individuos conservando un ancho de banda pequeño alrededor del punto de corte. Sin embargo, en RDiT se identifica el aumento de muestra con variación en la dimensión t, donde no es posible amentar la muestra porque al alejarse significativamente del umbral se puede incurrir en posible sesgo debido a que las observaciones están muy alejadas entre sí.
- La necesidad de incluir variables de control adicionales. En RD se requieren pocas variables de control. En RDiT las correlaciones inobservables con la variable de salida pueden tener impactos discontinuos en la salida potencial.

Anexo 6. Pruebas sobre residuales de estimación RDiT

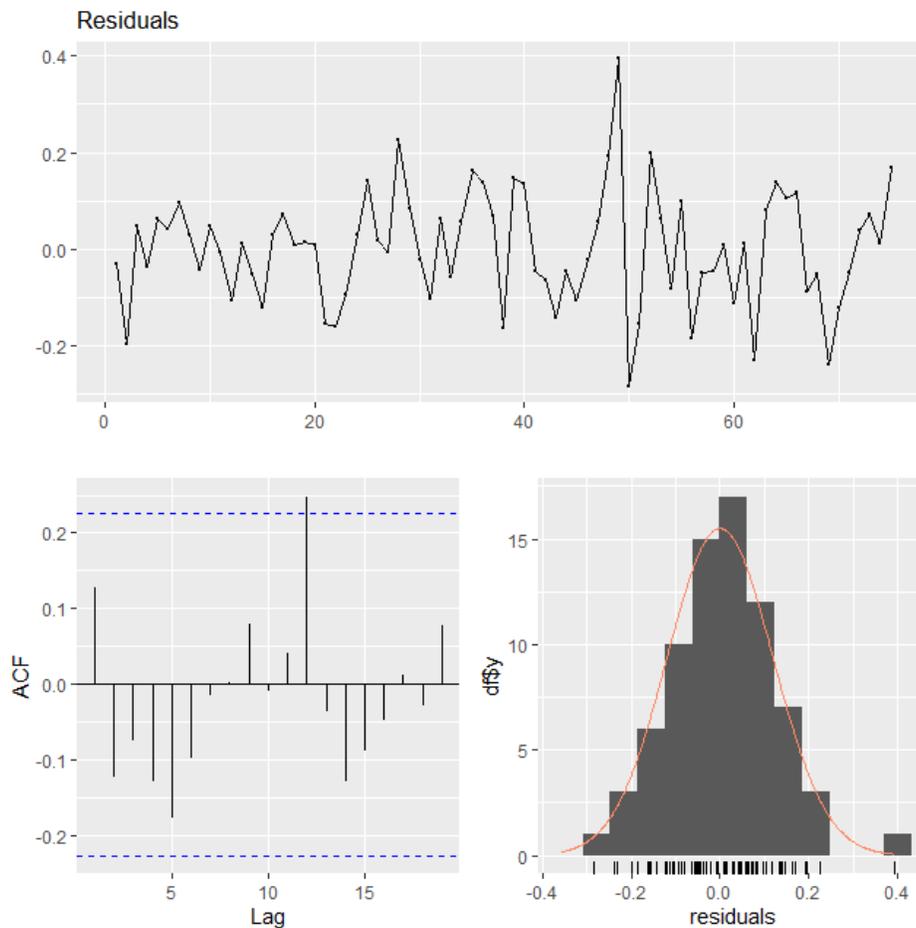
Tabla 16

Pruebas sobre residuales de estimación RDiT

Prueba	Estadístico	P-Valor	Resultado
Jarque Bera	1.6606	0.4359	No se rechaza Normalidad
Box-Ljung	17.817	0.5347	No se rechaza independencia

