



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

Soluciones basadas en la naturaleza

El potencial de la
restauración y conservación
de bosques para la
adaptación al cambio
climático en Centroamérica

Joseluis Samaniego
José Eduardo Alatorre
Rafael Van Der Borght



NACIONES UNIDAS

CEPAL



REPRÉSENTATION PERMANENTE
DE LA FRANCE AUPRÈS DE
LA COMMISSION ÉCONOMIQUE
DES NATIONS UNIES
POUR L'AMÉRIQUE LATINE
ET LES CARAÏBES

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

Soluciones basadas en la naturaleza

El potencial de la restauración y conservación de bosques para la adaptación al cambio climático en Centroamérica

Joseluis Samaniego
José Eduardo Alatorre
Rafael Van Der Borght



REPRÉSENTATION PERMANENTE
DE LA FRANCE AUPRÈS DE
LA COMMISSION ÉCONOMIQUE
DES NATIONS UNIES
POUR L'AMÉRIQUE LATINE
ET LES CARAÏBES

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Este documento fue preparado por Joseluis Samaniego, Director de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL); José Eduardo Alatorre, Oficial de Asuntos Económicos de la Unidad de Economía del Cambio Climático de la misma División y Rafel Van der Borght, Consultor de dicha Unidad, en el marco de las actividades del proyecto cooperación entre Francia y la CEPAL.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de las Naciones Unidas o las de los países que representa.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2021/136
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2021
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.21-00664

Esta publicación debe citarse como: J.L. Samaniego, J.E. Alatorre, R. Van der Borght, "Soluciones basadas en la naturaleza: el potencial de la restauración y conservación de bosques para la adaptación al cambio climático en Centroamérica" *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2021/136), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	5
Introducción	7
I. Aspectos metodológicos y literatura existente	11
II. Observaciones de la Tierra para Centroamérica	13
A. Las luces nocturnas y la actividad económica	13
B. Régimen de lluvia y lluvias extremas	17
C. La cobertura boscosa y vegetal	22
III. El impacto de las lluvias extremas en la actividad económica	25
A. Marco conceptual	25
B. Resultados empíricos	26
IV. Cobertura boscosa e impacto diferenciado de las lluvias extremas	31
A. Resultados empíricos	31
B. Impacto potencial de una política de restauración y conservación de bosques	33
V. Conclusiones	37
Bibliografía	39
Anexos	43

Cuadros

Cuadro 1	Resultados de la regresión PIB/píxel VS NTL/píxel	15
Cuadro 2	Resumen estadístico de las variables de interés a nivel de píxel, 2013-2019	23
Cuadro 3	Resultados de las regresiones del impacto de las lluvias extremas sobre la actividad económica local	27
Cuadro 4	Evaluación del impacto económico de las lluvias extremas (en % del PIB y \$US 2010 millones dólares), 2013-2019	29
Cuadro 5	Resultados de la regresión (4) con el impacto de la cobertura boscosa	32

Gráficos

Gráfico 1	NTL/píxel VS PIB/píxel, 2013 - 2019.....	15
Gráfico 2	PIB/píxel predicho en base a NTL VS PIB/píxel, 2013-2019	16
Gráfico 3	Régimen de lluvia en los países centroamericanos, 2013-2019.....	18
Gráfico 4	Distribución de los Z-scores de los días lluviosos, 2013-2019.....	20
Gráfico 5	Índice mensual de lluvias extremas (promedio por país), 2013-2019	20
Gráfico 6	Impacto económico de las lluvias extremas en función del nivel de cobertura boscosa.....	33
Gráfico 7	Distribución de los píxeles en base al promedio del NDVI y sus NTL	34
Gráfico 8	Simulación del impacto económico de las lluvias extremas con la cobertura boscosa actual (gris)VS cobertura mejorada (naranja), 2013-2019.....	36
Gráfico A1	<i>PIB (constante US\$ 2010)</i>	44
Gráfico A2	<i>Tasa de crecimiento del PIB (en%)</i>	44
Gráfico A3	<i>Pérdidas por lluvias extremas por país por año (US\$ 2010 millones)</i>	45
Gráfico A4	<i>Pérdidas por lluvias extremas por país por año (en % del PIB)</i>	45
Gráfico A5	<i>Variación temporal del NDVI promedio por país, Centroamérica, 2013-2019</i>	47
Gráfico A6	<i>Distribución del NDVI promedio por año, Centroamérica, 2013-2019</i>	47

Mapas

Mapa 1	Imagen aleatoria de luces nocturnas mensuales (NTL) VIIRS en Centroamérica	14
Mapa 2	Luces nocturnas en San José, Costa Rica, 2017	16
Mapa 3	Distribución espacial de las lluvias en Centroamérica: precipitación acumulada 2013-2019 (mm/año)	18
Mapa 4	NDVI para Centroamérica.....	22
Mapa A1	Panamá – Luces nocturnas promedio S1 2016	46
Mapa A2	Panamá – Luces noviembre 2016 – Lluvias extremas por T.T. OTTO	46

Resumen

Este estudio evalúa empíricamente cómo la cobertura boscosa puede reducir el impacto de las lluvias extremas en la actividad económica de Centroamérica. Para esos fines, construimos un panel de datos usando observaciones de la tierra provenientes de imágenes satélites. La actividad económica es medida a través de las luces nocturnas y las lluvias extremas son caracterizadas usando series de lluvias diarias con alta resolución espacial. Finalmente, evaluamos y mapeamos la cobertura boscosa y vegetal usando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Nuestros resultados muestran que, en promedio, entre 2013 y 2019, las lluvias extremas han tenido un impacto económico negativo de entre un -1,9% y un -2,4% del PIB al año. El análisis también evidencia cómo el impacto marginal de estas lluvias es diferenciado en el territorio y se reduce en las zonas con mayor cobertura boscosa y vegetal. Esto nos permite cuantificar los beneficios económicos de un incremento de la cobertura boscosa: un NDVI regional promedio un 4% más alto hubiese reducido el impacto económico de las lluvias extremas a la mitad. Estos resultados indican que la conservación y restauración de bosques constituye una estrategia eficiente para adaptarse al cambio climático e ilustran la necesidad de pensar las políticas públicas de forma integral, analizando simultáneamente sus dimensiones económicas, sociales y ambientales.

Introducción

Desde la Cumbre sobre la acción climática convocada por el Secretario General de las Naciones Unidas el pasado 23 de septiembre 2019, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) son reconocidas como una de las áreas de acción prioritarias para cumplir con las metas establecidas en el Acuerdo de París sobre el Clima.¹ Las SBN se definen como aquellas soluciones a desafíos a los que se enfrenta la sociedad que están inspiradas y respaldadas por la naturaleza; que son rentables y proporcionan a la vez beneficios ambientales, sociales y económicos, y ayudan a aumentar la resiliencia climática. Abarcan la protección, restauración y el manejo sostenible de los ecosistemas. Representan una alternativa prometedora para enfrentar el cambio climático ya que incorporan un enfoque integral para afrontar simultáneamente los desafíos de mitigación y adaptación en tanto se protege a la biodiversidad y el bienestar humano. De esta manera las SBN buscan reducir los dilemas y promover sinergias entre los objetivos de desarrollo sostenible.

La conservación y restauración de bosques constituye una SBN con múltiples co-beneficios. La conservación y restauración de bosques asegura que los ecosistemas vinculados a estas zonas puedan seguir proporcionando los bienes y servicios esenciales para el bienestar humano que son la regulación atmosférica y climática, el suministro de recursos naturales, la provisión de hábitat para la fauna y la flora silvestre y la oferta de servicios culturales, estéticos y recreativos, entre otros (Costanza et al. 1997). Adicionalmente, los bosques ofrecen un amplio abanico de opciones para la mitigación del cambio climático que van desde la captura y secuestro de carbono en el suelo hasta la capacidad de proveer productos de madera e insumos de baja intensidad energética (Nabuurs et al. 2007). La restauración y conservación de bosques también favorece la regulación y disponibilidad hídrica, facilitando así la adaptación a eventos meteorológicos extremos.

¹ Para más información sobre los compromisos y avances de esta cumbre ver: <https://www.un.org/es/climatechange/climate-action-coalitions>.

Finalmente, una política pública de conservación y restauración de bosques articulada con una estrategia de desarrollo sostenible más amplia genera nuevos empleos y potencia sectores intensivos en mano de obra como, por ejemplo, el turismo sostenible, la gestión forestal sostenible o la valorización de los recursos medicinales y genéticos (ILO-WWF, 2020).

Este estudio se enfoca en uno de los beneficios poco analizado de las políticas de restauración y conservación de bosques: su potencial para reducir el impacto económico de las lluvias extremas. Desde hace ya más de 30 años existe una amplia literatura proveniente del campo de la hidrología que ha demostrado cómo los suelos con alta cobertura boscosa y vegetal se asocian con mejores propiedades hidráulicas (ver por ejemplo Colin, C., 1987). Esta investigación se fundamenta en esa literatura y busca evaluar empíricamente cómo la cobertura boscosa puede reducir el impacto económico de las inundaciones en seis países centroamericanos entre 2013 y 2019 (i.e. Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá). En términos de economía política, el éxito de las políticas públicas basadas en la naturaleza es condicionado por la capacidad de identificar, cuantificar y visibilizar los múltiples co-beneficios que conllevan este tipo de acciones. Lo anterior es clave para coordinar grupos de intereses diversos, incluyendo la sociedad civil, el sector privado, la academia y las comunidades indígenas, y así estructurar una amplia coalición de actores. En este sentido este estudio busca contribuir al diseño de una política pública de restauración y conservación de bosques en Centroamérica mediante la cuantificación de uno de sus co-beneficios poco visibilizado y discutido en el debate público.

El papel de la cobertura boscosa para reducir la vulnerabilidad a eventos climáticos extremos recobra importancia en un contexto en el que los regímenes de lluvias están siendo alterados y las proyecciones climáticas indican que estos efectos seguirán agudizándose en los próximos años. Las proyecciones climáticas para la segunda mitad de siglo indican que las condiciones climáticas variarán sustancialmente en América Central pero esta modificación no se hará de manera uniforme en la parte norte y en la parte sur del istmo. En los países del norte (Nicaragua, El Salvador, Honduras y Guatemala) se proyectan disminuciones de la lluvia entre el 5 % y el 10 % y se prevé un aumento en la temperatura de 3° C, mientras tanto, en los países del sur (Costa Rica y Panamá) se proyecta una reducción menos marcada de la precipitación acumulada y un aumento en la temperatura un grado más que en el norte (Castillo et al., 2018). Durante la temporada de lluvias, se espera un aumento súbito en lluvias torrenciales como consecuencia de un ciclo hidrológico y diurno más intensificados, con mayor capacidad para presentar eventos extremos de lluvias y, con ello, una mayor propensión a inundaciones (Tabari, 2020).

Incrementar la resiliencia climática requiere de ajustes estructurales al actual estilo de desarrollo y políticas públicas que permitan enfrentar lluvias extremas más frecuentes e intensas. A pesar del crecimiento económico de los últimos años, el actual estilo de desarrollo de la región se traduce por un rápido crecimiento urbano en zonas expuestas a inundación, un inadecuado ordenamiento del territorio, una deforestación que sigue avanzando y brechas de pobreza persistentes (CEPAL 2020). Sin medidas para revertir estas tendencias, la combinación de estas brechas estructurales con las nuevas tendencias climáticas resultará en mayores y más frecuentes impactos económicos asociados a inundaciones. Ante esta realidad, la política pública puede instrumentar transformaciones estructurales fundamentales al actual estilo de desarrollo centroamericano que incluyen, además de una estrategia de precios (i.e. impuestos y subsidios, precios relativos etc.), impulsar nuevas regulaciones y promover soluciones basadas en la naturaleza e innovaciones tecnológicas verdes. Ello debe contribuir a reducir la vulnerabilidad climática y resulta fundamental para el diseño e implementación de las políticas públicas en el siglo XXI.

Este estudio recurre a Observaciones de la Tierra (i.e. Earth Observations) provenientes de imágenes satelitales para evidenciar cómo la cobertura boscosa puede actuar como protección natural para reducir el impacto económico de las lluvias extremas. Nuestros resultados muestran que, entre 2013 y 2017, las lluvias extremas han provocado pérdidas para la región centroamericana de entre un 1,9% y un 2,4% del PIB por año. El análisis también evidencia cómo el impacto marginal de estas lluvias es diferenciado en el territorio y se reduce en las zonas con mayor cobertura boscosa y vegetal. Esto nos permite simular el impacto de un incremento de la cobertura boscosa en las zonas urbanas y cuencas hidrográficas más vulnerables de la región: un aumento del 4% del NDVI promedio de la región hubiese reducido el impacto económico de las lluvias extremas a la mitad. Estos resultados sugieren que la conservación y restauración de bosques constituye una estrategia eficiente para adaptarse al cambio climático.

