



UNIVERSIDAD DEL ROSARIO

Facultad de Economía

El efecto de la deforestación en la generación de energía hidroeléctrica:
Evidencias en el territorio colombiano

Jorge Enrique Rojas Sánchez

Dirigido por: Ph.D Santiago Saavedra Pineda

Tesis de Maestría en Economía

2019

Resumen

Colombia es particular para el análisis de generación eléctrica: más del 65% de la electricidad generada proviene de plantas hidroeléctricas. Sin embargo, este alto potencial se ve afectado por la deforestación; esta ha generado un efecto perjudicial para el recurso hídrico. El objetivo de esta investigación es estimar el efecto de la deforestación en la generación de energía hidroeléctrica utilizando modelos de efectos fijos y no paramétricos con un panel de datos de 60 hidroeléctricas en territorio colombiano, entre los años 2000 y 2015. Se encuentra que la deforestación disminuye los ingresos de algunas hidroeléctricas que representa una pérdida del 2.5% de la capacidad instalada que corresponde a 132 GW o 15 mil millones COP equivalentes a 3 millones de COP por hectárea deforestada.

Palabras Claves: Servicios ecosistémicos, Regulación hídrica, Generación de energía eléctrica, Deforestación, Hidroeléctrica.

Abstract

Colombia is particular for the analysis of electricity generation: more than 65% of the electricity generated comes from hydroelectric plants. However, this high potential is affected by deforestation; this has generated a detrimental effect for the water resource. The objective of this research is to estimate the effect of deforestation on the generation of hydroelectric energy using fixed and non-parametric effects models with a data panel of 60 hydropower plants in Colombian territory, between 2000 and 2015. It is found that deforestation decreases the income of some hydroelectric plants, which represents a loss of 2.5% of the installed capacity corresponding to 132 GW or 15,000 millions COP equivalent to 1 million COP per hectare deforested.

Keywords: Ecosystem services, Water regulation, Electric power generation, Deforestation, hydroelectric.

Introducción

Las hidroeléctricas se definen como “una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, para transformarlas en energía eléctrica” (Unidad de Planeación Minero Energetica 2016, 26). El aprovechamiento de estas instalaciones dependerá de la cantidad de agua que fluya por los ríos, siendo este un insumo necesario y no sustituible para la su producción de energía eléctrica. El agua superficial que circula en los ríos depende de la relación entre los bosques y la precipitación, por lo que los efectos en los cambios en la cobertura deberán generar a su vez efectos en la producción eléctrica.

El bosque y el agua también tienen una dependencia, por lo que los cambios en la cobertura afectan algunas características de este recurso. Este documento cuantifica la relación entre el cambio en la cobertura boscosa y la generación de energía hidroeléctrica, entendiendo que entre estos dos elementos se encuentra el agua.

Los bosques prestan diferentes tipos de servicios ecosistémicos, los cuales se definen como los beneficios que recibimos los humanos debido a las funciones y procesos que realizan los ecosistemas (Costanza, et al. 1997), dos beneficios particularmente importantes para la generación de energía hidroeléctrica son: *la regulación hídrica y la retención de sedimentos*.

La regulación hídrica hace referencia a la función -en los bosques- de reducir los efectos del caudal máximo y retrasar los caudales mínimos de los ríos (Hamilton, et al. 2009). Es decir que después de un evento pluviométrico -lluvia- la interacción de los bosques con el agua generará una demora en la transición del líquido desde el bosque hasta el caudal del río. Lo que implica reducir los caudales máximos, pero adicionalmente en época seca el bosque liberará agua al caudal, aun cuando la temporada no aporte agua al río, lo que se conoce como retraso de los caudales mínimos.

La retención de sedimentos es una función del bosque que consiste en impedir el desprendimiento de partículas de la masa del suelo (Morgan 1997). Las raíces y la capa vegetal evitan el desprendimiento de masas del suelo, lo que a su vez impide que estas se trasladen al cauce de los ríos. Debido a la pérdida de bosques, las funciones y procesos de los ecosistemas, tales como la regulación hídrica y la retención de sedimentos se ven alterados, lo que conlleva al cambio de caudales y a el aumento de partículas de masa en los ríos.

En el caso colombiano la pérdida de bosques entre los años 2000 y 2015 fue particular, ya que esta alcanza las 231 mil hectáreas por año, lo que corresponde a un poco menos de 4 millones de hectáreas en un periodo de 16 años, según la información reportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM,

en informes de tasas de deforestación (2019). La distribución entre los periodos no es homogénea; entre los años 2000 y 2005 se evidenció el mayor nivel de deforestación en la historia de Colombia, la cual fue de 315 mil hectáreas por año, desde el 2005 hasta el 2015 se reportaron disminuciones en los niveles de deforestación, con un mínimo de 124 mil hectáreas por año. Para los años 2016 y 2017 la deforestación ha tenido una tendencia creciente con 178 mil hectáreas y 219 mil hectáreas por año respectivamente¹. Los pronósticos generados por el IDEAM (González, et al. 2011) indican que se perderán 3 millones de hectáreas adicionales de bosque para el año 2030 en el territorio colombiano. Este pronóstico evidencia que existe una tendencia a deforestar el territorio, que implica que a su vez afectará la generación de energía eléctrica.

Los efectos de los cambios en coberturas boscosas se asocian a impactos a diferentes escalas. Localmente, influyen en la pérdida y degradación de suelos, cambios en el microclima, aumento en la sedimentación y diversidad de especies. A escala regional, afectan los procesos y funciones de cuencas hidrológicas.

Los cambios en las coberturas ubicadas en las cuencas hidrográficas que aportan recurso hídrico a las hidroeléctricas en Colombia impactan los servicios ecosistémicos, en particular la regulación hídrica y la retención de sedimentos. Bajo este escenario se considera importante estimar los efectos totales del cambio en la cobertura boscosa ya que se supone que la producción de energía hidroeléctrica disminuirá. Para ello la intención de esta investigación es cuantificar los efectos totales de los cambios de coberturas en la producción de energía hidroeléctrica en Colombia.

Alcance de la investigación

La investigación cuantifica los efectos del cambio de la cobertura boscosa en la producción de energía hidroeléctrica generada en el territorio colombiano para los periodos comprendidos entre los años 2000 y 2015.

Marco Conceptual

La palabra hidroeléctrica esta conformada por dos lexemas: hidro y eléctrica que dan cuenta de una relación entre el agua y la producción eléctrica; esta unión se presenta

¹ Información calculada por el autor a partir de la hoja de calculo. Tasa anual de deforestación según departamento. Resultados consolidados entre 1990-2017. Proporcionada por el IDEAM, Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/648879/4.03+D+Tasa+deforestacion+Dptos.xlsx/304987a5-cdec-49ff-9e26-2062f4e22acf>

como una obra de ingeniería que aprovecha la energía potencial del agua para transformarla en un flujo energía eléctrica.

Sin embargo, esta relación no incluye al bosque aun cuando existen procesos y funciones entre el agua y la cobertura boscosa que afectan directa e indirectamente a la producción eléctrica. Existen, al menos, dos relaciones que se deben identificar como beneficiosas para la generación eléctrica: la regulación hídrica y la retención de sedimentos (Locatelli, et al. 2011). La regulación hace referencia a la capacidad del bosque de regular caudales, es decir “influir sobre las lluvias en el ciclo hidrológico, atenuando los eventos máximos de caudal y propiciando unos caudales mayores a los mínimos que se presentarían sin la acción de estos tipos de bosque” (García 2007). Por otra parte, la retención de sedimentos representa la capacidad de disminuir o evitar la deposición de sedimentos en los cuerpos hídricos (López 1994).

A continuación, se explica la relación de los bosques con el agua; posteriormente, se definen las principales tecnologías hidroeléctricas que existen y el mercado en el cual ofrecen su producción, para finalmente referenciar los documentos que relacionan los servicios ecosistémicos con la generación de energía eléctrica.

El bosque y el agua

Los bosques no son fábricas de agua, no todos generan una mayor oferta del recurso hídrico, ni existe evidencia concluyente que indique que los bosques puedan prevenir grandes inundaciones. En cambio, los bosques sí contribuyen a reducir los caudales máximos y retrasan los caudales mínimos, lo que se conoce como regulación hídrica (Hamilton, et al. 2009).

La capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios se deriva directamente de la operación de ciclos naturales que en algunos casos se han modificado significativamente (MEA 2005). En particular la regulación hídrica es el resultado de la interacción entre la vegetación y la precipitación. Dicha interacción se ve afectada por el cambio en la cobertura, lo cual afecta a su vez los beneficios económicos que percibimos (Costanza, et al. 1997).