Figura 15

Pruebas sobre residuales de estimación RDiT

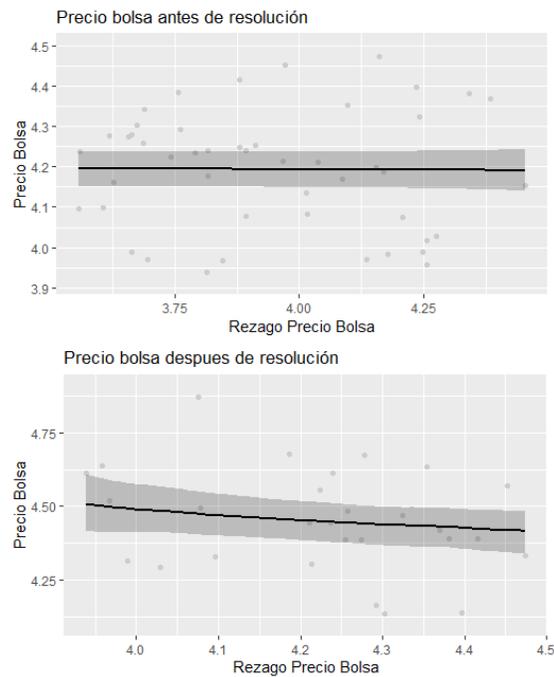


Anexo 7. Detalle prueba de robustez no paramétrica

Para esta estimación se utiliza como variable explicativa únicamente el rezago del precio de bolsa considerando que es una variable representativa como se puede ver en la sección de resultados anteriores y subsecciones de pruebas de robustez. Las gráficas obtenidas a ambos lados del umbral se presentan en la **Figura 16**, donde en el Panel A presenta la estimación sin tratamiento es decir antes de la aplicación de la norma y en el Panel B la estimación posterior al inicio de la resolución, ambas se estiman usando un kernel Epanechnikov. Asimismo, se realiza una prueba con kernel Gaussiano y Triangular con lo cual se obtiene que el efecto de la aplicación de la norma es 0.23, 0.24 y 0.22 respectivamente (Epanechnikov, Gaussiano, triangular).

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

Figura 16
Estimación no paramétrica.



Nota: En el Panel A se presenta la estimación antes del tratamiento y en el Panel B después del tratamiento.

Asimismo, se realiza una prueba con diferentes anchos de banda manteniendo fijo el kernel Epanechnikov, estos resultados se presentan en la **Tabla 17**

Tabla 17
Estimación no paramétrica con cambio de ancho de banda

Ancho de banda Sin tratamiento	Ancho de banda Con tratamiento	Efecto de tratamiento
0.17	0.38	0.236
0.15	0.43	0.272
0.15	0.37	0.329

Anexo 8. Pruebas ITSA

Se realiza una prueba aplicando interrupción de series de tiempo con la función `itsa.model` en R, en donde se realiza una prueba tipo ANCOVA con la variable dependiente rezagada y con la cual se realiza una comparación entre las medias de los periodos tratado y no tratado (English,

Impacto de la regulación en el precio de bolsa de la energía eléctrica: Caso para el Cargo por confiabilidad en Colombia

2019). Adicionalmente, se estima un modelo Bootstrap con 1000 repeticiones. Los resultados se presentan en la **Tabla 18** en donde se puede ver que hay una diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios de tratados y no tratados y que este efecto es robusto a aplicar varias muestras de los datos para la estimación.

Tabla 18
Estimación itsa.model

Parámetro	Sum-Sq	Grado de libertad	F-Value	P-Value
Variable interrupción	0.259	1	12.561	0.0007
Rezago Variable dependiente	0.341	1	16.530	0.0001
Residuales	1.463	71		
	Lower 95%	Upper 95%	Mean F-Value	P-Value
Bootstrap Results	3.6405	29.844	12.852	1e-07
Diferencia antes y después de la interrupción	0.1815107	0.3327511		0

Tabla 19
Pruebas ITSA

Prueba	P-Valor	Resultado
Shapiro.test	0.3281	No se rechaza Normalidad
Levenes.test	0.4484	No se rechaza independencia
Autcorr		No autocorrelation evidence