A continuación, la sección 2 presenta una breve revisión de la literatura existente y profundiza algunos de los aspectos metodológicos para la evaluación empírica del impacto económico de las lluvias extremas. La sección 3 describe las fuentes de datos usados, detallando qué tipo de Observaciones de la Tierra y satélites se usaron. En las secciones 4 y 5 se analizan los resultados de los modelos econométricos y se conduce una simulación en la que se estima, en términos monetarios, el potencial de protección para la región ofrecido por la cobertura boscosa y vegetal. La sección 6 concluye y plantea consideraciones para la política pública.

I. Aspectos metodológicos y literatura existente

Analizar el impacto económico de las lluvias extremas requiere superar dos problemas tradicionales identificados por la literatura sobre el impacto económico de los desastres: i) la selección de variables pertinentes y exógenas para caracterizar la intensidad de las lluvias extremas y ii) la adopción de una medida de actividad económico espacialmente desagregada para captar los impactos locales de las lluvias extremas.

La literatura sobre el impacto económico de los desastres tradicionalmente ha recurrido a una ecuación que utiliza datos ex-post sobre los daños económicos y/o humanos provocados por los desastres como principal variable independiente y alguna medida del desarrollo económico como variable dependiente. Sin embargo, este enfoque es problemático, ya que los datos sobre el impacto de los desastres son, por esencia, una variable endógena: los daños humanos y económicos asociados a fenómenos naturales son funciones de los niveles de vulnerabilidad de la zona afectada que, a su vez, dependen del nivel de desarrollo económico de esas mismas zonas (Felbermayr, Gröschl, 2014; Hallegatte et al., 2007). Aunque algunos autores sostienen que esta causalidad inversa no es un problema porque el crecimiento económico sólo podría reducir la vulnerabilidad a largo plazo (Noy, 2009; Raddatz, 2009; Loayza, 2012), es muy probable que el uso de este tipo de datos ex-post introduzca un sesgo por variables omitidas y errores de medidas. Por lo anterior, en este estudio se basa exclusivamente en las características físicas y meteorológicas de las lluvias extremas (ver sección siguiente para la definición de lluvias extremas) y excluye los pocos datos disponibles sobre los impactos de las inundaciones ya que los mismos son, por esencia, endógenos.

Por otro lado, los impactos de las lluvias extremas suelen ser intrínsecamente locales. Muchas veces, las inundaciones se circunscriben a algunas provincias y, más importante aún, presentan una fuerte heterogeneidad espacial. En este contexto, usar medidas de actividad económica agregadas a nivel nacional puede inducir un "sesgo de agregación" que subestima o incluso hace desaparecer el impacto que los desastres pueden tener en la actividad económica local (Strobl, 2011). Dicho de otra forma, es difícil captar plenamente el impacto de un fenómeno local como son las lluvias extremas usando mediciones nacionales como el PIB del país.

Para afrontar estos problemas, este estudio plantea una metodología alternativa: usar las imágenes satelitales de luces nocturnas como un proxy para la actividad económica local. Las luces nocturnas (Night-

Time Lights o NTL por sus siglas en inglés) captadas a través de imágenes de satélite han sido identificadas como un excelente proxy para distribuir espacialmente los asentamientos humanos y la intensidad de algunas actividades humanas (Elvidge et al., 1999, 2009). Desde los trabajos de Chen y Nordhaus en 2011 y Henderson, Storeygard y Weil (2011, 2012), los economistas utilizan ampliamente estas imágenes satelitales para aproximar el nivel de actividad económica en un área geográfica determinada. Aprovechando el hecho de que las luces nocturnas se ven afectadas por eventos naturales adversos, en años más recientes, varios análisis innovadores han evaluado el impacto económico de los huracanes y de los terremotos mediante la variación de estos NTL (Elliott et al., 2015; Ishizawa et al., 2017; Lessmann and Sofke, 2019; Del Valle et al., 2020). Basándonos en esta literatura, adaptamos la metodología usada por esos autores con el fin de medir el impacto de las lluvias extremas sobre la actividad económica local medida mediante las luces nocturnas.

Existe una amplia literatura científica proveniente del campo de la hidrología que demuestra cómo los suelos con alta cobertura boscosa se asocian con mejores propiedades hidráulicas y, por lo tanto, un riesgo de inundaciones reducido (Colin, 1987; Lunka and Patil, 2016; Iacob et al., 2017; Chandler et al., 2018; Emma et al., 2019). Un alto grado de cobertura boscosa y vegetal permite reducir el impacto de las inundaciones mediante dos grandes tipos de efectos. Primero, la cobertura boscosa reduce la escorrentía facilitando la infiltración del agua en el suelo. Esto se debe a que los árboles captan y retienen agua para su consumo propio y, a la vez, sus raíces proporcionan canales por los que el agua fluye profundamente en el suelo y, potencialmente, llega hasta los acuíferos. El suelo se convierte así en un depósito que absorbe el agua cuando llueve y que la libera lentamente cuando no llueve. Segundo, las raíces y los hongos asociados a una importante cobertura boscosa ayudan a mantener el suelo unido y limitar la erosión. Estos ecosistemas son más propicios a la formación de materia orgánica del suelo, lo cual mejora la estructura del suelo y facilita la absorción y drenaje de agua. Por lo contrario, la deforestación empobrece el contenido orgánico del suelo y provoca mala absorción del agua en el suelo además de un incremento de la erosión. A través de la erosión, el suelo es arrastrado y contribuye a la sedimentación de los ríos y cauces, reduciendo así su capacidad de flujo y exacerbando aún más el riesgo de inundaciones. La cobertura boscosa también actúa para proteger el suelo de los vientos y limitar la erosión. En su conjunto estos factores reducen la escorrentía, al menos hasta que el suelo se sature, limitan la erosión e, in fine, reducen la probabilidad de que las lluvias extremas se conviertan en inundaciones. De hecho, el efecto de la cobertura boscosa ha sido cuantificado en varios análisis y Marshall et al. (2014), por ejemplo, encuentran que la replantación de árboles reduce la densidad aparente del suelo cercano y permite aumentar la velocidad a la que el suelo absorbe el agua en 67 veces. Otro trabajo de investigación llevado a cabo por el Flood Risk Management Research Consortium de Inglaterra (FRMC, 2018) estima que la reforestación de la cuenca estudiada reduciría los picos de las inundaciones río abajo en alrededor del 50%. Partiendo de esta base científica, este estudio analiza cómo, en el contexto centroamericano, la cobertura boscosa y vegetal permite reducir el impacto de las lluvias extremas en la actividad económica.

Es importante aclarar que nos concentramos aquí sobre el impacto económico de las inundaciones y no sobre las pérdidas físicas provocadas por las mismas. Este estudio no calcula las pérdidas correspondientes a infraestructura dañada o afectada por las lluvias, sino que busca cuantificar el efecto de las lluvias extremas sobre la producción agregada². Al usar este tipo de medidas estamos captando un impacto sobre el flujo de la producción y no un impacto en términos de destrucción de activos físicos o impacto al stock de capital. Por ello, los resultados de este análisis no tienen que ser comparados con las evaluaciones de daños y pérdidas directas llevadas a cabo después de un evento, sino que representan un esfuerzo complementario destinado a ampliar el entendimiento del impacto económico de las lluvias extremas.

² A modo de ejemplo podríamos decir que no calculamos el precio que cuesta reponer un poste de luz caído o dañado, sino que medimos la disminución de la luminosa nocturna captada por el satélite que puede resultar de (i) la afectación directa del poste de luz o (ii) de la afectación a la red de transmisión o de la interrupción de la capacidad de generación eléctrica. Usamos luego esta variación de luces nocturnas para aproximar el impacto en términos de producción agregada.

II. Observaciones de la Tierra para Centroamérica

En los últimos años, la generación y difusión de Observaciones de la Tierra³ ha aumentado considerablemente, impulsando toda una serie de nuevas aplicaciones. Esta nueva fuente de información ha demostrado ser particularmente útil para captar el estado y los cambios del uso de suelos y de los ecosistemas. Mediante mediciones recurrentes y georreferenciadas, las Observaciones de la Tierra aportan datos empíricos muy valiosos a la hora de examinar temas de desarrollo sostenible. Aprovechando estos avances, este análisis recurre a Observaciones de la Tierra proporcionadas por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA – National Oceanic and Atmosphere Administration). Estas imágenes están en libre acceso en internet. A continuación, se presenta los tres tipos de datos usados en este estudio: (i) los datos de luces nocturna y de actividad económica, (ii) los datos de lluvias y de lluvias extremas y, finalmente, (iii) los datos de cobertura vegetal y boscosa.

A. Las luces nocturnas y la actividad económica

Para medir la actividad económica local usamos datos de luces nocturna provenientes del satélite Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) proporcionados por la NOAA/NCEI. Usamos aquí el compuesto mensual del VIIRS que promedia la cantidad de luz captada por esos satélites los días donde el nivel de nubosidad lo permite⁴. La resolución espacial de estas imágenes es de 4 arco segundos (equivalentes a aproximadamente píxeles de unos 500*500m al ecuador) y se ilustra un mes aleatorio de estas imágenes satélites para los 6 países centroamericanos de interés en el mapa 1. La metodología para la obtención de estos datos se detalla en Elvidge et al. (2017).

³ Las observaciones de la Tierra (o *Earth Observations* en inglés) pueden definirse como la recopilación de información sobre los sistemas físicos y biológicos del planeta mediante imágenes de satélite y tecnologías de teledetección remota.

⁴ Para más información y acceso a los archivos tiles de las luces nocturnas ver: <https://payneinstitute.mines.edu/eog/nighttime-lights/>

Mapa 1
Imagen aleatoria de luces nocturnas mensuales (NTL) VIIRS en Centroamérica



Fuente: Autores en base a VIIRS, NOAA/NCEI.

Estas luces nocturnas constituyen un proxy muy poderoso para la actividad económica: de manera similar a lo que pasa con el consumo de electricidad, la intensidad y distribución espacial de las luces nocturnas aumenta conforme va incrementando el ingreso. Con el fin de ilustrar esta relación para Centroamérica, el gráfico 2 relaciona el PIB por píxel de cada país con el promedio anual de los NTL dividido por píxel. La relación claramente positiva y la fuerte asociación entre PIB y NTL es consistente con las investigaciones anteriores que han examinado la correlación entre NTL-VIIRS y PIB en diferentes contextos geográficos (Chen and Nordhaus, 2015; Zhao et al., 2017)⁵.

Para analizar estadísticamente esta relación y obtener un factor de conversión entre luces nocturnas y PIB, estimamos la ecuación siguiente:

$$PIB/pix_{it} = \alpha + \beta_{NTL} \ln(NTL/pix_{it}) + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Donde el subíndice t corresponde a un año, PIB/pix es el PIB en US\$ constantes de 2010 dividido entre la cantidad de píxeles del país i , $\ln(NTL/pix)$ es el logaritmo natural del promedio anual de las luces nocturnas del país i dividido entre la cantidad total de píxeles de este país i . Épsilon es el término de error.

Estimamos esta relación con MCO y errores estándares robustos. El coeficiente β_1 es estimado en 189.4 con un error estándar de 11.14, sugiriendo una relación positiva y altamente significativa entre las dos variables. Con un R^2 de 0.88 el poder explicativo de nuestra especificación también es muy alto (recuadro 1). Cabe señalar que no pretendemos aquí establecer una relación causal entre variables, sino que buscamos sencillamente un factor de conversión entre ellas. Para asegurarnos de que este modelo

⁵ Los procesos para construir el valor de las luces VIIRS limpian los datos brutos captados por el satélite para remover ruidos y luces directas provenientes de la luna o del sol. Estos procesos son automatizados y siguen una metodología donde se deduce un monto del valor bruto de las luces. Este proceso se ve a veces afectado por el resplandor del aire (i.e. *airglow*) y deduce un monto superior a la luz captada, lo que da lugar a valores de NTL negativos (Uprety, et al. 2017). Al no tener ninguna forma posible de depurar los datos subyacentes, fijamos manualmente en 0 los datos con valores negativos (i.e. menos del 1% del conjunto de las observaciones).

permita obtener un factor de conversión robusto entre PIB y NTL, graficamos el PIB/píxel proporcionado por la base de datos WDI del Banco Mundial contra el PIB/píxel estimado mediante la regresión lineal explicitada en la ecuación 1. Como puede observarse en la gráfica 2, la mayoría de los puntos están cerca de la línea de 45°, revelando un buen ajuste y un modelo que produce estimaciones del PIB aceptables⁶.