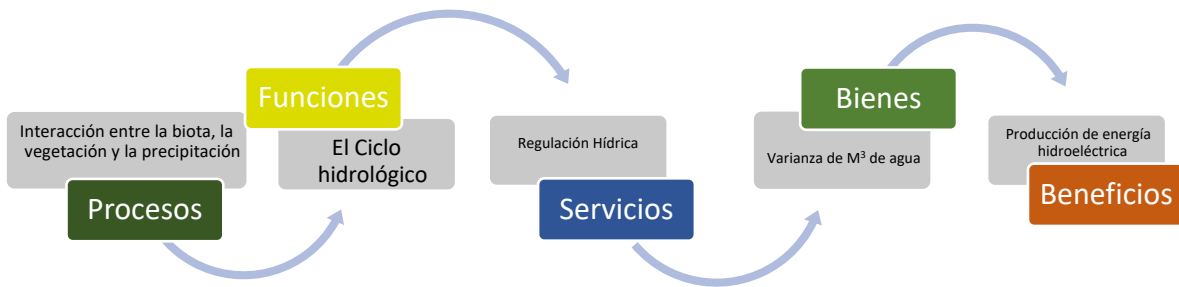


Figura 1: Causalidad entre cambios de cobertura y producción de energía hidroeléctrica. Tomado y adaptado de: (Terrado 2016)

Nota: Los procesos, funciones, servicios ecosistémicos, bienes ecosistémicos y beneficios ecosistémicos.

Si, por ejemplo, midiéramos el caudal de dos ríos en idénticas condiciones exceptuando la deforestación, encontraríamos que aquel con menor cobertura boscosa tendrá un mayor caudal y sedimentación en época de altas lluvias, mientras que, en aquel con una buena conservación boscosa, su caudal sería atenuado y menos desviado de su media, lo que gráficamente se presenta en la Figura 2.



Figura 2: La regulación hídrica y su relación con el caudal m^3/s . Elaboración propia.

Nota: Como puede observarse la regulación hídrica genera una disminución en el promedio del caudal, reduciendo la desviación sobre la media.

Los cambios en la cobertura boscosa exponen al suelo, lo que contribuye a la deposición de sedimentación en los cauces del río ante un evento pluviométrico; a una mayor cobertura boscosa la cantidad de sedimentación disminuye aumentando la calidad del agua.

La menor cantidad de sedimentación contribuye a la disminución de costos de las plantas hidroeléctricas por dos principales motivos, el primero es aumentar la capacidad efectiva de agua en las represas, ya que las zonas inundables tendrán una mayor capacidad entre menor sedimentación exista. La segunda es el deterioro de las turbinas, las cuales tienen un mayor desgaste operativo debido al material que pasas por sus turbinas.

Las hidroeléctricas

Los datos incluyen dos tipos de hidroeléctricas, las de **filo de agua** y las de **presa**. Las primeras son aquellas que desarrollan potencia de generación de acuerdo con el caudal que proporciona el río, lo que quiere decir que altos caudales contribuyen a generar su potencia máxima; mientras que caudales bajos harán disminuir la potencia de generación, incluso al nivel de nula producción.

Cada proyecto hidroeléctrico debe determinar que tipo de tecnología se utilizará (a filo de agua o con presa) para lo cual los diseñadores capturan la información hidrológica de la cuenca. Se identifica las siguientes variables ambientales y geográficas: el caudal medio de la cuenca, la posible zona inundable donde se ubicaría la represa y el tipo de suelo. A partir de la evaluación de estas variables se determinan parámetros de diseño como: el tipo de turbina, el salto y el caudal ambiental. Finalmente se estiman los costos de construcción e instalación y la eficiencia de la planta (Hernández and Carvajal-Serna 2017).

Nótese que algunos parámetros no suelen variar en el tiempo, tal como la condición geográfica e hídrica. Razón por la cual no suelen existir transformaciones o actualizaciones de una tecnología a la otra. Las variables determinantes de la tecnología dependerán de las características geográficas e hídricas del territorio.

El mercado de subastas en Colombia

La normatividad en materia de generación de energía cambio de esquema en los años 90. Pasando de un modelo de propiedad y gestión estatal a uno cuyo principio es el incentivar la participación privada, con el fin de estimular el libre mercado, la competitividad y la generación de un servicio más eficiente frente al anterior. (Santa, et al. 2009)

Adicionalmente se constituyo un mercado bajo el mecanismo de precio marginal, que busca minimizar el costo de generación necesaria para cubrir la demanda, este modelo recibe declaraciones de cantidades y costos de cada generador (una subasta *spot*). Es decir, se compra la energía de aquellos generadores cuyos costos sean menores para ese momento del tiempo. La demanda es enteramente suplida y se asume inelástica.

La operación es la siguiente, cada generador oferta el precio y cantidad que está dispuestos a vender y según la demanda se despacha la cantidad necesaria por orden de menor a mayor precio; hasta que se logre despachar toda la electricidad requerida. El precio de equilibrio corresponde al precio ofertado por la última unidad que se transmitió. Este precio se paga a todos los generadores que efectivamente despacharon.

A continuación, se presenta las variables principales que contiene cada oferta declaradas por los agentes:

Nombre: Recurso o unidad Identificador: Indica a que concepto de la oferta hace mención

P = Precio de oferta \$/MWh (dado para el recurso)

D = Disponibilidad MWh (dado para la unidad)

CONF = Configuración ofertada (dado para el recurso)

C = Combustible de la configuración ofertada (dado para el recurso)

Adaptado de (Expertos del Mercado S.A ESP 2019)

Las ofertas iniciales podrían depender de la estrategia óptima de cada agente dentro del mercado, buscando siempre su mayor beneficio. Sin embargo, Santa, et al en 2009 realizaron un análisis econométrico con el fin de identificar los determinantes del precio de este mercado, según los resultados del estudio se identifica que el precio esta explicado, en su mayoría, por el precio del dólar, el precio de los combustibles fósiles y el costo de oportunidad del agua. Adicionalmente, el mismo estudio identifico que al corto plazo las expectativas de los generadores determinan parte del precio de bolsa corriente. Estos hallazgos son importantes porque muestran un mercado competitivo.

Adicionalmente concluye que los precios responden a los cambios en las variables que afectan los costos de producción. Por lo tanto, se estima un mercado que funciona en libre competencia (Santa, et al. 2009).

Para fines de este documento se parte del supuesto que la producción de las hidroeléctricas tiene la siguiente estrategia.

Las hidroeléctricas con tecnología de presa generar energía a voluntad, por tanto, tienen una mayor capacidad estratégica en el mercado se subasta. Dentro de las ofertas iniciales pueden pedir altos precios, sabiendo que si no logran despachar energía sus

costos son relativamente bajos, ya que tienen la tecnología para acumular la energía en forma de agua para posteriormente utilizarla para generar energía eléctrica.

Ahora bien, las hidroeléctricas con tecnología a filo de agua no tienen la opción de acumular agua para turbinar posteriormente, estas se ven obligadas a vender la energía producida de acuerdo con el caudal que reciben por el cause del río, ya que el costo de no turbinar es bastante alto, ya que no generarían ingresos, por lo cual la regla de generación depende más de las variables ambientales y no de los precios de mercado para este tipo de tecnología.

Estas estrategias tienen coherencia con precios y cantidades ofertados por las hidroeléctricas. Donde se puede evidenciar que los precios de oferta suelen estar por debajo del promedio o inclusive en cero (\$0 Mw/h), lo que explicaría que son agentes tomadores de precios. Razón por la cual para este estudio se estima que las hidroeléctricas a filo de agua tiene como regla generar electricidad siempre y cuando el caudal lo permita.

El efecto de la deforestación en la producción de energía

En la Figura 3 se observa la diferencia entre una cuenca con deforestación (curva punteada) frente a una cuenca con buena cobertura boscosa (curva continua), al recibir un evento pluviométrico (lluvia). La curva continua muestra que el caudal promedio varía levemente frente a la media, lo que hace referencia a la regulación hídrica, sin embargo, ante cuencas deforestadas (curva punteada) se genera un pico en los eventos de abundantes precipitaciones, seguido por una pronunciada disminución del caudal, lo que hace referencia a la alta variabilidad en el mismo.

Las hidroeléctricas que tienen presa se caracterizan por tener infraestructura que embalsa el caudal del río en cuerpos de agua artificiales, o embalses; estas infraestructuras permiten regular la cantidad de agua que fluye por las turbinas, lo que implica que no dependen del nivel del caudal para desarrollar su potencia máxima. Si bien ambas hidroeléctricas se ven afectadas por la calidad y regulación hídrica, es claro que las que poseen presa tienen la capacidad de regular artificialmente el caudal y generar energía cuando la demanda lo requiera, mientras que las de filo de agua dependen de la regulación natural para desarrollar su potencia máxima. Este fenómeno natural es por tanto importante para la generación de energía eléctrica.

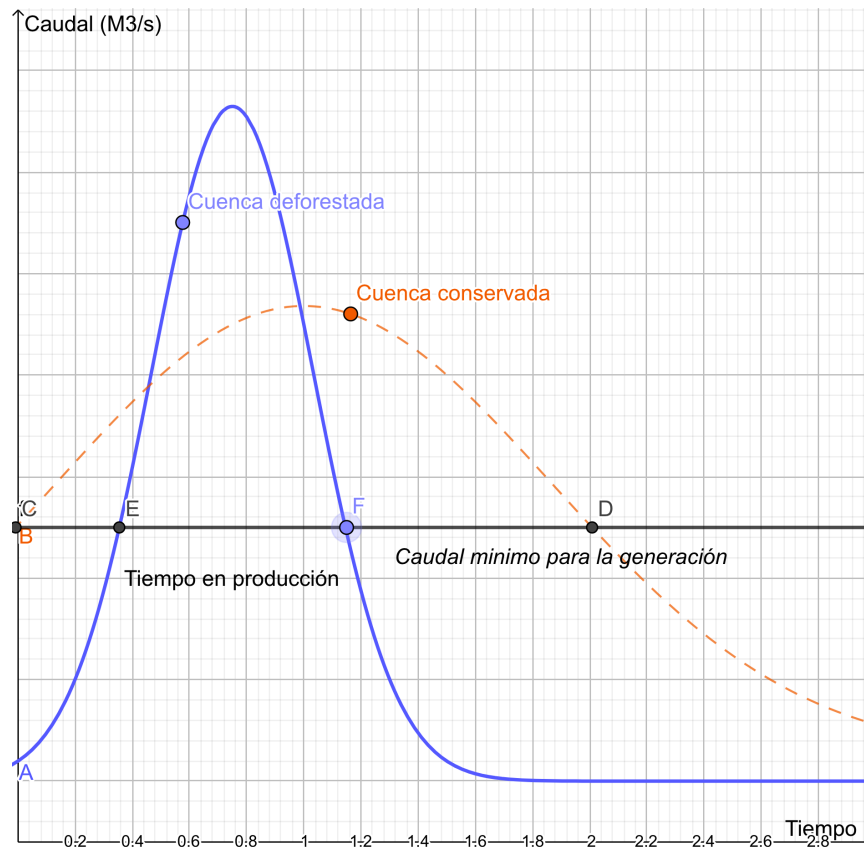


Figura 3 : La regulación hídrica y la generación eléctrica. Elaboración Propia.

Nota: La línea continua presenta una cuenca deforestada mientras la línea punteada una cuenca conservada. Como puede observarse la regulación hídrica genera un adicional en el tiempo el cual se puede ver reflejado en la producción de la hidroeléctrica.

Para el caso de las hidroeléctricas a filo de agua, la duración de producción aumenta siempre y cuando la cuenca provea suficiente caudal durante un mayor tiempo, logrando desarrollar una potencia de generación alta por un mayor periodo. En la Figura 3 se presenta un escenario que evidencia como la regulación hídrica contribuye a mantener la producción de un tiempo *C* a un tiempo *D*, frente al caso de una cuenca deforestada en la cual la producción es menor, de un tiempo *E* a un tiempo *F*.

Antecedentes

El efecto de los cambios de la cobertura boscosa, oferta hídrica, evotranspiración, se remontan al estudio experimental de (Bosch and Hewlett 1982) quienes generaron un análisis en diferentes cuencas hidrográficas a lo largo de un rango de tiempo, identificando los efectos del cambio en la vegetación en la provisión del servicio de regulación hídrica.

(Bosch and Hewlett 1982) generaron dos tipos de experimentos para determinar el efecto del cambio de cobertura en los caudales de algunos ríos en Norteamérica. El primero es una comparación entre cuencas hidrográficas y el segundo es una

tendencia temporal de cada cuenca, estos experimentos proporcionan evidencia circunstancial de la influencia del cambio de coberturas en el caudal. Los resultados indican que la cobertura de coníferas y eucaliptos aportan 40 milímetros (mm) adicionales al rendimiento hídrico ante un aumento de 10% de cobertura boscosa, mientras que otras coberturas tienden a generar entre 25mm y 10mm adicionales por un aumento del 10% en la cobertura (Bosch and Hewlett 1982). Adicionalmente del beneficio en el rendimiento, este es uno de los primeros análisis que evidencia la relación entre bosque-agua.

En los últimos años se han generado algunos estudios que relacionan directamente el efecto de la cobertura boscosa en la generación de energía hidroeléctrica. Hay similitudes importantes entre estos estudios, tanto (Locatelli, et al. 2011) como (Guo, Xiao y Li 2000) delimitan el área de estudio al territorio de la cuenca hidrográfica, esta delimitación a su vez se divide en los tipos de bosques que conforman dicha cuenca.

El alcance de (Locatelli, et al. 2011) es caracterizar los beneficios que perciben las hidroeléctricas a partir de cada tipo de cobertura boscosa, es decir, se priorizan los tipos de bosques que más generan beneficios a este sector, entendiendo que existen variados ecosistemas y bosques en cada cuenca. Mientras (Guo, Xiao y Li 2000) analizan la región de Xinguhan, China, a través del cálculo de beneficios adicionales que genera la regulación hídrica por la presencia del bosque. El modelo utilizado identifica la capacidad de retención hídrica de los diferentes tipos de bosque y de esta manera predice la cantidad de agua adicional que el bosque provee en época seca.

En ambos casos se concluye que la presencia de bosque genera un beneficio para la producción eléctrica. Ahora bien, cabe la pena mencionar que para el caso de la hidroeléctrica de Gezhouba, la cobertura boscosa 1890 Km² contribuye, en época seca, con 10 m³/s adicionales de agua, que a su vez se valoran en 40 millones de USD anuales (Guo, Xiao y Li 2000). Estos dos estudios no son equivalentes entre sí, debido a que el objetivo de análisis es distinto. Sin embargo, coluden en la importancia del bosque para la generación de energía hidroeléctrica.

El tipo de metodología para estimar la magnitud de los efectos de cambios en cobertura en los servicios ecosistémicos suelen ser modelos OLS. En particular existen estudios econométricos que buscan medir el efecto marginal ante cambios de biodiversidad, y su efecto en los beneficios ecosistémicos. Ding y Nunes (2014) y Lara, Guevara y Martelo (2018) utilizan modelos de regresión lineal para medir el efecto de cambios de cobertura en el valor total de los servicios ecosistémicos (VET). Se identifica que en ambos documentos la relación entre mayor cobertura boscosa y el valor de los servicios es positivo y significativo. Sin embargo, la magnitud del efecto varía de acuerdo con el tipo de bosque y la variable a explicar.

De la revisión en literatura se consideró importante resaltar los siguientes puntos:

- Existen diferentes tipos de cobertura boscosa, y cada tipo contribuye de manera diferencial a la provisión de servicios ecosistémicos (Locatelli, et al. 2011) (Guo, Xiao y Li 2000). Por lo que el actual documento genera un sesgo al analizar los bosques sin esta distinción, valorando cada pixel de deforestación con el mismo peso.
- El análisis de servicios ecosistémicos hídricos parte de una unidad de análisis que corresponde a la cuenca hidrográfica (Guo, Xiao y Li 2000).
- La variación en los beneficios generados por los bosques ante un cambio en cobertura boscosa tiene diferentes métodos de cuantificación, una particularmente conveniente es el modelo econométrico (Ding y Nunes 2014).
- El análisis de cuenca puede generarse comparando las cuencas entre sí y/o a través de la medición de cambio de esta a en el tiempo (Bosch and Hewlett 1982).

Modelo

La generación de energía depende en principio de el costo de oportunidad del agua, siendo esta un insumo fundamental para la generación, ahora bien este recurso dependerá de los cambios en coberturas ubicadas en las cuencas aportantes del las hidroeléctricas y la precipitación que recibe dicha cuenca, adicionalmente puede existir un efecto de desgaste de las plantas con varios años en operación, así como un incentivo de generar más electricidad ante precios elevados de mercado.