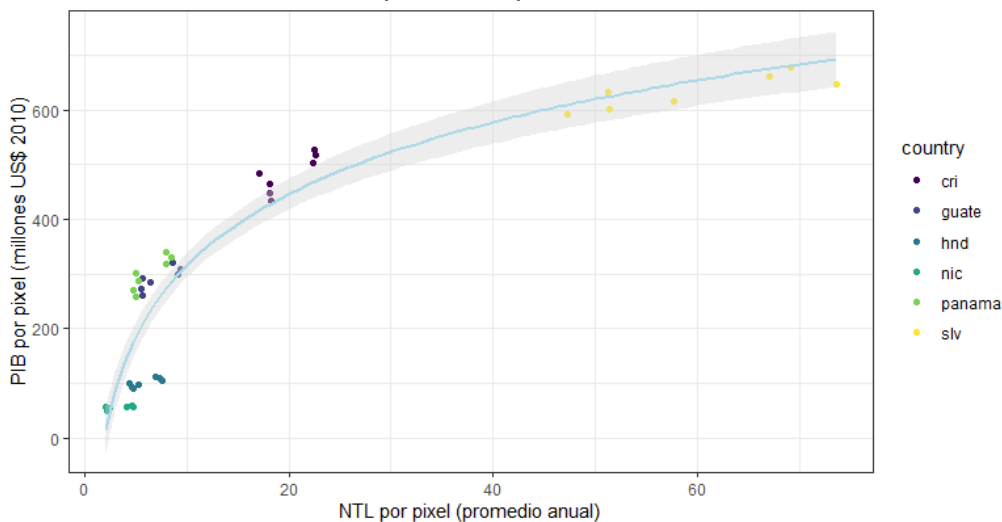
Cuadro 1
Resultados de la regresión PIB/píxel VS NTL/píxel

	Variable dependiente
	PIB/píxel
Ln NTL/pix	189,40*** (11,14)
Constante	-120,98*** (27,75)
Observaciones	42
R2	0,88
Adjusted R2	0,88
Residual Std. Error	72,28 (df = 40)
F Statistic	289,19*** (df = 1; 40)

Fuente: Autores en base a VIIRS, NOAA/NCEI y WDI Banco Mundial.

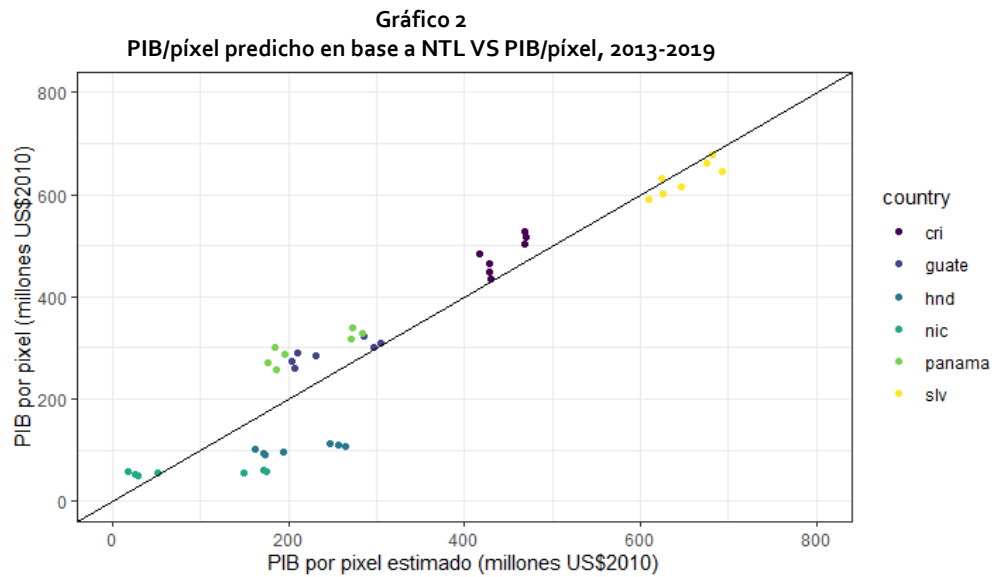
Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

Gráfico 1
NTL/píxel VS PIB/píxel, 2013 - 2019



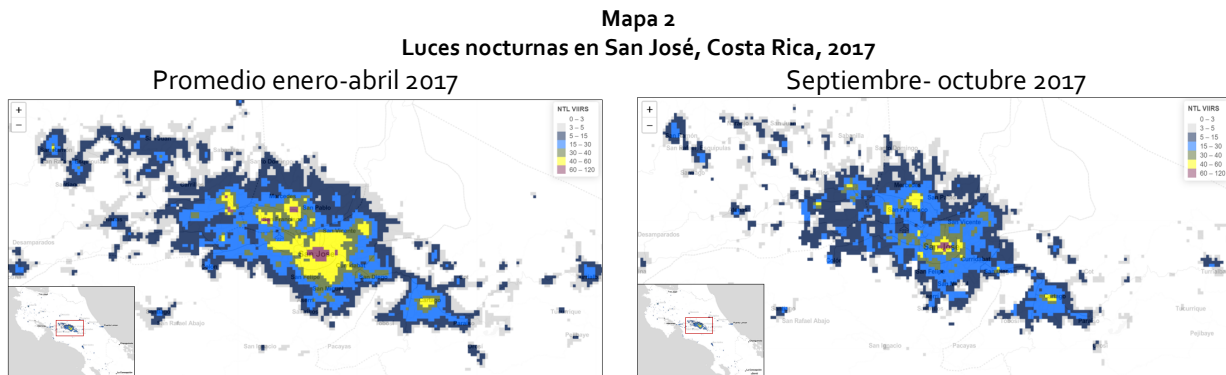
Fuente: Autores en base a VIIRS, NOAA/NCEI y WDI Banco Mundial.

⁶ Las predicciones de PIB más alejadas son las de Honduras y Nicaragua y una posible explicación podría ser que estos países se caracterizan por un peso relativo del sector agropecuario más importante en el PIB y por lo tanto una menor correlación entre luces nocturnas y PIB agregado.



Fuente: Autores en base a VIIRS, NOAA/NCEI y WDI Banco Mundial.

Antes de seguir, procedemos a algunos análisis visuales del comportamiento de las luces nocturnas en casos donde se han reportado fuertes afectaciones por inundaciones. A modo de ilustración, seleccionamos el caso de Costa Rica durante los meses de setiembre y octubre 2017. El mes de octubre fue marcado por el huracán Nate que se constituyó como tormenta tropical el 4 de octubre en el mar Caribe cerca de la isla de San Andrés. Aunque Nate no haya pasado directamente por el territorio costarricense, generó grandes cantidades de lluvia por la nubosidad que el fenómeno atrajo desde el Pacífico y, según el Instituto Nacional de Meteorología de Costa Rica (IMN), en algunas zonas se registraron en 24 horas la lluvia correspondiente al promedio de todo el mes de octubre. Anteriormente, el mes de setiembre fue marcado por varios episodios de lluvias intensas y aguaceros como por ejemplo el del 23 de setiembre donde el IMN reportó un acumulado de lluvia de más de 78mm en 24 horas en San José y se registraron varias inundaciones en la capital. Para evaluar visualmente estos impactos en los NTL, el mapa 2 compara las luces nocturnas en San José durante un periodo de referencia (e.g. promedio de las luces de enero a abril 2017) con las luces de setiembre-octubre 2017. Esta comparación confirma una clara disminución tanto en la extensión espacial como en la intensidad de los NTL. Estos análisis visuales se repitieron para varias inundaciones en las que se reportaron importantes afectaciones en otros países y revelan un descenso notable de los NTL en el momento del impacto, confirmando la adecuación de estos datos para medir el impacto de las lluvias extremas (ver anexo).



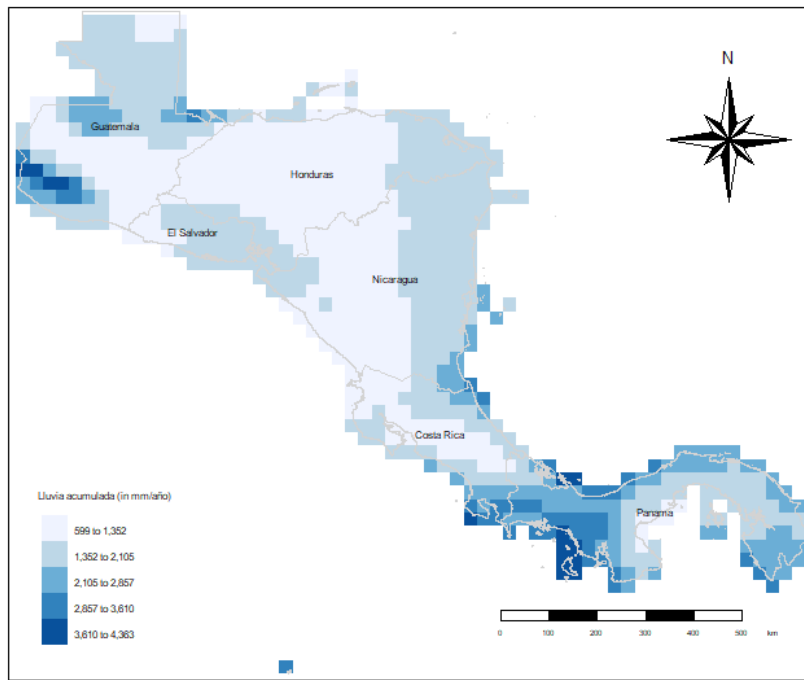
B. Régimen de lluvia y lluvias extremas

Los datos de lluvias que usamos para este estudio provienen del producto CMORPH (i.e. CPC MORPHing technique) de la *NOAA Climate Data Record* (CDR). CMORPH produce análisis de precipitaciones globales con una resolución espacial y temporal muy alta basándose en las estimaciones de precipitaciones obtenidas por al menos 4 satélites de órbita baja⁷ (ver Xie et al. 2017 para la metodología detallada). La resolución que seleccionamos para nuestro análisis es de 0. 25° (aproximadamente 27-28km) y de un dato por día. Esto significa que para los países centroamericanos de interés tenemos casi 900 pixeles que contienen cada uno un dato de lluvia diario para los 7 años que abarca nuestro análisis (i.e. 2013-2019).

Un rápido análisis del régimen de lluvias para la región durante los años 2013-2019 ayuda a entre mejor la distribución espacial y temporal de las precipitaciones. El mapa 3 revela cómo la lluvia acumulada varía fuertemente de una zona geográfica a otra: mientras que el istmo panameño la mayoría de los pixeles tiene niveles de lluvia anual acumulada por encima de los 2,800 mm/año, las zonas del “corredor seco” entre Guatemala, Honduras y Nicaragua se caracterizan por lluvias acumuladas por debajo de los 1,300mm/año en promedio. Por otro lado, las precipitaciones se concentran durante la temporada lluviosa que empieza en mayo y suele terminar entre noviembre y diciembre, siendo los meses de junio, septiembre y octubre los más lluviosos (gráfico 3). Finalmente, para el periodo de análisis, el año 2015 se caracteriza como el año con la temporada de lluvias con menos precipitaciones mientras que se registraron los niveles de precipitaciones más altos durante la temporada lluviosa del año 2017.

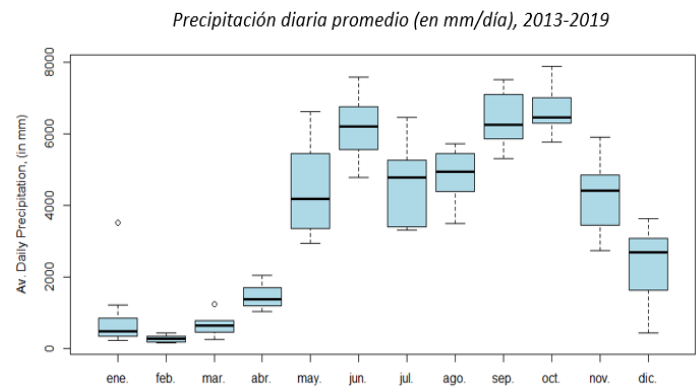
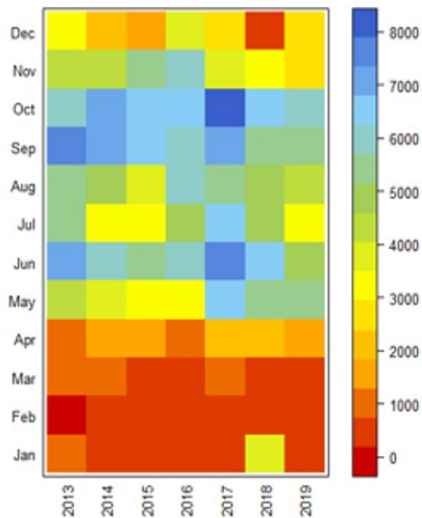
⁷ Actualmente CMORPH incorpora las estimaciones de precipitación derivadas de las microondas pasivas a bordo de los siguientes satélites: DMSP 13, 14 y 15 (SSM/I), NOAA-15, 16, 17 y 18 (AMSU-B), y AMSR-E y TMI a bordo de las naves espaciales Aqua y TRMM, respectivamente. CMORPH también produce estimaciones de las tasas de lluvia cada 3 hora, pero preferimos las observaciones diarias ya que se caracterizan por una menor incertidumbre. Para más información y acceso a datos ver: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph.shtml>.

Mapa 3
Distribución espacial de las lluvias en Centroamérica: precipitación acumulada 2013-2019 (mm/año)



Fuente: Autores en base a CMROPH, NOAA/CDR.

Gráfico 3
Régimen de lluvia en los países centroamericanos, 2013-2019
Precipitación diaria promedio (en mm/día), 2013-2019



Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Autores en base a CMROPH, NOAA/CDR.

Para poder definir adecuadamente las “lluvias extremas” es clave tomar en cuenta esta alta heterogeneidad espacial y temporal de las lluvias. Según el mes y el píxel considerado, un mismo nivel de precipitación puede representar un nivel muy por encima/debajo de lo que usualmente se recibe durante un día lluvioso en este píxel/mes.