El modelo asume como variable dependiente la potencia de generación de energía, la precipitación, la lluvia, los años de generación y el precio de electricidad en el mercado como variables de control y la deforestación como variable explicativa.

$$FaPot_{it} = \alpha_1 \frac{Def_{it}}{PixCuenca_i} + \alpha_2 \$Kw/h_t + \alpha_3 Años + \alpha_4 \frac{\sum Pre_{it}}{PixCuenca_i} + \gamma_t + v_i + u_{it}$$

$$i \in \{1,2, \dots, 60\},$$

$$t \in \{2001, 2002, \dots, 2015\}$$

Donde la variable dependiente es $FaPot_{it}$ que representa el potencial de energía producida en la hidroeléctrica i en el año t , $\$Kw/h_t$ el precio promedio anual de un Kw/h en el año t , el cual es el mismo para todas las hidroeléctricas, $\frac{Def_{it}}{PixCuenca_i}$ como el porcentaje de deforestación en la cuenca hidrográfica i en el año t , obtenida de (Hansen 2013), Años son los años en producción de la hidroeléctrica i en el año t , $\frac{\sum Pre_{it}}{PixCuenca_i}$ es la suma por pixel de la precipitación en la cuenca hidrográfica i en el año t dividido por el total del tamaño de la cuenca, v_i son los factores no observables de

la hidroeléctrica i , γ_t los efectos fijos variantes en el tiempo y u_{it} los errores de la hidroeléctrica i en el año t .

Datos

El estudio se limita por las fuentes de información, ya que no existen series de cambio en bosque anteriores al año 2000 en Colombia. Adicionalmente, por la información incompleta de la ubicación geográfica de las hidroeléctricas que se encuentran en el territorio colombiano. Sin embargo, las 60 hidroeléctricas georreferenciadas en el presente documento tienen una alta representatividad ya que incluyen cerca de tres cuartas partes de capacidad instalada de generación hidroeléctrica en Colombia. Los datos que tenemos provienen de las siguientes fuentes:

- Deforestación: Esta información se reporta con frecuencia anual y se presenta como pixeles de 208.3 x 208.3 mts, los cuales se encuentran georreferenciados (Hansen 2013).
- Cantidad total de energía generada: Esta información se reporta con frecuencia por hora en Kw/h, es decir 24 reportes diarios para cada hidroeléctrica (Reportes de Expertos de Mercado - (XM 2019)).
- Capacidad instalada, información que no suele variar en el tiempo y se presenta como Mw/h instalados (ENEL - CODENSA 2019), (Celsia 2019), (EPM 2019) y (XM 2019).
- Año de inicio de operación de la hidroeléctrica (ENEL - CODENSA 2019), (Celsia 2019), (EPM 2019).
- Tipo de hidroeléctrica (Filo de agua o represa) (ENEL - CODENSA 2019), (Celsia 2019), (EPM 2019).
- Ubicación geográfica del punto de captación de agua: Esta ubicación se estima a través de geolocalización manual de cada una de las hidroeléctricas con el apoyo de las bases de datos proporcionadas por las diferentes entidades (UPME 2017), (IGAC 2015).

Las hidroeléctricas, su georreferenciación y delimitación de cuencas aportantes

Para georreferenciar las hidroeléctricas del país se utilizó la base de datos que proporciona el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC, junto con la Unidad de Planeación Minero-Energética -UPME. El resultado fue la ubicación de 60 hidroeléctricas a lo largo y ancho del territorio de Colombia. En la Figura 4 se presenta cada ubicación.

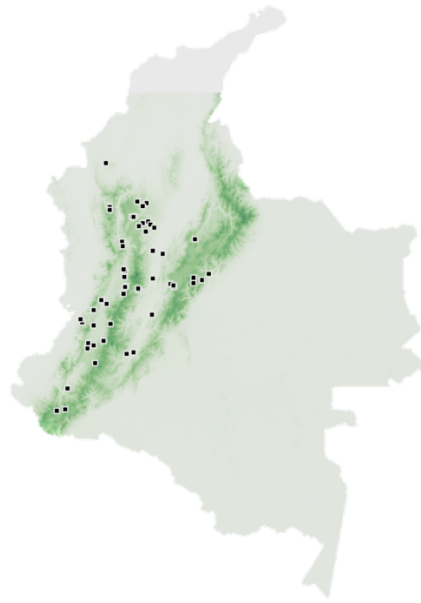


Figura 4 Ubicación de las 60 hidroeléctricas analizadas.

Nota: La imagen presenta la ubicación de las 60 hidroeléctricas georreferenciadas, nótese que todas están ubicadas cerca de alguna de las tres cordilleras.

Fuente: Elaboración de Autor.

Delimitación de las cuencas hidrográficas

Para delimitar el área de análisis de cada hidroeléctrica se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS. A partir de la información de altura proporcionada por el DEM se calculan parámetros hidrológicos tal como el flujo de agua, este valor proyecta la dirección del agua a partir de la pendiente del terreno. Posteriormente se delimitan todos los píxeles los cuales drenan o tienen una dirección de convergencia hacia el punto de cierre. El conjunto resultante del segundo proceso constituye la delimitación del área de estudio.

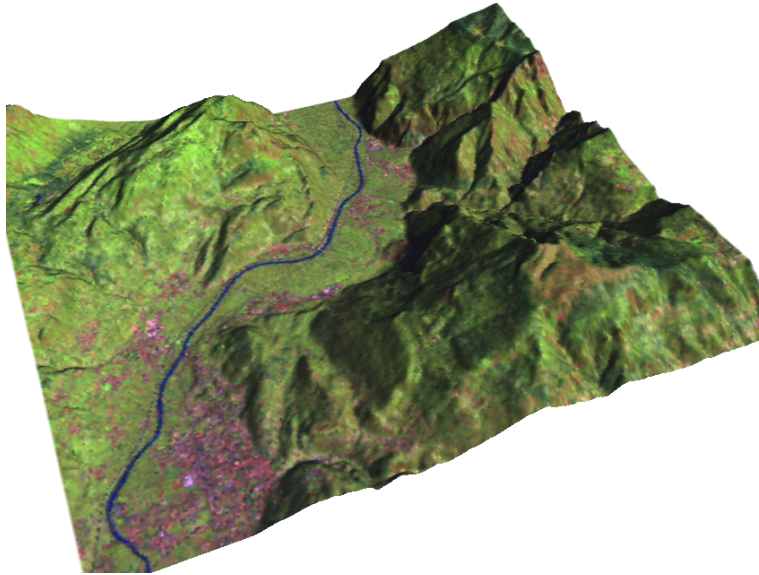


Figura 5: Modelo de Elevación Digital como fuente del procesamiento de Cuencas Hidrográficas.
Nota: El modelo de elevación digital o DEM, por sus siglas en ingles, es la fuente de información para de la delimitación de cuencas hidrográficas. Fuente: Tomada de (GIS 2019)

Gráficamente se presenta un ejemplo de la delimitación de cuenca aportante en la Figura 6, esta delimitación representa el área que drena o lleva agua hacia la hidroeléctrica. Dado que esta es la unidad de estudio, se estima solo la deforestación que existe en esta área. Este proceso se realiza para las 60 hidroeléctricas.

Si bien otros estudios como (Guo, Xiao y Li 2000) y (Locatelli, et al. 2011) identifican el tipo de ecosistema, el presente estudio no genera esta división. Lo que quiere decir que cada píxel de deforestación no discrimina el tipo de ecosistema que representa ni genera sesgo por la ubicación o cercanía con el punto de captación.

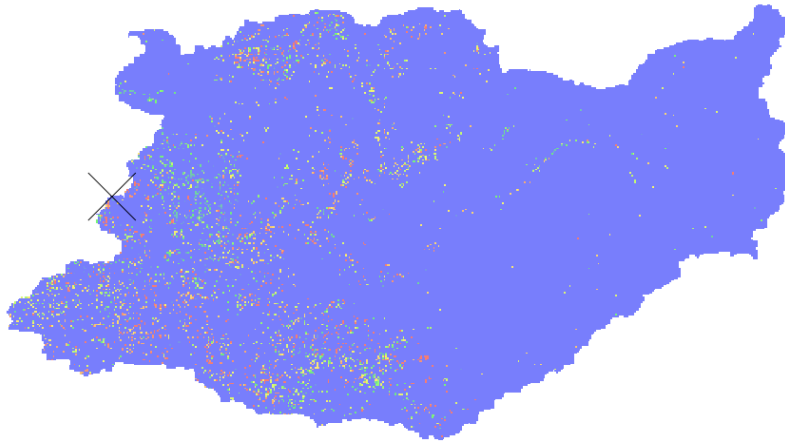


Figura 6: Ejemplo de delimitación de cuenca aportante.

Nota: Se presenta la cuenca hidrográfica de Urra I, esta se encuentra ubicada en el departamento de Córdoba, al noroccidente de Colombia, los pixeles representan la ubicación de la deforestación, se marca con una equis el punto de cierre de la cuenca (punto de captación de la hidroeléctrica).

El resultado es un grupo de polígonos cuyas áreas se presentan en la Tabla 8 de los anexos y corresponden a la estimación geográfica de la zona de análisis tal como se presentó en la Figura 6. En total se delimitan 60 cuencas aportantes que representan unos 6 millones de hectáreas en total. Cabe la pena mencionar que ninguna cuenca es exactamente igual a otra, sin embargo, existen traslapes entre ellas, lo que quiere decir que algunas intersecciones entre cuencas aportantes no son vacías.

Análisis de la deforestación y precipitación en el territorio colombiano

Estimar el cambio en la cobertura boscosa en las cuencas aportantes de cada hidroeléctrica georreferenciada en Colombia es necesario para el desarrollo de este documento. Para esta estimación se establece la variable porcentaje de deforestación, la cual se define como el factor entre el área que cada año se deforesta y el tamaño de la cuenca. Esta variable se construyó a partir de la base de datos de (High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. 2013) quien reporta la cantidad de bosque perdido, el año de esta pérdida y su georreferenciación.

La definición de deforestación en este estudio es:

$$Defo_{it} = \frac{DefoP_{it}}{PixelesCuenca_i}$$

$$i \in \{1,2, \dots, 60\},$$

$$t \in \{2001, 2002, \dots, 2015\}$$

$$Defo_{it} \in [0,1]$$

Donde $Defo_{it}$ corresponde al porcentaje de deforestación en la cuenca de la hidroeléctrica i en el año t , $DefoP_{it}$ es el número de píxeles de deforestación reportado en la cuenca que corresponde a la hidroeléctrica i en el año t y $PixelesCuenca_i$ es tamaño total (en píxeles) de la cuenca que corresponde a la hidroeléctrica i , cada píxel es de 208.3 x 208.3 mts.

En la Tabla 1, se presentan las estadísticas descriptivas a partir de la unidad de observación que corresponde a la cuenca aportante de cada una de las 60 hidroeléctricas analizadas. El rango de deforestación para este grupo de cuencas aportantes oscila entre el 0% y 7.32% por año y el promedio es de 0.21% de deforestación por año.

Para estimar la oferta hídrica en cada una de las hidroeléctricas se utilizó la precipitación reportada por el IDEAM, quien como instituto técnico y científico en temas ambientales para el territorio colombiano es la fuente oficial de información hídrica y meteorológica. En este contexto y en el marco de sus funciones se solicitó la información de precipitación diaria para todas las estaciones existentes en Colombia desde el año 2000. Posteriormente se identificaron aquellas que se encuentran dentro o cerca de las cuencas hidrográficas. Para estimar el total de la precipitación que tributa a cada hidroeléctrica se utiliza un método de interpolación espacial cuadrática.

El método de interpolación busca predecir el valor de la precipitación de cada píxel que se define en las cuencas aportantes delimitadas, donde por lo general no existen estaciones meteorológicas, para predecir estos valores utiliza las mediciones realizadas dentro de la misma área o región a partir de las estaciones meteorológicas (Burroughs y McDonnell, 2015). El resultado es una superficie continua de valores construidos a partir de unos puntos conocidos.

Desde una perspectiva teórica, el procedimiento de interpolación se realiza en dos partes: la primera es una estimación de los coeficientes lineales de una función de *spline* que se deriva de la ubicación de cada estación meteorológica utilizando una regresión de mínimos cuadrados. La segunda parte es la estimación de la precipitación en la superficie interpolada. Esta predicción se realiza a partir de los coeficientes de la regresión.²

Las estadísticas descriptivas de la variable precipitación se presentan en la Tabla 1, donde se reporta los milímetros acumulados de agua en un espacio de 1x1 mm, 1 mm es el equivalente a un litro de agua por metro cuadrado, se puede notar que el año 2002 y 2015 presentan los valores más bajos de precipitación en toda la serie.

² Corresponde al comando `v.surf.bspline` en Grass - Gis

También se incluye en la Tabla 1 el número de hidroeléctricas que se incluyeron para cada año, ya que dentro de la serie se identifica que los periodos de producción no son continuos dentro de los años de estudio, adicionalmente se identifica que existen hidroeléctricas con muchos años de producción como es el caso de la Hidroeléctrica de Piedras Blancas, la cual comenzó su operación en 1921. La hidroeléctrica de Agua Fresca es la última en entrar en operación, en el 2008.

Tabla 1 Estadísticas descriptivas. Variables de deforestación, precipitación, área y años en operación de las hidroeléctricas en Colombia

Año	Deforestación de cuencas				Precipitación (mm)				Años de operación	Área	Hidroeléctricas
	Prom.	SD	Mín.	Máx.	Prom.	S.D	Min.	Max.	Años	(miles de ha prom)	(# por año)
2000	.	.	.	.	2342	803	983	4552	23	138	17
2001	0.3%	0.3%	0.0%	1.8%	1933	942	755	5773	27	112	35
2002	0.2%	0.2%	0.0%	0.9%	1871	704	904	4173	27	101	41
2003	0.1%	0.1%	0.0%	0.5%	2059	772	846	4669	26	100	45
2004	0.2%	0.2%	0.0%	1.4%	2135	820	1108	5101	26	106	48
2005	0.3%	0.9%	0.0%	7.3%	2169	725	990	4234	25	108	50
2006	0.3%	0.3%	0.0%	2.0%	2285	837	1130	5060	26	101	55
2007	0.2%	0.2%	0.0%	1.2%	2374	953	956	5693	26	102	57
2008	0.2%	0.2%	0.0%	0.8%	2545	909	1169	4992	27	99	59
2009	0.3%	0.3%	0.0%	1.2%	2001	840	802	4847	28	98	59
2010	0.2%	0.2%	0.0%	0.8%	2538	922	1201	5215	29	98	57
2011	0.2%	0.3%	0.0%	1.2%	.	.	.	.	30	101	56
2012	0.3%	0.3%	0.0%	1.7%	.	.	.	.	31	101	57
2013	0.1%	0.2%	0.0%	1.3%	.	.	.	.	32	94	58
2014	0.2%	0.2%	0.0%	0.7%	2103	911	1053	5791	33	94	58
2015	0.1%	0.2%	0.0%	1.2%	1651	825	742	4582	34	95	57
Total	0.2%	0.3%	0.0%	7.3%	2154	877	742	5791	28	101	51

Nota: La deforestación se presenta como un porcentaje en relación con el tamaño de la cuenca hidrográfica. Los datos de precipitación se presentan en mm totales al año, debe notarse que los años 2011, 2012 y 2013 no tienen información ya que presentan una desviación estadística anormal, por lo que NO se incluyen dentro del análisis y se reportan como *missing*. Adicionalmente en el 2003 ingresan al mercado varias hidroeléctricas (como Urrea) y cuyas cuencas aportantes reportaron una baja para ese año, sin embargo, para el siguiente año se reporto de nuevo altas cifras de deforestación.

El área promedio de las cuencas cambia con respecto al año debido a que entran o salen de operación algunas generadoras.

Fuente: Hansen, Reportes Meteorológicos del IDEAM (2018), (XM 2019), (Unidad de Planeación Minero Energetica 2016), Cálculos del Autor.

Capacidad instalada para la generación de energía hidroeléctrica

Para el estudio se tienen en cuenta 60 generadoras que abarcan al 68% de la capacidad instalada en el territorio colombiano, al incluir 7858 Mw (Mega watts) de los 11501 Mw instalados para el 2015. En la Tabla 2 se presenta las capacidades instaladas de las hidroeléctricas por tipo de tecnología, nótese que las de filo de agua tienen en promedio una capacidad instalada de 17 Mw mientras que las que poseen una infraestructura de presa tienen una capacidad de 301 Mw en promedio.

Tabla 2 : Capacidad instala de las 60 hidroeléctricas a analizar

Tipo de hidroeléctrica	Capacidad Total Instalada (Mw/h)	Promedio (Mw/h)	Número de Hidroeléctricas
A Filo	613.08	17.03	36
Represa	7245	301.88	24
Total	7858.08	130.96	60

Nota: Este es el caso para el año 2015 reportado por XM, los valores cambian ligeramente en los años anteriores. Fuente: (XM 2019, UPME 2017), Cálculos del Autor.

Producción de energía

En cuanto a la producción total de energía se obtiene la información a partir de los reportes XM de las 60 hidroeléctricas, aclarando que algunos periodos las hidroeléctricas no estaban en operación. Se presentan los resultados en Gw/h en la Tabla 4.