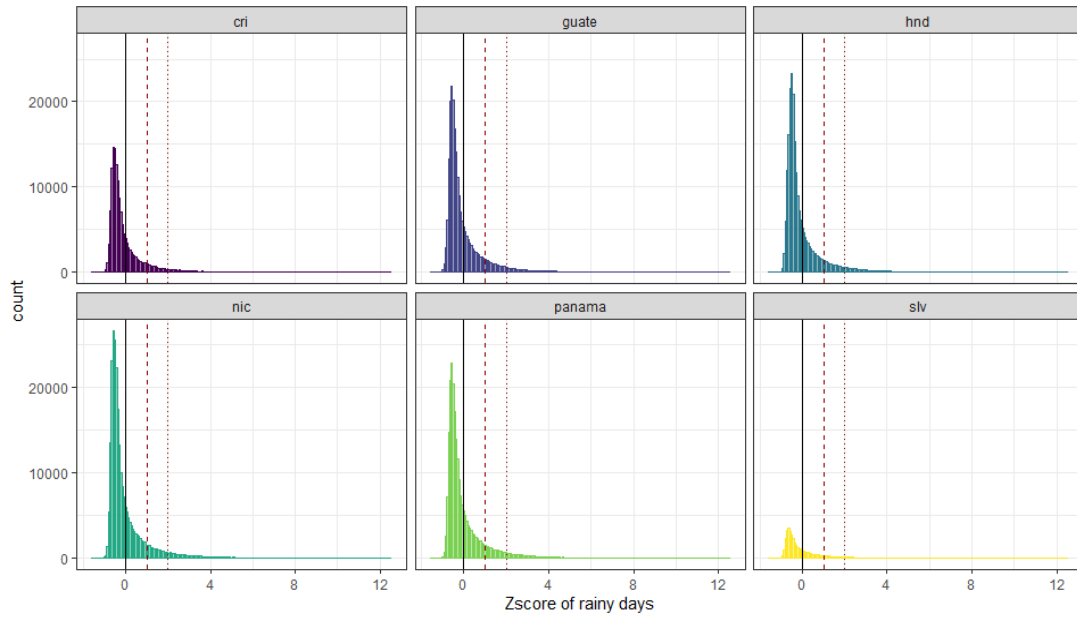
Un nivel absoluto de precipitaciones de, por ejemplo, 20 mm/día puede indicar situaciones de exceso/falta de agua, pero no constituye un indicador de lluvia extrema. Por ello, decidimos enfocarnos únicamente en los días lluviosos⁸ y adoptar un enfoque probabilístico usando la fórmula estadística tradicional del Z-score detallada a continuación:

$$Z_{d,m,j} = \frac{Rain_{d,m,j} - \overline{Rain}_{m,j}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_M (Rain_{d,j} - \overline{Rain}_{d,m,j})^2}}$$

Donde $Rain_{d,m,j}$ es la precipitación del día d en el mes m, en el píxel j y $\overline{Rain}_{m,j}$ es el promedio de precipitación caído en los días lluviosos del mes m en el píxel j. El Z-score es por lo tanto la diferencia entre la precipitación del día d en un píxel/mes dado y el promedio de precipitaciones durante los días lluviosos en este mes/píxel, medido en términos de desviación estándar de los días lluviosos en este píxel/mes. Dicho de otra forma, el Z-score nos indica que tan “extrema” es la precipitación del día d comparando con la distribución de los días lluviosos en el mes m del píxel j. Este enfoque probabilístico permite tomar en cuenta la pluviometría específica de cada territorio y, en la gráfica 4, vemos como la distribución de los Z-scores de los días lluviosos es muy similar entre los países (aunque el nivel absoluto de precipitaciones sea distinto). Esta gráfica se lee de la siguiente manera: un Z-score por debajo de 0 indica un día de lluvia por debajo del promedio de los días lluviosos en este mes/píxel. Un Z-score por encima de 1 indica un día de lluvia una desviación estándar por encima del promedio de los días lluviosos en este mes/píxel. De las más de 1,1 millones de observaciones de días lluviosos que tenemos, más del 10% de ellas están por encima de 1 y solo el 5% por encima de 2 desviaciones estándares.

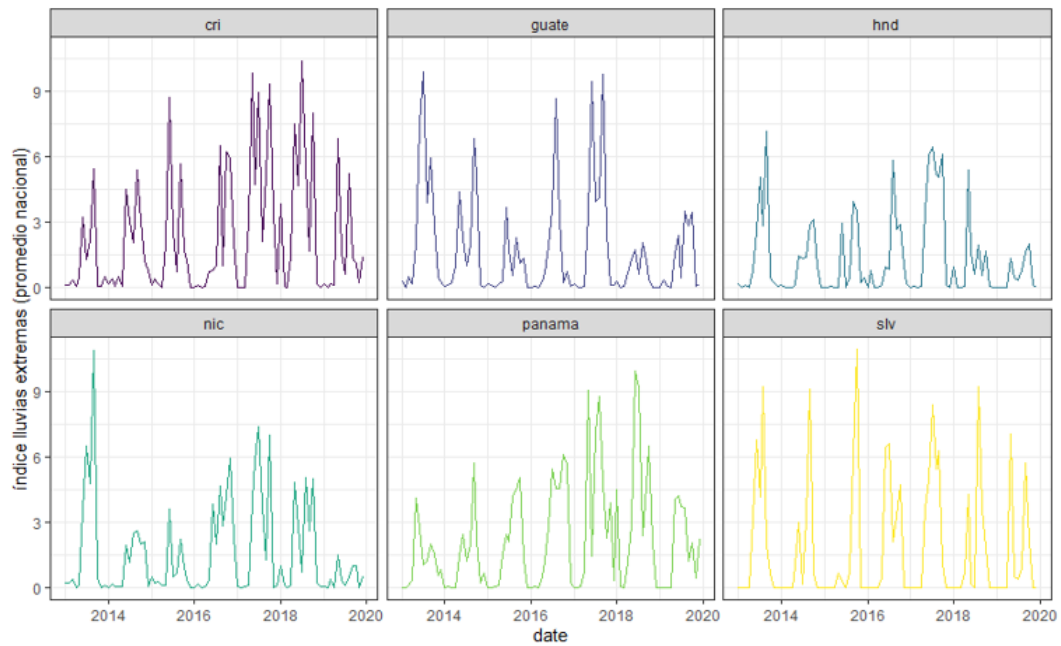
⁸ Para un píxel dado, comparar las precipitaciones diarias a la precipitación diaria promedio del periodo de interés da una indicación del carácter húmedo/seco de este periodo. Sin embargo, nos interesa aquí caracterizar si la intensidad de las precipitaciones en un día dado. Por ello comparamos la cantidad de precipitaciones diaria contra el promedio de precipitaciones en días lluviosos (y no la precipitación diaria promedio).

Gráfico 4
Distribución de los Z-scores de los días lluviosos, 2013-2019



Fuente: Autores en base a CMROPH, NOAA/CDR.

Gráfico 5
Índice mensual de lluvias extremas (promedio por país), 2013-2019



Fuente: Autores en base a CMROPH, NOAA/CDR.

Una vez normalizada nuestra serie de días lluviosos, agregamos las observaciones diarias a nivel mensual para construir el índice de lluvias extremas que usaremos en nuestro análisis econométrico. Al representar aproximadamente el 10% de los días lluviosos más “inusuales”, consideramos que las observaciones con Z-score por encima de 1 son días con desviaciones significativas de lluvia o, dicho de otra forma, días con alta intensidad de lluvia⁹. Este límite del 10% suele ser empleado para detectar eventos hidrometeorológicos extremos (Tylkowski and Hojan, 2018). Luego, analizamos el comportamiento temporal de estos días de lluvias intensas. Fundamentándonos en la literatura hidrológica que relaciona lluvias extremas e inundaciones (Diakakis, M. 2012; J.C. Robbins, 2016), consideramos que, en promedio, se requiere por lo menos un día de lluvias intensas por semana para considerar que el mes seleccionado es un mes de lluvias extremas (esto es 4 desviaciones superior a 1 al mes). Esto evita contabilizar como mes de lluvias extremas un mes que registre un único día de lluvias intensas y busca tomar en cuenta el fenómeno de saturación de suelos anterior a la ocurrencia de una inundación. Cuando se detecta un mes de lluvia extrema, se calcula el índice de lluvias extremas mensuales sumando los Z-scores de todos los días de lluvia intensa. Cuando no se detectan las condiciones para un mes de lluvia extrema, el índice toma el valor 0. Como resultado de nuestra regla de detección, nuestro índice de lluvias extremas mensuales está compuesto por menos del 2% de los días lluviosos. Este índice de lluvias extremas mensuales es calculado para cada píxel y, para fines ilustrativos, la gráfica 5 muestra el comportamiento del índice promedio por país.

Es importante puntualizar que este índice de lluvias extremas no pretende ser una fórmula para detectar y cuantificar las inundaciones sino un indicador de la intensidad/ duración de las lluvias extremas diarias en un mes dado.

Lo que buscamos es captar las observaciones en la cola de la distribución de los días lluviosos de cada píxel y, al agregarlas mensualmente, identificar cuáles son los puntos más susceptibles de haber experimentado una inundación. En este sentido, un incremento en nuestro índice de lluvias extremas mensuales tiene que interpretarse como un aumento en la intensidad/ duración de las lluvias extremas diarias en este mes, lo cual incrementa la probabilidad de experimentar una inundación. Existen varias investigaciones que han logrado determinar límites empíricos de lluvias que, al ser rebasados, se asocian clara y fuertemente con la ocurrencia de inundaciones y deslizamientos (Martina et al., 2006; Anagnostopoulou and Tolika, 2012; Forestieri et al., 2016). Sin embargo, este tipo de análisis no se han podido incluir en esta investigación ya que requieren de modelos hidrológicos y cuantiosa información sobre, por ejemplo, la humedad del suelo. Adicionalmente, cabe recordar que el impacto económico de las inundaciones es la resultante de la interacción entre lluvias extremas, bienes y activos expuestos en las zonas afectadas y vulnerabilidad de estos mismos activos a las lluvias extremas. Como mencionado anteriormente, medir el impacto económico de las inundaciones mediante un dato ex post sobre la intensidad de la inundación (e.g. cantidad de muertos/afectados) nos expondría a un sesgo de endogeneidad ya que el impacto de las inundaciones es condicionado por el nivel de desarrollo de la zona afectada.

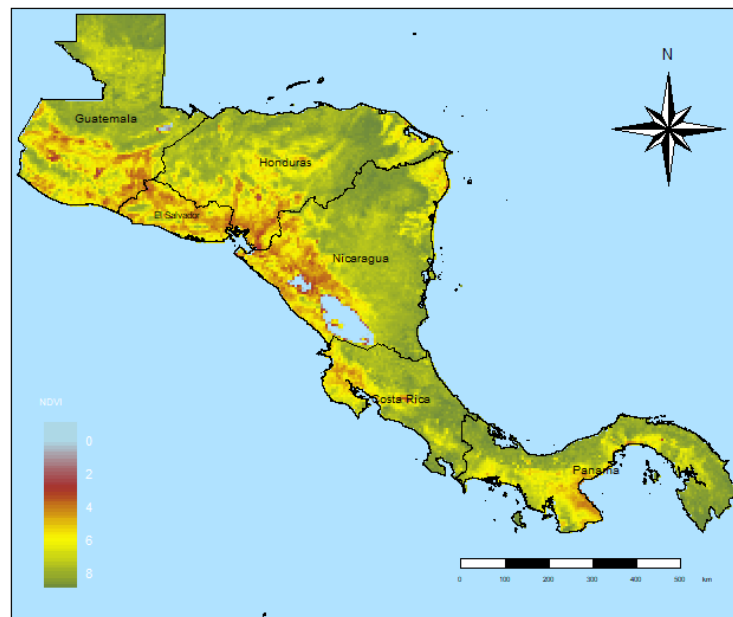
⁹ Esto es, de los 100 días de lluvia que recibe un píxel, consideramos los 10 días con mayor diferencia entre la precipitación diaria y el promedio de precipitación de los días lluviosos, medido en termino de desviación estándar. También usamos una definición alternativa en la que se considera un Z-score superior a 2. Al incluir menos del 5% de los días de lluvias, este límite alternativo es más restrictivo y se usa para realizar pruebas de sensibilidad de nuestros resultados en la sección siguiente.

C. La cobertura boscosa y vegetal

Finalmente, nos interesa conocer cómo ha ido evolucionando la cobertura boscosa y vegetal del territorio para evaluar en qué medida esta cobertura puede jugar el papel de protección natural en caso de lluvias extremas. Para esos fines usamos el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) proporcionado por el satélite MODIS. En diciembre de 1999, la NASA lanzó la nave espacial Terra, la nave insignia del programa del Sistema de Observación de la Tierra de la agencia. A bordo de Terra vuela un sensor llamado MODIS que es ahora ampliamente usado por la comunidad científica para medir el crecimiento de las plantas o el ritmo de deforestación. Este índice calcula la calidad y cantidad del cubierto vegetal presente en un territorio usando las propiedades físicas de las plantas. Un valor más alto del índice corresponde a mayor cubierto boscoso y vegetal¹⁰.

Medimos aquí el cubierto vegetal usando los datos mensuales del NDVI de MODIS con una resolución espacial de 0.05° (aunque el satélite proporcione una resolución espacial de hasta 250 metros de resolución). El NDVI para nuestra área de interés fue dividido por un factor 10^6 para facilitar su interpretación (Mapa 4). Por otro lado, los valores del NDVI exhiben una fuerte tendencia cíclica directamente vinculada a la temporada de lluvia. Para los análisis estadísticos de las secciones siguientes hemos usado el valor promedio anual de los NDVI ya que nos interesa conocer cuál es la calidad y cantidad de la cobertura boscosa y vegetal, independientemente de sus variaciones temporales (véase anexo).

Mapa 4
NDVI para Centroamérica



Fuente: Autores en base a MODIS, TERRA, NASA.

¹⁰ Toda la información sobre este satélite y la data se pueden conseguir en la siguiente página: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>.

El recuadro 2 ofrece un resumen estadístico de nuestras tres variables de interés para el periodo 2013-2019. Para poder llevar a cabo nuestro análisis estadístico ajustamos la resolución espacial del NDVI y de los NTL a un nivel de resolución compatible con nuestros datos de lluvias extremas (i.e. resampling a 0.25°). Re-escalamos los NDVI usando el promedio del valor de cada observación contenida en los píxeles de interés mientras que para los NTL sumamos los valores de luces agrupados en el nuevo píxel. Aunque esta resolución espacial sea notablemente más baja que la de los datos de luces y cubierto boscoso subyacentes, es considerada adecuada por dos razones: (i) la correlación espacial entre lluvias extremas e impacto de las inundaciones puede ser limitada con una alta resolución espacial pero aumenta mecánicamente al reducir la resolución; (ii) los valores de las luces nocturnas VIIRS sumados a resoluciones más bajas predicen la actividad económica con menor incertidumbre (Chen and Nordhaus, 2015). Este periodo y esta escala geográfica son los que se usan para el análisis econométrico de las secciones 4 y 5.

Cuadro 2
Resumen estadístico de las variables de interés a nivel de píxel, 2013-2019

	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Luces Nocturnas	1 139,5	2 239,3	0,0	41 669,1
Índice Lluvias Extremas	1,75	4,32	0,0	33,2
Índice NDVI Anual	7,40	0,89	-0,63	8,70

Fuente: Cálculos propios.

III. El impacto de las lluvias extremas en la actividad económica

El objetivo principal de este análisis es medir el potencial de la cobertura boscosa y vegetal para reducir el impacto de las lluvias extremas en la actividad económica local. Para poder llevar a cabo este análisis tenemos primero que evaluar el impacto de las lluvias extremas en la actividad económica medida en términos de luces nocturnas.

A. Marco conceptual

Para ello, estimamos un modelo de datos de panel con efectos fijos en el que las unidades de observación son combinaciones de píxel/mes y nuestro panel equilibrado cuenta con más de 71,000 observaciones (854 pixeles para el período 2013-2019). Primero utilizamos un marco conceptual estándar y bien establecido para evaluar el crecimiento económico. Siguiendo a Mankiw et al. (1992), Islam (1995), y la mayoría de los modelos empíricos posteriores sobre crecimiento económico, estimamos un modelo dinámico de tasa de crecimiento de las luces nocturnas que incluye los NTL rezagados y nuestra variable de lluvias extremas como variables explicativas (Skidmore and Toya, 2002; Noy, 2009; Loayza y otros, 2012; Felbermayr, Gröschl, 2014). Nuestra especificación básica toma la siguiente forma:

$$\Delta \ln Y_{i,t} = \alpha \ln Y_{i,t-1} + \beta_1 Xtrm_{i,t} + \omega_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

Donde $\Delta \ln Y_{i,t} = \ln Y_{i,t} - \ln Y_{i,t-1}$ es la tasa de crecimiento de las luces nocturnas en el píxel i en el mes t y $\ln Y_{i,t-1}$ es el rezago del logaritmo de las luces nocturnas. $Xtrm_{i,t}$ es nuestro índice de lluvias extremas mensuales. Basándonos en la teoría económica y la literatura anterior, esperamos que el coeficiente β_1 sea negativo y significativo ya que las lluvias extremas generan daños al capital productivo y la infraestructura, interrumpen la actividad económica.

y reducen la productividad de los activos y por lo tanto resultan en una menor producción agregada, por lo menos en el momento del impacto.

ω_i son efectos fijos específicos para cada píxel que nos permiten controlar por la heterogeneidad inobservada que no varía en el tiempo y que está correlacionada con las lluvias extremas y la actividad económica. Aunque las lluvias extremas constituyen una variable exógena, se podría argumentar que las características geográficas y topográficas de algunos píxeles hace que se vean recurrentemente inundados, lo cual incentiva los agentes económicos a invertir más en protección a inundaciones y/o no localizar sus actividades económicas en esas zonas. δ_t son efectos fijos mensuales que controlan las tendencias temporales que afectan de forma común a todos los píxeles, como por ejemplo las posibles variaciones en la calidad de las imágenes satelitales en el tiempo o un shock externo como un incremento del precio del petróleo. Por último, la larga dimensión temporal de nuestro panel (T=84) minimiza el posible sesgo que surge de la presencia de variables endógenas rezagadas en el lado derecho de la ecuación (Nickell, 1981).

Como enfoque alternativo, seguimos los estudios que evalúan los impactos de los desastres en la actividad económica en nivel (Del Valle et al. 2018; Ishizawa et al. 2019; Lessmann y Sofke 2019). En este contexto, hacemos una regresión del índice de lluvia extrema y su forma rezagada sobre el nivel de las luces nocturnas para poder dar cuenta de las dependencias temporales de un mes a otro. El modelo tiene la siguiente forma:

$$\ln Y_{i,t} = \sum_{j=0}^4 \beta_j \cdot (Xtrm_{i,t-j}) + \omega_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

Con esta especificación podemos investigar la cantidad de meses para los que encontramos coeficientes significativos de valores rezagados de los índices de lluvias extremas e ilustrar la evolución de los impactos de estas lluvias a lo largo del tiempo. Como es costumbre en la literatura sobre impactos climáticos, no incluimos otras variables de control (Yu y Babcock 2010, Del Valle et al. 2018, Ishizawa et al. 2019). También realizamos una prueba de raíces de unidad de panel estándar para investigar la posible no estacionalidad en nuestros datos de logaritmo de NTL, pero no encontramos pruebas de que esto fuera una preocupación¹¹. Por último, $\varepsilon_{i,t}$ son errores estándar robustos computados a la Driscoll y Kray (1998) para tomar en cuenta la dependencia transversal en nuestro panel.

B. Resultados empíricos

El recuadro 3 muestra los resultados de la regresión de nuestro índice de lluvias extremas en la tasa de crecimiento de las luces nocturnas (columna 1) y el nivel de las luces (columna 2-3). Las columnas 4 a 6 presentan los resultados de varias pruebas de robustez con diferentes especificaciones para las luces nocturnas y el índice de lluvias extremas mensuales.

En todos los modelos y con todas las especificaciones encontramos efectos negativos y estadísticamente significativos de las lluvias extremas en la actividad económica local. La magnitud del impacto marginal de las lluvias extremas es muy similar en nuestro modelo dinámico de crecimiento y en el modelo en nivel y, en ambos casos, el efecto es precisamente estimado.

¹¹ Para ambos modelos también realizamos una prueba de Hausman y confirmamos que el estimador de efectos fijos es adecuado. Por otro lado, se incluyeron efectos fijos por país, pero sin que eso modificara los resultados por lo que preferimos no incluirlos en nuestras regresiones de referencia.

Por otro lado, el coeficiente asociado al nivel inicial de los NTL es negativo y significativo, lo que sugiere efectos de convergencia: los pixeles con más luces (i.e. con relativamente más actividad económica) tienden a crecer más lentamente que los pixeles con valores de NTL más bajo.

Nuestros resultados indican que, en promedio, las lluvias extremas de intensidad media provocan una reducción de la tasa de crecimiento mensual de los NTL de 1,2 puntos porcentuales (p.p.). Esta interpretación cuantitativa corresponde al efecto marginal sobre el crecimiento de los NTL cuando el índice de lluvias extremas toma el valor promedio de la muestra. Se calcula multiplicando el coeficiente en la columna 1 por el valor promedio del índice de lluvias extremas (es decir, $1,75 * 0,007 * 100 = 1,2\%$). Cuando el índice de lluvias extremas está una desviación estándar por encima de la media (es decir, 6,08), el modelo predice que las lluvias extremas provocan una caída del crecimiento de las luces de 4,1 p.p. Los impactos marginales del modelo en nivel son consistentes y muy similares: en promedio, cuando un píxel experimenta un mes de lluvias extremas severas (i.e. cuando el índice está una desviación estándar por encima del promedio) sus luces nocturnas se reducen en un 4,1%. En ambos casos, estos resultados implican pérdidas sustanciales para Centroamérica: la tasa promedio de crecimiento de las luces nocturnas para el período 2013-2019 fue del 2,8%.

Cuadro 3
Resultados de las regresiones del impacto de las lluvias extremas sobre la actividad económica local

	Variable dependiente					
	Growth NTL (1)	Ln NTL (2)	Ln NTL (3)	Growth NTL (restr.) (4)	Ln NTL (restr.) (5)	Ln NTL (6)
Lag Ln NTL	-0,625*** (0,059)			-0,722*** (0,041)		
Xtrm rain	-0,007*** (0,002)	-0,007*** (0,003)	-0,007*** (0,003)	-0,006*** (0,002)	-0,007*** (0,002)	
Lag Xtrm rain			-0,006** (0,003)			
Lag2 Xtrm rain			0,003 (0,004)			
Lag3 Xtrm rain			0,0005 (0,004)			
Alt Xtrm rain						-0,005* (0,002)
Observaciones	70.882	71.736	60.720	69.921	70.660	71.736
F Statistic	17.940***	42,6***	19,5***	43.818***	90,8***	9,3***

Fuente: Elaboración propia.

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

En la columna 3 incluimos nuestro índice de lluvias extremas rezagado para explorar la presencia de un impacto económico duradero de las lluvias extremas. Conforme a lo que se observó en el terreno y en otros estudios de la literatura, no encontramos evidencia de un impacto económico local duradero de las lluvias extremas. Al mes siguiente del impacto, el coeficiente de lluvias extremas se reduce y se pierde un poco de precisión en la estimación mientras que en el segundo mes el coeficiente es positivo, pero deja de ser estadísticamente significativo. Esto implica que, en promedio, el impacto económico de las lluvias extremas persiste un mes después del shock, pero a los dos meses ya no encontramos impacto significativo y, por lo tanto, no tenemos evidencia de efecto de “rebote económico” dentro de un mismo píxel¹².

¹² Este resultado no excluye que algunos pixeles vecinos no afectados puedan beneficiarse de una inundación en el píxel afectado y experimentar un mayor crecimiento debido a este shock. Sin embargo, no es el objeto de este estudio analizar estas dinámicas espaciales.

Finalmente, realizamos varias pruebas de robustez para ambos modelos. Varios autores han señalado el ruido que puede potencialmente afectar las luces nocturnas VIIRS (Zhao et al, 2017, Skoufias et al., 2019). Este ruido puede deberse a los procesos de construcción del valor de las luces VIIRS, los cuales limpian los datos brutos captados por el satélite para tomar en cuenta luces directas y otros factores medioambientales que pueden afectar la calidad de la observación satelital. Estos procesos son automatizados y siguen una metodología donde se deduce un monto del valor bruto de las luces. Este proceso se ve a veces afectado por el resplandor del aire (i.e. ariglow) y deduce un monto superior a la luz captada, lo que da lugar a valores de NTL negativos (Uprety, et al. 2017)¹³. Para asegurarnos que nuestros resultados no fuesen condicionados por este tipo de impactos, decidimos correr ambos modelos con un panel que excluye todos los píxeles con un valor inferior a 1 (i.e. menos del 1% de las observaciones totales). La columna 5 y 6 presentan los resultados de estas ecuaciones y confirman los resultados anteriores con coeficientes asociados al índice de lluvia extrema de una magnitud casi igual. Por otro lado, construimos un índice alternativo de lluvias extremas tomando como criterio para un día de lluvias intensas un Z-score de 2 o más. Este criterio es más restrictivo y probablemente no capte algunas inundaciones menores provocadas por lluvias torrenciales de menor intensidad. Sin embargo, la columna 6 muestra que el impacto marginal del coeficiente sigue siendo negativo y de un valor muy cercano, aunque se pierde un poco de nitidez en la estimación del efecto.