Al realizar una regresión de efectos fijos donde la variable dependiente es $\ln(Kw_{it})$, se evidencia que los efectos marginales de la deforestación en las cuencas hidrográficas generan un efecto negativo en la producción de energía. Sin embargo, dichos resultados no son significativos. El modelo es el siguiente:

$$\ln(Kw/h_{it}) = \alpha_1 \frac{Def_{it}}{PixCuenca_i} + \alpha_2 \$Kw/h_t + \alpha_3 \text{Años} + \alpha_4 \frac{\sum Pre_{it}}{PixCuenca_i} + \gamma_t + v_i + u_{it}$$

$$i \in \{1,2, \dots, 60\}$$
$$t \in \{2001, 2002, \dots, 2015\}$$

Donde la variable dependiente es $\ln(Kw/h_{it})$, esta representa el logaritmo natural de energía total producida, en la hidroeléctrica i en el año t , $\$Kw/h_t$ es el precio de venta en el mercado para el año t , $\frac{Def_{it}}{PixCuenca_i}$ como el porcentaje de deforestación en la cuenca hidrográfica i en el año t , obtenida de (Hansen 2013), Años son los años en producción de la hidroeléctrica i en el año t , $\frac{\sum Pre_{it}}{PixCuenca_i}$ es el promedio de la

precipitación en la cuenca hidrográfica i en el año t , v_i factores no observables de la hidroeléctrica i , γ_t los efectos fijos variantes en el tiempo y u_{it} los errores de la hidroeléctrica i en el año t .

Tabla 3 Modelo de efectos fijos cuya variable dependiente es el logaritmo de la generación total de energía

(1)	
	Ln(Kw/h)
% Deforestación	-4.602 (-1.40)
Kw/h	-0.00171*** (-7.15)
Edad de la HE	0.0160*** (4.21)
Lluvia Promedio	0.0000235* (2.09)
Constante	17.69*** (63.85)
Numero de He	60
Observaciones	788

Nota: p-values in parentheses
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Uno de los problemas con esta especificación es la variable dependiente, ya que la cantidad de energía depende en parte de la capacidad instalada, que técnicamente tiene límites de generación por diseño.

También hay otra posibilidad para mantener bajos niveles de generación, los generadores con presa pueden tener el incentivo de sub-generar, esperando que las condiciones de demandan sean más convenientes para abrir compuertas y por ende el beneficio sea mayor.

Los pequeños generadores a filo de agua no tienen esta capacidad, debido a su restricción tecnológica, esto implica que su regla de generación debe ser la de despachar en todo momento, razón por la cual se asume que su estrategia se basa en mantener la producción por la mayor cantidad de tiempo posible.

La especificación propuesta ajusta la variable dependiente a partir del factor de capacidad de generación, que corresponde al porcentaje de generación de acuerdo con la capacidad instalada de cada hidroeléctrica. A continuación, se presenta la fórmula para su obtención:

Factor de capacidad de generación.

$$Y_{it} = FaPot_{it} = \frac{(Kw/h) Generados_{it}}{Cap Inst_i * 1e^{+9} * 365 * 24}$$

$$FaPot_{it} \in (0,1]$$

$FaPot_{it}$ es el resultado de dividir la energía generada por la planta anualmente, sobre la energía que hubiera podido generar la planta si lo hiciera a plena carga durante todo el período.

Las ventajas de utilizar la variable restringida es lograr medir la potencia adicional de cada hidroeléctrica a partir de su capacidad instalada, logrando incluir condiciones propias de cada planta hidroeléctrica. En la Tabla 4, se muestran las estadísticas descriptivas de esta variable, que representa el potencial de generación eléctrico.

Tabla 4 Estadísticas descriptivas, factor de potencia de generación, generación total de energía y capacidad instalada

Año	Potencia Generada (%)			Generación (Mw/h)				Capacidad Instalada (Mw/h)	
	prom	max	min	prom	Mediana	max	min	mediana	prom
2000	0.48	0.9	0.22	13614	549	4509.5	20.4	170	361
2001	0.46	0.94	0.07	7228.8	100	5774.8	2.16	19.9	195
2002	0.49	0.98	0.06	6735.4	43.6	5868	2.08	19	169
2003	0.52	1.06	0.11	6443.7	38.3	5403	2.78	10.2	161
2004	0.51	0.99	0.05	6872.8	57.3	6137.7	1.73	18.5	160
2005	0.53	1.22	0.07	6500.6	34.4	6065.3	2.33	15.6	149
2006	0.55	1.16	0.09	6478.8	53.8	6110.8	2.34	13.2	142
2007	0.55	1.07	0.07	6470.7	53.7	7216.4	2.44	13.2	137
2008	0.6	1.22	0.03	6563.9	63.5	7396.2	0.88	13.2	133
2009	0.52	1.2	0.03	5703.5	42.6	6422.3	2.24	13.2	133
2010	0.54	1.06	0.02	5820.9	57.1	6448.8	2.09	13.2	137
2011	0.61	1.2	0.02	7147.4	69.4	7628.2	1.52	15.6	140
2012	0.55	0.99	0.01	6436.1	65.1	6805.2	2.23	18	137
2013	0.54	1.18	0.02	5660.3	42.4	6170.1	2.19	12.4	135
2014	0.53	1.32	0.01	5517.8	37.7	5603.1	1.69	12.4	135
2015	0.47	1.31	0.1	5318.2	30.5	6602.7	1.81	11.6	137
Total	0.53	1.32	0.01	6433.6	53.6	7628.2	0.88	18	149

Nota: Se identifica que existen datos por encima del máximo teórico de generación, es el caso de la hidroeléctrica de Río Grande, cuya capacidad instalada es de 0.3 Mw/h. El valor atípico de potencia, por encima de 100% puede ser explicado por un error al declarar la Capacidad Instalada, la cual se expresa en Mw/h y con un solo decimal, por lo que posiblemente su capacidad corresponde a un rango superior, el cual explicaría los valores atípicos.

Resultados

La deforestación puede tener efectos no lineales sobre la variable dependiente, con el fin de no imponer suposiciones previas sobre la forma funcional y permitir que la variable se ajuste de forma no lineal, se generan múltiples modelos de efectos fijos para explicar la producción de energía, los cuales parten de la función *Spline* no lineal restringida con tres, cuatro y cinco cortes en la variable de deforestación. Los puntos de corte son definidos de acuerdo con los percentiles recomendados de Harrell (2001). Ver Tabla 9 en el anexo.

Los resultados tienen el siguiente orden, se inicia con un análisis de especificación de la forma funcional a partir de la posibilidad de la no linealidad del efecto de la deforestación en la potencia de generación *Spline* - Modelos (1), (2) y (3) - y un cuarto modelo (4) que asume forma lineal a lo largo de todo el rango de la variable explicativa. Se presentan dos especificaciones adicionales del modelo de efectos fijos lineales -modelo (4)- el cual estima el efecto de las variables explicativas a la generación de energía. Por último, se presentan escenarios de deforestación y su efecto en la producción de energía.

Se observa que entre más intervalos se asumen en la variable dependiente la significancia estadística disminuye, sin embargo, en los primeros intervalos – modelo (1) y (2)- se presenta una relación negativa y significativa.

Tabla 5 Regresiones *Spline* explicando el factor de potencia generada y regresión sin restringir.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Variable	Potencial de generación			
Defo intervalo 1	-43.20***	-54.86**	-43.49	
Intervalo	(0,0.15)	(0,0.08)	(0,0.059)	
Defo intervalo 2	43.4	230.2	-35.4	
Intervalo	(0.15,0.44)	(0.08,0.15)	(0.59,0.15)	
Defo intervalo 3		-347.8	296.5	
Intervalo		(0.22,0.60)	(0.15,0.27)	
Defo intervalo 4			-417.2	
Intervalo			(0.27,0.60)	
Deforestación				-2.168
Precio del Kw	-0.00100***	-0.00101***	-0.00100***	-0.000914***
Edad de la HE	0.0124***	0.0124***	0.0123***	0.0118***
Lluvia Promedio	0.0000167***	0.0000166***	0.0000166***	0.0000158***
R-sq	0.129	0.129	0.129	0.105
Cons	0.326***	0.330***	0.329***	0.287***

N	788	788	788	788
	3 Knots	4 Knots	5 Knots	Linear

El modelo (1) y (2) de la Tabla 5 se evidencia una relación negativa y significativa con la variable dependiente, factor de capacidad, en el intervalo 0% - 0.15% y 0% - 0.08%, respectivamente. Sin embargo, conforme aumenta la deforestación se observa que el efecto marginal se vuelve positivo y no significativo, el tipo de especificación no parece correcta y el alcance predictivo del modelo se limita dentro de estos rangos, ya que pierde significancia ante valores superiores a esos rangos de deforestación como se observa en la Figura 7.