Basándonos en la fuerte correlación entre luces nocturnas y PIB, convertimos ahora el impacto de las lluvias extremas en los NTL en impacto monetario. Para esos fines, calculamos para cada NTL promedio por país/ año la reducción resultante de las lluvias extremas recibidas en cada píxel del país/año correspondiente (i.e. el promedio anual de las lluvias extremas mensuales). Una vez estimada la reducción en unidades del NTL promedio por país/año, convertimos este monto en una reducción del valor de PIB/píxel usando el factor de conversión obtenido mediante la ecuación número 1 (i.e. el coeficiente β_{NTL}). Finalmente, multiplicamos el valor de PIB/píxel obtenido para cada país por la cantidad total de píxeles en cada país. Para tomar en cuenta la incertidumbre propia a nuestro factor de conversión expresamos los intervalos de confianza de las pérdidas estimadas con un 5% de margen de error. El cuadro 4 muestra los resultados de estas estimaciones monetarias para los seis países durante el periodo 2013-2019 en montos absolutos (en \$US millones del 2010) y en porcentaje del PIB.

Nuestras estimaciones sugieren que, en promedio, entre 2013 y 2019, el impacto económico regional de las lluvias extremas ha sido de entre -1,9% y -2,4% del PIB por año. El año 2017 fue el año con más lluvias extremas y, en consecuencia, nuestro modelo predice que este año se registró el mayor impacto económico con unas pérdidas promedio para la región estimadas en el rango -3,7% a -4,6% del PIB¹⁴. Este impacto promedio varía fuertemente entre países: en términos relativos países como Nicaragua y Honduras han registrado pérdidas alrededor del 7% del PIB mientras que no han superado el 4% del PIB en los demás países. Sin embargo, en términos de pérdidas absolutas, los países con niveles de PIB más alto, y por consiguiente con mayores niveles de exposición, como por ejemplo Costa Rica, Panamá y Guatemala, exhiben los mayores montos de pérdidas en \$US (ver anexo).

Por otro lado, es importante puntualizar que estas estimaciones corresponden al impacto económico acumulado del conjunto de lluvias extremas registrado en todo el territorio durante el periodo y no el impacto de un solo evento. También cabe recordar que este monto corresponde al impacto sobre la actividad económica es decir a lo que no se pudo producir por las diferentes interrupciones, daños y afectaciones que provocaron las lluvias extremas. No tiene que confundirse con los daños a activos e infraestructuras provocados por las inundaciones. Analizamos aquí una variación de flujo y no un daño a una infraestructura física. Finalmente, esta estimación es el resultado de una

¹³ La literatura también señala el ruido en los VIIRS para latitudes altas en las cuales, durante el periodo de invierno, la capa de nieve puede distorsionar el valor de las luces. Al considerar que este riesgo no afecta nuestra zona de análisis no lo consideramos.

¹⁴ Esta estimación corresponde al promedio de los impactos nacionales medidos en términos relativos (i.e. pérdidas/PIB); no es la suma de las pérdidas regionales relativas al PIB regional.

gran cantidad de eventos de lluvias extremas y es consistente con lo planteado en otros estudios: aunque los impactos marginales de los “pequeños desastres” sean bajos, su alta frecuencia resulta en un impacto acumulado importante que puede significativamente influir la trayectoria de desarrollo de un país.

Cuadro 4
Evaluación del impacto económico de las lluvias extremas
(en % del PIB y \$US 2010 millones dólares), 2013-2019

	Pérdida promedio anual			Pérdida máxima (año 2017)		
	<i>Min</i>	<i>Promedio</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Promedio</i>	<i>Max</i>
Pérdida regional estimada (en millones de 2010 dólares)	-3 309	-3 740	-4 171	-6 175	-6 979	-7 784
Pérdida regional estimada (en porcentaje del PIB)	-1,96	-2,22	-2,48	-3,72	-4,20	-4,69

Fuente: Elaboración propia.

IV. Cobertura boscosa e impacto diferenciado de las lluvias extremas

A. Resultados empíricos

Analizamos ahora el papel de la cobertura boscosa y vegetal en la relación entre lluvias extremas y actividad económica, evaluando si el impacto económico de las lluvias se reduce cuando aumenta la calidad y cantidad de la cobertura boscosa. Para analizar la heterogeneidad del impacto económico de las lluvias extremas, retomamos las ecuaciones (2) y (3) y agregamos ahora un término de interacción basado en el valor del NDVI. El modelo en nivel que estimamos toma la siguiente forma:

$$\ln Y_{i,t} = \alpha + \beta_1 (Xtrm_{i,t}) + \beta_2 (Xtrm_{i,t} \cdot \overline{NDVI}_{iy}) + \omega_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

donde \overline{NDVI}_{iy} es el promedio anual del NDVI del píxel i en el año y . Interactuamos esta variable con nuestro índice de lluvias extremas e incluimos el resultado de esta interacción de acuerdo con lo indicado en la ecuación 4. Para robustecer nuestros resultados, estimamos un segundo modelo en el que se repite este proceso, pero usando esta vez el promedio del NDVI del píxel durante todo el periodo 2013-2019. Es importante aclarar que usamos el promedio del NDVI ya que los valores mensuales de este tienen un fuerte comportamiento cíclico influenciado por la temporada de lluvia (ver anexo estadístico). Como el valor del NDVI es afectado por la lluvia, parte de la variación del término de interacción podría provenir de cambios simultáneos en ambas variables. Por lo tanto, utilizamos el promedio del NDVI combinado con efectos fijos para restringir el modelo econométrico y explotar únicamente la variación de las lluvias extremas condicionadas a un valor fijo de la variable moderadora.

No obstante, el nivel absoluto del NDVI también es, por lo menos parcialmente, afectado por la lluvia. Aunque en términos matemáticos nuestra variable de lluvias extremas y el promedio del NDVI exhiben una correlación muy baja¹⁵, no hacemos una afirmación de causalidad en relación con los efectos del NDVI. Los resultados deben interpretarse como correlaciones.

Cuadro 5
Resultados de la regresión (4) con el impacto de la cobertura boscosa

	Variable dependiente				
	Growth NTL			Ln NTL	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Lag Ln NTL	-0,625*** (0,059)	-0,626*** (0,059)	-0,626*** (0,059)		
Xtrm rain	-0,007*** (0,002)	-0,070*** (0,025)	-0,070*** (0,026)	-0,105*** (0,034)	-0,104*** (0,035)
Xtrm Rain: Av NDVI		0,009** (0,003)		0,013** (0,005)	
Xtrm Rain: Anual NDVI			0,008** (0,003)		0,013** (0,005)
Observaciones	70.882	70.882	70.882	71.736	71.736
F Statistic	17.940***	11.999***	11.998***	92,94***	90,38***

Fuente: Elaboración propia.

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

Los resultados de las estimaciones de estos modelos están reportados en el cuadro 5. A modo de referencia, la columna 1 retoma los resultados del modelo detallado en la sección anterior. Las columnas 2 y 3 muestran los resultados del modelo de crecimiento de la actividad económica local, usando primero el valor promedio del NDVI 2013-2019 (col. 2), y luego el promedio anual del NDVI (col.3). Las columnas 4 y 5 usan las mismas especificaciones, pero con el logaritmo natural de las luces nocturnas como variable dependiente (i.e. el modelo en nivel). Para todos los modelos, el coeficiente asociado al término de interacción es positivo, altamente significativo y de una magnitud comparable, indicando que el impacto marginal de las lluvias extremas se reduce al aumentar el NDVI. Por otro lado, los resultados usando el valor promedio del NDVI 2013-2019 y el valor promedio anual del NDVI son muy similares. A continuación, usaremos nuestro valor promedio anual ya que el mismo incorpora cambios en el nivel del NDVI debido a factores anuales “no-temporales” como puede ser el caso de la deforestación¹⁶.

Para poder interpretar cuantitativamente el impacto de la cobertura boscosa, graficamos el impacto marginal de las lluvias extremas en función del valor del NDVI (gráfico 6).¹⁷ Esta grafica indica que el impacto económico de las lluvias extremas es más alto cuando la cobertura boscosa es baja: cuando un píxel tiene un NDVI cerca de 0, un aumento de 1 en el índice de lluvias extremas provoca una caída de aproximadamente un 10% de sus NTL. La magnitud de este impacto económico se va reduciendo conforme aumenta la cobertura boscosa y deja de ser estadísticamente significativo con un

¹⁵ El coeficiente de Pearson entre ambas variables es de menos de 0.1 y regresando el promedio del NDVI sobre las lluvias extremas siguiendo las especificaciones anteriores no encontramos impacto significativamente diferente de 0.

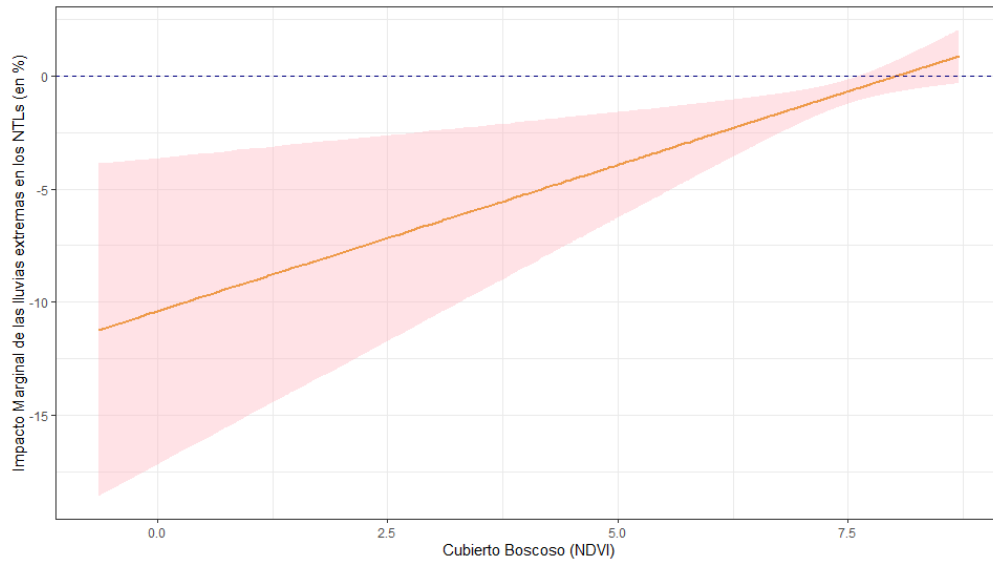
¹⁶ También analizamos la heterogeneidad del impacto de las lluvias usando términos de interacción en base al nivel inicial de luces y en base al país en el que se sitúa el píxel de interés, pero sin poder concluir a ningún resultado robusto y definitivo.

¹⁷ El impacto marginal se calcula de la manera siguiente:

$$\frac{\Delta \text{Log NTL}}{\Delta \text{Lluvias Ext}} = \beta_1 + \beta_2 \cdot \overline{\text{NDVI}}_{i,y}$$

índice NDVI superior a 7,7. Los resultados con el modelo de crecimiento de las luces no se incluyen, pero concluyen a impactos consistentes y de magnitud muy parecida.

Gráfico 6
Impacto económico de las lluvias extremas en función del nivel de cobertura boscosa



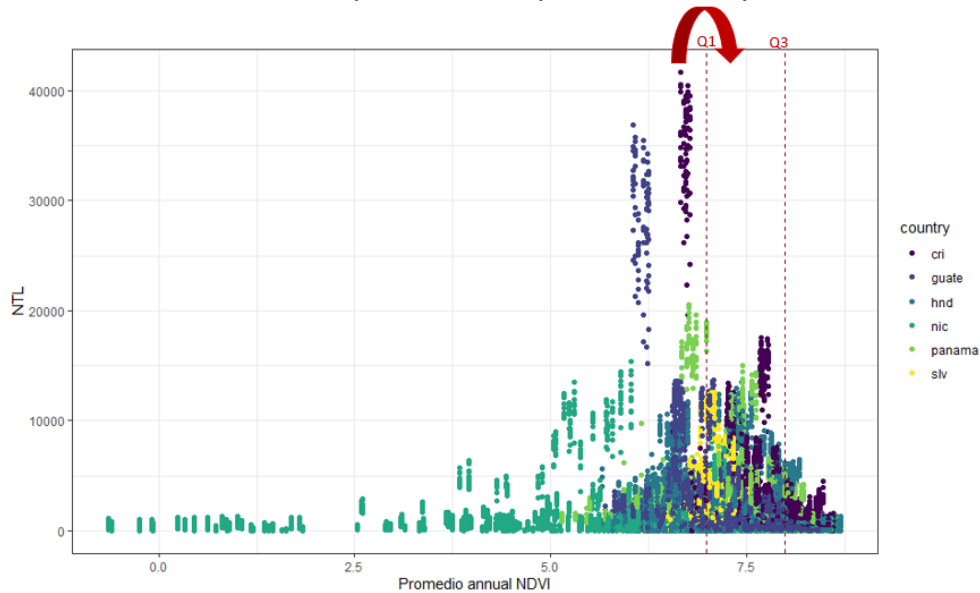
Fuente: Elaboración propia.

B. Impacto potencial de una política de restauración y conservación de bosques

Podemos ahora realizar simulaciones de cómo la evolución de la cobertura boscosa en Centroamérica impactaría el nivel de pérdidas económicas por lluvias extremas. Para esos fines, analizamos primero como se distribuyen para cada píxel el promedio anual del NDVI relativamente al nivel de luces nocturnas. El gráfico 7 indica que un cuarto de los píxeles tiene un NDVI por debajo de 6.9 y solo un cuarto está por encima de 7.9. También revela cómo, bajo el actual paradigma de desarrollo, pareciera no ser posible combinar un alto nivel de luces nocturnas con un alto cubierto vegetal: los píxeles con un NDVI por encima de 8 exhiben un nivel de luces nocturnas que se reduce fuerte y rápidamente¹⁸. Esto es consistente con la realidad ya que estos niveles de NDVI corresponden a zonas con una alta densidad de vegetación como puede ser por ejemplo los bosques tropicales. Dicho en otras palabras, donde tenemos bosques tropicales y vegetaciones extremadamente densas no tenemos muchas luces nocturnas. Sin embargo, la combinación de un índice NDVI entre 7 y 7.5 y un alto nivel de luces nocturnas es posible.

¹⁸ Sin embargo, controlando por píxel y por mes, no encontramos relación significativa entre el promedio del NDVI y NTL.

Gráfico 7
Distribución de los píxeles en base al promedio del NDVI y sus NTL



Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta lo anterior, simulamos una política de restauración y conservación de bosques a escala centroamericana que se estructure en base a dos tipos de acciones. Una primera dimensión se enfoca en rehabilitar zonas con cubierto boscoso muy bajo. Como revela la gráfica 7, estas zonas se caracterizan por un monto limitado de luces nocturnas y por lo tanto corresponden a zonas rurales/semirurales en las cuales probablemente se tendrá que buscar revertir procesos de deforestación. La segunda dimensión de esta política estriba en aumentar la cobertura vegetal de las zonas con un NDVI promedio alrededor de 6 y con una alta luminosidad nocturna. Estas zonas corresponden a centros urbanos y requieren de políticas que, mediante la creación de áreas naturales y la búsqueda de soluciones innovadoras, puedan aumentar la cobertura vegetal en el seno de las ciudades.

Simulamos los beneficios económicos que el conjunto de acciones de rehabilitación de zonas deforestadas y reverdecimiento de centros urbanos tendría, suponiendo que las mismas hagan pasar todos los píxeles del Q1 a un nivel de NDVI por encima de 6.9. Esto se traduciría por un incremento en el promedio regional del NDVI de un 4%.¹⁹ Es importante puntualizar que esta simulación evalúa efectos regionales promedio y no pretende dar recomendaciones específicas sobre la factibilidad y adecuación de las medidas a tomar en cada píxel. Para ser exitosas y duraderas las políticas de reverdecimiento y/o reforestación tienen que ser elaboradas de manera participativa y basarse en el análisis de las realidades socioeconómicas y las características físicas y topográficas de los territorios de interés. Por la naturaleza de este estudio, estos factores no están incluidos aquí, pero son temas esenciales para la exitosa implementación de una política pública de rehabilitación y conservación de bosques.

Para cuantificar el impacto que tendrían estas políticas, primero estimamos las pérdidas monetarias regionales con el nivel actual de cobertura boscosa durante el periodo 2013-2019. Contrastamos luego este impacto con el nivel de pérdidas que hubiese resultado de la protección

¹⁹ Es importante aclarar que este escenario no implica inventar un estilo de desarrollo donde se combine alta actividad económica con un NDVI superior a 8.

ofrecida por las políticas de reverdecimiento y restauración de bosques descritas más arriba (i.e. un NDVI promedio regional un 4% más alto).

El nivel de pérdidas fue calculado con las ecuaciones siguientes:

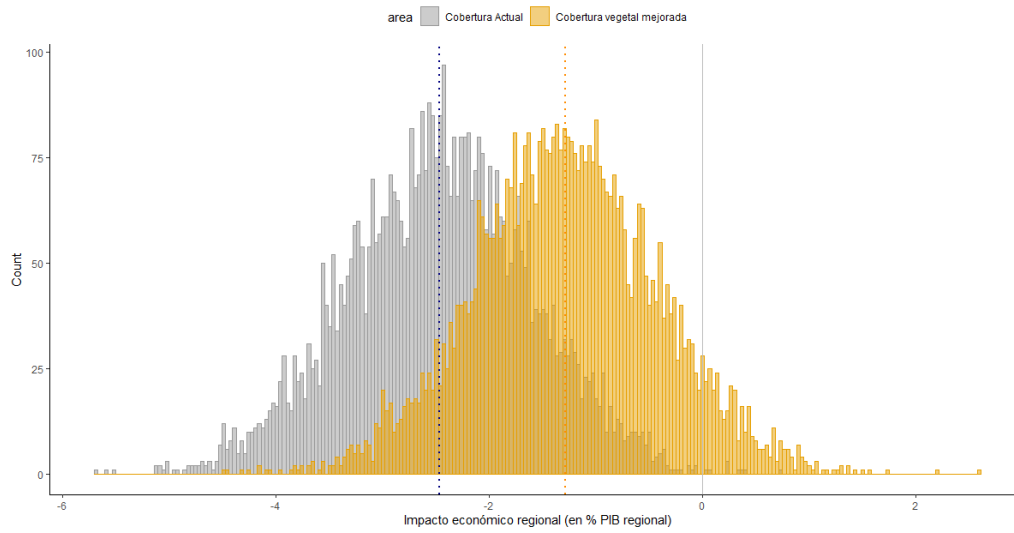
$$\begin{aligned} \text{Pérdidas}_{EST} &= \beta_{xtrm} \cdot \text{Promedio NTL} \cdot \theta_{NTL} \\ \text{Pérdidas}_{SIM} &= \beta_{xtrm} \cdot \text{Promedio NTL} \cdot \theta_{NTL} \end{aligned}$$

Las pérdidas estimadas fueron calculadas usando el impacto marginal de las lluvias extremas cuando la cobertura boscosa está en el promedio actual de la región (esto es un NDVI de 7.4). Multiplicamos este impacto marginal por el promedio del índice de lluvias extremas para evaluar el impacto de este “shock climático” en los NTL (término β_{xtrm} en la ecuación arriba). Luego, inferimos la reducción de unidades de luces nocturnas usando el promedio de los NTL para la región. Finalmente, transformamos las pérdidas en términos de NTL/píxel a dólares usando nuestro factor de conversión de NTL a PIB presentado en la ecuación (1). Se repitió el mismo proceso para las pérdidas simuladas, usando esta vez el impacto marginal de las lluvias extremas que resultaría de la nueva cobertura boscosa producto de las acciones de reverdecimiento y rehabilitación de bosques (esto es un NDVI de 7.6). Como indica la gráfica 6, a mayor nivel de cobertura boscosa, menor impacto marginal de las lluvias extremas y por lo tanto menores pérdidas por lluvias extremas.

Para tomar en cuenta la incertidumbre asociada a los impactos marginales de las lluvias extremas, así como la incertidumbre asociada a nuestro factor de conversión PIB/NTL, efectuamos una simulación en la que seleccionamos ambos coeficientes de forma aleatoria en una distribución normal con promedio igual al coeficiente estimado y una desviación estándar igual al error estándar. Repetimos este proceso 5,000 veces.

Los resultados se presentan en el gráfico 8 e indican que, en promedio, con una cobertura boscosa un 4% más alta durante el periodo 2013-2019, el impacto económico de las lluvias extremas hubiese sido un 50% más bajo. Esto es, un aumento de la cobertura boscosa en las zonas urbanas y en las cuencas hidrográficas más vulnerables de la región hubiese reducido de mitad el impacto económico de las lluvias extremas, lo cual se traduce en un ahorro regional de aproximadamente un 1% del PIB al año. Esto equivale a unos ahorros regionales potenciales de casi US\$2,000 millones al año (en US\$ constantes del 2010). Adicionalmente, realizamos un T-test de las dos series de pérdidas y confirmamos que las medias son significativamente diferentes entre sí. Como lo revela el gráfico 8, la distribución de las pérdidas se mueve consistentemente hacia la derecha al aumentar la cobertura boscosa y vegetal.

Gráfico 8
Simulación del impacto económico de las lluvias extremas con la cobertura boscosa actual (gris)
VS cobertura mejorada (naranja), 2013-2019



Fuente: Cálculos propios.

Nota: Las líneas discontinuas indican los promedios respectivos de cada serie.

IV. Conclusiones

En este estudio demostramos empíricamente que en Centroamérica un alto nivel de cobertura boscosa permite reducir significativamente el impacto económico de las lluvias extremas. Estos resultados fueron obtenidos usando observaciones de la tierra provenientes de imágenes satelitales para el periodo 2013-2019. En particular, medimos la actividad económica local mediante las luces nocturnas, caracterizamos la intensidad de las lluvias extremas con series de lluvias diarias con alta resolución espacial y finalmente evaluamos la cobertura boscosa usando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Con este panel de datos medimos el impacto de las lluvias extremas en la actividad económica con un modelo de efectos fijos que nos permite controlar por la heterogeneidad inobservada de cada píxel y los cambios comunes a todos los píxeles a lo largo del periodo de análisis. Luego, para analizar en qué medida el impacto de las lluvias extremas puede ser diferenciado en el territorio, introducimos un término de interacción en nuestro modelo que se basa en la cantidad de cobertura boscosa y vegetal detectada en cada píxel.

Nuestros resultados muestran que las lluvias extremas impactaron negativamente la actividad económica de la región. En promedio, las lluvias extremas detectadas en el periodo han provocado pérdidas de entre -1,9% y -2,4% del PIB por año. Nuestro análisis también revela cómo el impacto económico de las lluvias extremas se reduce conforme aumenta la cobertura boscosa y vegetal del territorio. Esto nos permite simular los beneficios económicos de un aumento de la cobertura boscosa y vegetal en las ciudades y en las cuencas hidrográficas más vulnerables de la región: con un NDVI regional promedio un 4% más alto, se hubiese reducido a la mitad el impacto económico de las lluvias extremas durante el periodo. En su conjunto, los análisis revelan que la conservación y restauración de bosques constituye una estrategia eficiente de adaptación al cambio climático.

Estos resultados son importantes para el diseño y la implementación de las políticas públicas ya que evidencian cómo los esfuerzos de conservación y/o restauración de bosques contribuyen a proteger la actividad económica de las pérdidas e interrupciones provocadas por las inundaciones.

Estos beneficios económicos se irán incrementando a medida que los efectos del cambio climático se agudicen, traduciéndose por lluvias extremas más frecuentes e intensas para el istmo centroamericano. En este sentido, las políticas de conservación y/o restauración del bosque en las principales cuencas hidrográficas de la región junto con las acciones de reverdecimiento de las ciudades son de suma importancia para asegurar la sostenibilidad del desarrollo centroamericano en las próximas décadas.

A la hora de actualizar la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC por sus siglas en inglés) y establecer la Estrategia climática a largo plazo del país, este análisis también puede ser usado para estructurar soluciones basadas en la naturaleza. Bajo este escenario, la política pública de conservación y/o restauración de la cobertura boscosa se convierte en una acción integral por la cual, además de la valorizar el patrimonio natural y la biodiversidad del país, se promueve la adaptación al cambio climático mediante una reducción de la vulnerabilidad a lluvias extremas y, a la vez, se contribuye a la mitigación del cambio climático a través de una mayor captura del carbono en los suelos de las zonas reforestadas y/o conservadas.

Finalmente, concluimos señalando que para ser exitosas y duraderas las políticas de conservación y/o reforestación tienen que ser elaboradas de manera participativas y analizando las realidades socioeconómicas y las características físicas y topográficas de las zonas de interés. Por la naturaleza de nuestro análisis, estos factores no están tratados aquí. Sin embargo, son prioritarios para poder identificar y priorizar las zonas de conservación/ reforestación y asegurar una adecuada acción pública.