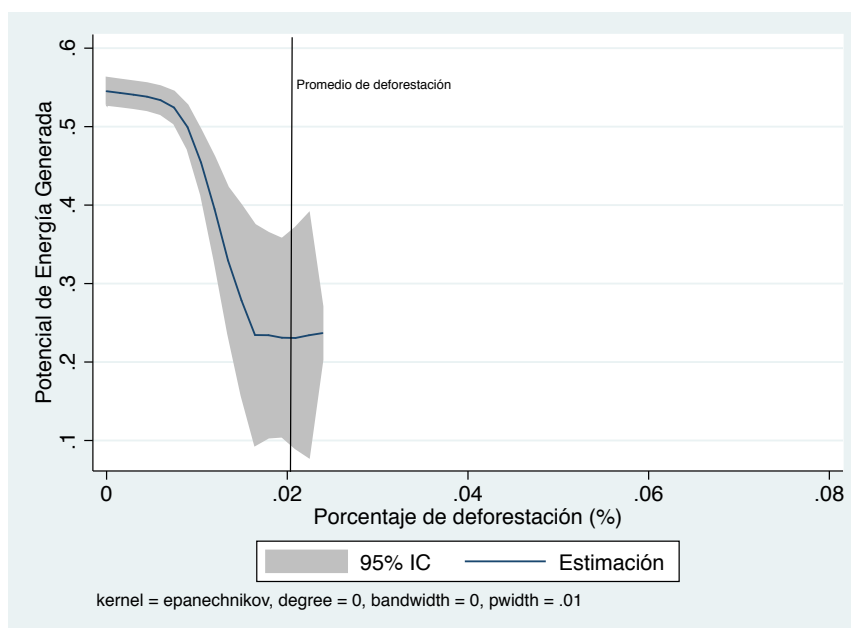


Figura 7 : Modelo Spline para predecir la variable independiente

Nota: Se observa un bajo error de predicción por debajo de la media de deforestación 0.021% identificando una relación negativa y significativa de la variable deforestación.

Se identifica estadísticamente que no existe una mejoría al incluir (en conjunto) intervalos adicionales a la variable dependiente del tipo *Spline*, por lo que a continuación se presentan los resultados del modelo de efectos fijos lineales en la variable explicativa. Se presentan cuatro especificaciones, la primera incluye todas las hidroeléctricas (presa y filo) de acuerdo a la especificación del modelo (1), la segunda agrega una interacción entre la deforestación y tipo de hidroeléctrica, la tercera solo incluye la tecnología de filo de agua y la última especificación es igual a la tercera sin incluir la variable de precio del Kw/h promedio.

Tabla 6 Modelos de efectos fijos lineales no restringidos

	(1)	(2)	(3)	(4)
	Factor de generación (%)			
Deforestación (%)	-2.168 (-1.63)	-13.72*** (-3.81)	-13.51*** (-3.33)	-10.31* (-2.47)
Precio del Kw/h	-0.000914*** (-9.14)	-0.000940*** (-9.45)	-0.000848*** (-5.86)	
Edad de la He	0.0118*** (7.26)	0.0121*** (7.45)	0.00994*** (4.03)	-0.00115 (-0.70)
Prom. Lluvia	0.0000158*** (3.42)	0.0000155*** (3.38)	0.0000125 (1.66)	-0.00000427 (-0.59)
Defo*Embalse		13.30*** (3.45)		
Constante	0.287*** (6.71)	0.295*** (6.92)	0.405*** (6.25)	0.636*** (11.87)
N	788	788	449	449
R-sq	0.105	0.119	0.092	0.015
He incluidas	60	60	24	24

Nota: Los errores estándar están en paréntesis, el precio esta en COP constantes base 2008, * p\$<\$0.05, ** p\$<\$0.01, *** p\$<\$0.001.

Nótese en la Tabla 6 que el efecto de la deforestación en la variable dependiente es negativo en ambas especificidades. Sin embargo, solo es significativo estadísticamente en el segundo modelo (2), el cual incluye una interacción de la deforestación con las hidroeléctricas de tecnología de embalse; lo que explicaría lo que se menciono anteriormente, la deforestación genera una disminución en la regulación hídrica que afecta mayormente al tipo de hidroeléctrica a filo de agua, lo cual se presenta debido a que este tipo de hidroeléctricas no tiene infraestructura para regular el caudal y por tanto solo pueden alcanzar altos niveles de potencia cuando el caudal se mantiene regulado. Ahora bien, en aquellas hidroeléctricas que tienen tecnología de presa se evidencia que la perdida de cobertura boscosa no genera impacto significativo debido a que tienen un regulador artificial, la presa y el embalse le permite generar energía.

Debido a que el rango de deforestación es de 0% a 7% se debe aclarar que los resultados solo son válidos dentro de este rango, y que en mayores niveles de

deforestación pueden generar efectos en el factor de generación de energía no necesariamente iguales o lineales.

Predicciones y efectos en el precio de la energía

Utilizando el modelo (3) presentado en la Tabla 6 se presentan escenarios predictivos de deforestación y su correspondiente generación de energía. Lo cual evidencia que cuando la deforestación disminuye la producción de energía aumenta, ver Tabla 7.

Se presenta los resultados a partir de la siguiente metodología.

- 1) Se estima la potencia generada a partir de los coeficientes del modelo (3) presentado en la Tabla 6, manteniendo los valores promedio de las variables control y generando cambios en la deforestación anual.
- 2) A partir de la potencia generada en el punto 1, se estima la variación frente al escenario inicial.
- 3) La variación se valora en Kw/h, a partir del promedio de capacidad instalada de las hidroeléctricas a filo de agua.
- 4) Se valoran los Kw/h a partir del precio promedio en bolsa entre los años 2000 y 2015.

Tabla 7 Escenarios de deforestación y su efecto en la producción de energía.

Escenario	Solo filo de agua	Valor	Delta	Adicional de generación en (Millones de Kw/h)	Valor en el mercado anual
Actual	% de Deforestación	0.19%			
	% de pot. utilizada	53.41%			
(1)	% de Deforestación	0.14%	-0.05%		
	% de pot. utilizada	54.04%	0.63%	33	\$ 4,000
(2)	% de Deforestación	0.07%	-0.12%		
	% de pot. utilizada	54.99%	1.58%	82	\$ 9,000
(3)	% de Deforestación	0.00%	-0.19%		
	% de pot. utilizada	55.94%	2.53%	132	\$ 15,000

Nota: Las estimaciones se realizaron a partir del modelo (3) del la Tabla 6. Los precios están en pesos colombianos constantes base 2008 y se reportan escenarios de disminución del 25%, 67% y 100% en la deforestación. Para calcular el precio del Kw/h se utiliza el promedio entre los años 2000 y 2015 de precio en bolsa, que corresponde a \$113 por Kw/h.

Cada escenario simula una disminución en la cantidad de deforestación anual y el efecto en la potencia generada para las hidroeléctricas a filo de agua a partir de la especificación del modelo con interacción entre la deforestación y el embalse.

Se observa la Tabla 7 el escenario (1), representa una disminución del 25% en la deforestación (equivalente a 1276 ha/año no deforestadas) que generaría un aumento de 0.63% de la potencia generada que corresponde a 33 millones de Kw/h de

generación adicional, lo que representa en el mercado 4 mil millones COP de ventas de energía, esto equivale a un beneficio de 3 Millones de COP por ha conservada. El escenario 3 presenta los resultados frente a la no deforestación (equivalente a 4851 ha/año no deforestadas) o un estado de conservación total del bosque en pie, lo que generaría un aumento de 2.53% de la potencia generada que corresponde a 132 millones de Kw/h de generación adicional, lo que representa en el mercado 15 mil millones COP en ventas de energía, esto equivale a un beneficio de 3 Millones de COP por hectárea conservada.

Conclusiones

Se debe tener en cuenta la estimación del costo de oportunidad de los principales motores de deforestación se realiza en el CONPES 3886, en el cual se estiman beneficios netos que perciben las personas que se dedican a estas actividades. Utilizando los datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2015 del DANE y del sistema de estadísticas agropecuaria de la Red de información y comunicación del sector agropecuario (Agronet, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Sostenible, 2017). Se estima que los beneficios netos de estos motores de deforestación están en el rango de 318.000 y 477.000 pesos por hectárea al año CONPES 3886.

Ya que las pérdidas de las generadoras hidroeléctricas a filo de agua ascienden a 3.000.000 pesos por hectárea deforestada al año. Un esquema de transferencias condicionadas dirigidas a las personas que generan actividades de deforestación generaría un beneficio adicional positivo debido al aumento en la producción de energía eléctrica y manteniendo los ingresos de los habitantes ubicados en la cuenca hidrográfica.

Colombia genera entre el 60% y 70% de su energía eléctrica a partir de fuentes hidráulicas las cuales dependen del recurso hídrico para su generación, sin embargo, se ven afectadas por la condición de conservación del bosque, el cual afecta al menos dos servicios ecosistémicos que impacta el recurso hídrico. Por tal razón se debe incentivar a la conservación del bosque, para que así esta se vea reflejada en beneficios económicos.

La conservación del bosque genera efectos significativos y consistentes en la producción de energía para las hidroeléctricas a filo de agua, ya que estas no cuentan con un regulador artificial de caudal.

El efecto económico de la deforestación genera una pérdida del 2.5% de la potencia instalada para las hidroeléctricas a filo de agua que corresponde a 132 millones de KW/h o equivalente a 15 mil millones de pesos en venta de energía.

Trabajos citados

- Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. *High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change*.
<http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.
- Costanza, Robert, Ralph d'Arge, Rudolf De Groot, Stephen Farber, y Monica Grasso. 1997. «The value of the world's ecosystem services and natural capital.» *Nature* 253.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being*. Washington, DC: Island Press.
- Locatelli, Bruno; Imbach, Pablo, Raffaele Vignola, Marc J. Metzger, y Efraín José Leguía Hidalgo. 2011. «Ecosystem services and hydroelectricity in Central America: modelling service flows with fuzzy logic and expert knowledge.» *Environ Change* 393-404.
- Terrado, M., Momblanch, A., Bardina, M., Boithias, L., Munné, A., Sabater, S., ... & Acuña, V. 2016. «Integrating ecosystem services in river basin management plans.» *Journal of Applied Ecology*, 53(3) 865-875.
- Bosch, J Mv, y JD Hewlett. 1982. «A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.» *Journal of hydrology, Volume 55* 3-23.
- Minminas, Ministerio de Minas y Energia. 2014. *Energía Eléctrica*. Bogotá: Memorias al Congreso de la República.
- Bateman, Ian J, Georgina Mace, Carlo Fezzi, Giles Atkinson, y Kerry Turner. 2011. «Economic analysis for ecosystem service assessments.» *Environmental and Resource Economics, Volume 48* 177-218.
- Núñez, Daisy, Laura Nahuelhual, y Carlos Oyarzún. 2006. «Forests and water: The value of native temperate forests in supplying water for human consumption.» *Ecological Economics, Volume 58* 606-616.

- Morgan, R. 1997. «Erosión y conservación del suelo.» 343 (Ediciones Mundi).
- García, Carlos Francisco. 2007. «Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá D.C. .» *Revista Colombia Forestal Vol. 10 No. 20* 128 - 147.
- Hamilton, L. S., N. C. Dudley, G. Greminger, y . 2009. *Los bosques y el agua*. No. Fe155 (FAO).
- Lara-Pulido, J. A., A. Guevara-Sanginés, y C. A. Martelo. 2018. «A meta-analysis of economic valuation of ecosystem services in Mexico.» *Ecosystem services* 31 126-141.
- Santa, Mauricio María, Nils-Henrik Der Fehr Von, Jaime Millan, Juan Benavides, Orlando Gracia, y Erika Schutt. 2009. *El mercado de la energía eléctrica en Colombia: características, evolución e impacto sobre otros sectores*. Bogotá: Nueva Serie Cuadernos de Fedesarrollo, número treinta, Capítulos.
- Hernández, José, y Fernando Carvajal-Serna. 2017. «Cobertura al riesgo ante la variabilidad hidrológica en una central hidráulica a filo de agua usando derivados climáticos.» *Lecturas de Economía*, 87 191-222.
- Expertos del Mercado S.A ESP. 2019. «Estándar de Información del Despacho Económico.» *Expertos de Mercados*. Abril. Último acceso: 13 de Julio de 2019. http://www.xm.com.co/Documents/PDF/Generacion/Estandar_informacion_de_spacho.pdf.
- El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2018. «Base de datos de precipitación en Colombia (Serie diaria).» *Documento Excel*. Bogotá, Octubre.
- González, J.J., A.A. Etter, A.H. Sarmiento, S.A. Orrego, C. Ramírez, E. Cabrera, D. Vargas, G. Galindo, M.C. García, y M.F. Ordoñez. 2011. *Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia*. Bogotá D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Bogotá D.C.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2019. «Tasa anual de deforestación.» *IDEAM*. Último acceso: Julio de 2019. www.ideam.gov.co.

- López, F Cadenas de Llano. 1994. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. TragsaTragsatec. TragsaTragsatec.
- Ding, Helen, y Paulo Ald Nunes. 2014. «Modeling the links between biodiversity, ecosystem services and human wellbeing in the context of climate change: Results from an econometric analysis of the European forest ecosystems.» *Ecological Economics* 97: p. 60-73.
- Guo, Zhongwe, Xiangming Xiao, y Dianmo Li. 2000. «An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production.» *Ecological Applications* 925-936.
- ENEL - CODENSA. 2019. *Centrales eléctricas Emgesa | Enel-Emgesa*. Último acceso: 10 de Enero de 2019. <https://www.enel.com.co/es/conoce-enel/enel-emgesa/centrales-electricas.html>.
- Celsia. 2019. *Centrales hidroeléctricas - Celsia*. Último acceso: Enero de 2019. <https://www.celsia.com/es/centrales-hidroelectricas>.
- EPM. 2019. *EPM Plantas, sedes, centrales para la prestación de los servicios*. Último acceso: 27 de Enero de 2019. <https://www.epm.com.co/site/home/institucional/nuestras-plantas/energia/centrales-hidroelectricas>.
- XM. 2019. *Descripción del Sistema Eléctrico Colombiano - XM*. Último acceso: 26 de Febrero de 2019. <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx>.
- . 2019. *Informes Anuales - XM*. Último acceso: Abril de 2019. <http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>.
- UPME. 2017. «Ubicación geofrafica de las hidroeléctricas en colombia .» UPME. *No publicable*. Bogotá.
- IGAC. 2015. *Ubicación de hidroelectricas en colombia*. Geoportal IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- GIS, GRASS. 2019. *Modelo de Elevación Digital*. <https://grass.osgeo.org>.

Harrell, F. E. Jr. 2001. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*. New York: Springer.

Unidad de Planeación Minero Energetica, UPME. 2016. *Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en colombia*. Bogotá D.C: Ministerio de Minas y Energia, Republica de Colombia.

Anexos

Tabla 8 Área en hectáreas de las cuencas hidrográficas identificadas para cada hidroeléctrica

Hidroeléctrica	Área (Ha)	Tipo	Hidroeléctrica	Área (Ha)	Tipo
01agua_Fresca	7344	Filo	16el_Limonar	355356	Filo
02alto_Anchicaya	28277	Presa	17esmeralda	32678	Presa
03amalfi	7604	Filo	18guatape	102057	Presa
04asnazu	294349	Filo	19guavio	108902	Presa
05bajo_Anchicaya	57743	Presa	20insula	26962	Presa
06bayona	7513	Filo	21iquira_I	13611	Filo
07belmonte	26649	Filo	22iquira_li	13624	Filo
08betania	1065885	Presa	23jaguas	3394	Presa
09calderas	7001	Filo	24la_Herradura	26437	Filo
10calima	21984	Presa	25la_Tasajera	84718	Filo
11campestre_Cala	30182	Filo	26la_Vuelta	19475	Filo
12charquito	347175	Filo	27miel_I	62036	Presa
13chivor	196819	Presa	28mirolindo	17873	Filo
14coconuco	8737	Filo	29mondomo	17101	Filo
15el_Bosque	30681	Filo	30nima	1571	Filo
31niquia	84718	Presa	46rio_Palo	15799	Filo
32pajarito	17179	Filo	47rio_Piedras	8082	Filo
33pastales	12821	Filo	48rio_Recio	57357	Filo
34piedras_Blanca	72365	Presa	49rio_Sapuyes	29627	Filo
35playas	159162	Presa	50riofrio_Tamesi	5564	Filo
36porce_li	247309	Presa	51riogrande_I	85846	Presa
37prado	131389	Presa	52rionegro	254323	Filo
38prado_Iv	131389	Presa	53rumor	63381	Filo
39puente_Guiller	184562	Filo	54salvajina	251168	Presa
40rio_Bobo	21241	Presa	55san_Carlos	178	Presa
41rio_Cali	14813	Filo	56san_Francisco	33980	Presa
42rio_Frio_I	29648	Filo	57santa_Ana	4753	Presa
43rio_Frio_li	24240	Filo	58sueva_2	10208	Filo
44rio_Grande	90130	Filo	59tequendama	350512	Filo
45rio_Mayo	67999	Filo	60urra	378707	Presa

Nota: Se observa que el tamaño de las cuencas tiene una alta variación, particularmente las hidroeléctricas a filo de agua presentan menores tamaños que aquellas que tienen presa. Los valores se presentan en hectáreas Fuente: Cálculos del Autor.

Tabla 9 Modelos *Spline*, puntos de corte en la variable deforestación

Modelo	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4	Corte 5
(1)	0%	0.015%	0.44%	.	
(2)	0%	0.08%	0.22%	0.60%	
(3)	0%	0.05%	0.15%	0.27%	0.60%

Nota: Se utilizan cuatro posibles especificaciones las cuales asumen que la variable deforestación no es lineal dentro del rango a analizar (0% - 7%).