Bibliografía

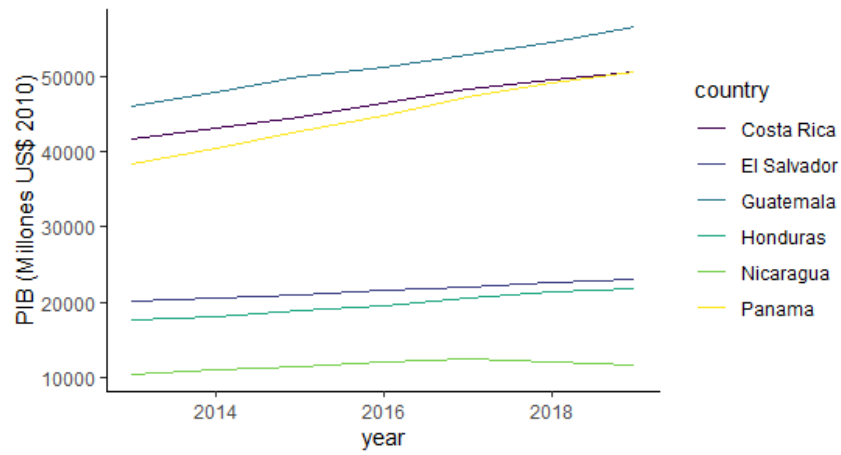
- Anagnostopoulou, C., Tolika, K. *Extreme precipitation in Europe: statistical threshold selection based on climatological criteria*. *Theor Appl Climatol* 107, 479–489 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0487-8>
- Bertinelli, L., Mohan, P., and Strobl, E., 2016. "Hurricane Damage Risk Assessment in the Caribbean: An Analysis using Synthetic Hurricane Events and Nightlight Imagery", *Ecological Economics*, 124, pp. 135-144.
- Castillo R., Montero R., Amador J., y Durán, A.M., 2018, "Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística", *Revista de Climatología* Vol. 18 (2018): 1-12 ISSN 1578-8768
- Cavallo, E., Galiani, S., Noy, I., Pantano, J., 2013. *Catastrophic natural disasters and economic growth*. *Rev. Econ. Stat.* 95 (5), 1549–1561.
- CEPAL, 2020. *Construir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe de Naciones Unidas, Período de Sesiones No.38, ISBN:9789211220520
- Chandler K.R., Stevens C.J., Binley A., Keith A.M., 2018. "Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation", *Geoderma*, Volume 310, Pages 120-127, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.011>
- Chen X., Nordhaus W., 2015. "A Test of the New VIIRS Lights Data Set: Population and Economic Output in Africa", *Remote Sensing*, 2015, 7, 4937-4947; doi:10.3390/rs70404937
- Chen X., Nordhaus William D., 2011. "Using luminosity data as a proxy for economic statistics", *Proceedings of the National Academy of Sciences* May 2011, 108 (21) 8589-8594; DOI: 10.1073/pnas.1017031108
- (2012). "Measuring Economic Growth from Outer Space." *American Economic Review* 102 (2): 994–1028.
- Colin, C., 1987. "Deforestation and Floods." *Environmental Conservation*, vol. 14, no. 1, 1987, pp. 67–69. JSTOR, www.jstor.org/stable/44521025
- Constanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, G.R., Sutton, P. y van der Belt, M. 1997. *The value of the world's ecosystem services and natural capital*. *Nature* 387: 253-260.
- Del Valle, A., Elliott, R., Strobl, E., Tong, M., 2018. "The Short-Term Economic Impact of Tropical Cyclones: Satellite Evidence from Guangdong Province". *Economics of Disasters and Climate Change*. 2. 1-11. 10.1007/s41885-018-0028-3.

- Del Valle, A., Eriksson, M., Ishizawa Escudero, O.A. and Miranda, J.J., 2020. "Mangroves protect coastal economic activity from hurricanes", *Proceedings of the National Academy of Sciences* Jan 2020, 117 (1) 265-270; DOI: 10.1073/pnas.1911617116
- Diakakis, M. 2012, *Rainfall thresholds for flood triggering. The case of Marathonas in Greece*, *Natural Hazards* (2012) 60:789–800. DOI 10.1007/s11069-011-9904-7
- Driscoll JC, Kraay AC. 1998. "Consistent Covariance Matrix Estimation with Spatially Dependent Panel Data." *The Review of Economics and Statistics*, 80(4), 549–560. doi: 10.1162/00346539857825
- Elliott R., Strobl E., Sun P. Sun. 2015. "The local impact of typhoons on economic activity in China: A view from outer space". *Journal of Urban Economics*, Volume 88, 2015, Pages 50-66, <https://doi.org/10.1016/j.jue.2015.05.001>
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Dietz, J. B., Bland, T., Sutton, P. C., and Kroehl, H.W. (1999). "Radiance calibration of DMSP-OLS lowlight imaging data of human settlements – a new device for portraying the Earth's surface entire", *Remote Sens. Environ.*, 68, 77–88.
- Elvidge, C. D., Ziskin, D., Baugh, K. E., Tuttle, B. T., Ghosh, T., Pack, D. W., Erwin, E. H., and Zhizhin, M. (2009). *A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data*, *Energies*, 2, 595–622.
- Elvidge, Christopher D., Kimberly Baugh, Mikhail Zhizhin, Feng Chi Hsu, and Tilottama Ghosh. 2017. "VIIRS night-time lights." *International Journal of Remote Sensing* (Taylor & Francis) 38: 5860-5879. doi:10.1080/01431161.2017.1342050.
- Emma L. Shuttleworth, Martin G. Evans, Michael Pilkington, Thomas Spencer, Jonathan Walker, David Milledge, Timothy E.H. Allott (2019), "Restoration of blanket peat moorland delays stormflow from hillslopes and reduces peak discharge", *Journal of Hydrology X*, Volume 2, 100006, ISSN 2589-9155, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100006>
- Felbermayr, Gröschl. 2014. "Naturally negative: The growth effects of natural disasters", *Journal of Development Economics*, Volume 111, 2014, pages 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2014.07.004>
- Forestieri, Caracciolo, Arnone, Noto, 2016, *Derivation of rainfall thresholds for flash flood warning in a Sicilian basin using a hydrological model*, *Procedia Engineering* 154 (2016) 818 – 825
- FRMC (2018). *Impacts of upland land management on flood risk*, Flood Risk Management Research Consortium Research Report UR16, December.
- Hallegatte S., Hourcade JC, Dumas P. 2007. "Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: Illustration on extreme events", *Ecological Economics*, Volume 62, Issue 2, Pages 330-340, ISSN 0921-8009, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.06.006>
- Hallegatte, S., Dumas, P., 2009. *Can natural disasters have positive consequences? Investigating the role of embodied technical change*. *Ecol. Econ.* 68 (3), 777–786.
- Henderson, J. V., A. Storeygard, and D.N. Weil., 2011. "A Bright Idea for Measuring Economic Growth." *American Economic Review* 101 (3): 194–99.
- ILO-WWF, 2020. "NATURE HIRES: How Nature-based Solutions can power a green jobs recovery", October 2020, World Wide Fund for Nature (WWF), International Labor Organization (ILO), October 2020
- Ishizawa, O., Miranda, J.J., Strobl, E., 2019. "The Impact of Hurricane Strikes on Short-Term Local Economic Activity: Evidence from Nightlight Images in the Dominican Republic". *International Journal of Disaster Risk Science*. 10.
- Islam N., 1995, *Growth Empirics: A Panel Data Approach*, *The Quarterly Journal of Economics*, Volume 110, Issue 4, November 1995, Pages 1127–1170, <https://doi.org/10.2307/2946651>
- Leiter, A., Oberhofer, H., Raschky, P., 2009. *Creative disasters? Flooding effects on capital, labour and productivity within European firms*. *Environ. Resour. Econ.* 43 (3), 333–350.
- Lessmann C., and Sofke T., 2019. "Natural disasters and regional development – the case of earthquakes". *Environment and Development Economics* 24, 479–505.
- Loayza, N., Eduardo, O., Rigolini, J., Christiaensen, L., 2012. *Natural disasters and growth: going beyond the averages*. *World Dev.* 40 (7), 1317–1336.

- Lunka, P., and Patil, S. D., 2016. "Impact of tree planting configuration and grazing restriction on canopy interception and soil hydrological properties: implications for flood mitigation in silvopastoral systems". *Hydrol. Process.*, 30: 945–958. doi: 10.1002/hyp.10630
- Mankiw NG, Romer D, Weil D, 1992. "A Contribution to the Empirics of Economic Growth". *Quarterly Journal of Economics*. 1992;107 (May) :407-437.
- Marshall, M.R., Ballard, C.E., Frogbrook, Z.L., Solloway, I., McIntyre, N., Reynolds, B. and Wheeler, H.S., 2014. "The impact of rural land management changes on soil hydraulic properties and runoff processes: results from experimental plots in upland UK", *Hydrol. Process.*, 28: 2617-2629. doi:10.1002/hyp.9826
- Martina, Todini, and Libralon, 2006, *A Bayesian decision approach to rainfall thresholds-based flood*, Warning, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 413–426, 2006, www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/413/2006/
- Nabuurs et al. 2007, "Forestry. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*" [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Authors: Nabuurs, G.J, O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, P. Frumhoff, T. Karjalainen, O. Krankina, W.A. Kurz, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, N.H. Ravindranath, M.J. Sanz Sanchez, X. Zhang, 2007:
- Nickell, Stephen, 1981. "Biases in Dynamic Models with Fixed Effects", *Econometrica*, 49, issue 6, p. 1417-26.
- Noy I., 2009. "The Macroeconomic Consequences of Disasters." *Journal of Development Economics* 88: 221–31.
- Oana Iacob, Iain Brown & John Rowan, 2017. "Natural flood management, land use and climate change trade-offs: the case of Tarland catchment, Scotland", *Hydrological Sciences Journal*, 62:12, 1931-1948, DOI: 10.1080/02626667.2017.1366657.
- Robbins, 2016, *A probabilistic approach for assessing landslide-triggering event rainfall in Papua New Guinea, using TRMM satellite precipitation estimates*, *Journal of Hydrology* 541 (2016) 296–309
- Skidmore, M., Toya, H., 2002. "Do natural disasters promote long-run growth?" *Econ. Inq.* 40 (4), 664–687.
- Skoufias E., Strobl E., Tveit T., 2019. "Can We Rely on VIIRS Nightlights to Estimate the Short-Term Impacts of Natural Disasters? Evidence from Five Southeast Asian Countries", *Policy Research Working Paper* 9052, World Bank Group
- Strobl E., 2011. "The Economic Growth Impact of Hurricanes: Evidence from U.S. Coastal Counties," *The Review of Economics and Statistics*, MIT Press, vol. 93(2), pages 575-589, May.
- Tabari, H. 2020. *Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability*. *Sci Rep* 10, 13768 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- Tylkowski and Hojan, 2018, *Threshold Values of Extreme Hydrometeorological Events on the Polish Baltic Coast*, *Water* 2018, 10, 1337; doi:10.3390/w10101337
- Uprety, Sirish & Cao, Changyong & Gu, Yalong & Shao, X., 2017. "Improving the low light radiance calibration of S-NPP VIIRS day/night band in the NOAA operations". 4726-4729. 10.1109/IGARSS.2017.8128057.
- Xie, P., et al. (2017), Reprocessed, Bias-Corrected CMORPH Global High-Resolution Precipitation Estimates from 1998, *J. Hydrometeorol.*, 18, 1617-1641 (DOI:10.1175/JHM-D-16-0168.1)
- Yu T, and Babcock B (2010) Are U.S. Corn and Soybeans Becoming More Drought Tolerant? *American Journal of Agricultural Economics*, 92(5), 1310-1323.
- Zhao N., Hsub F., Cao G. and Samsond, E., 2017. Improving accuracy of economic estimations with VIIRS DNB image products, *International Journal of Remote Sensing*, May 2017 <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1331060>

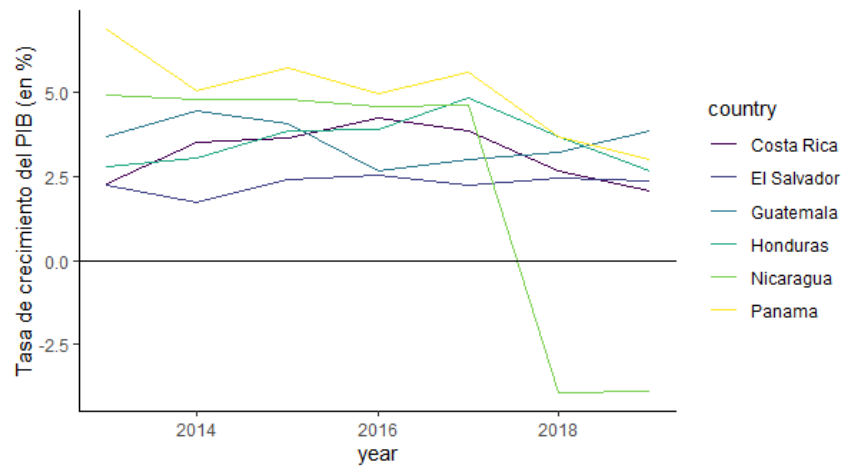
Anexos

Gráfico A1
PIB (constante US\$ 2010)



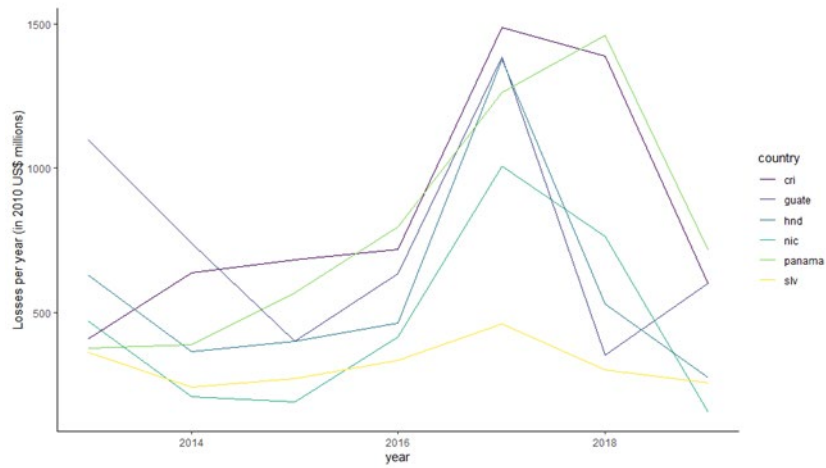
Fuente: WDI, Banco Mundial y cálculos propios.

Gráfico A2
Tasa de crecimiento del PIB (en%)



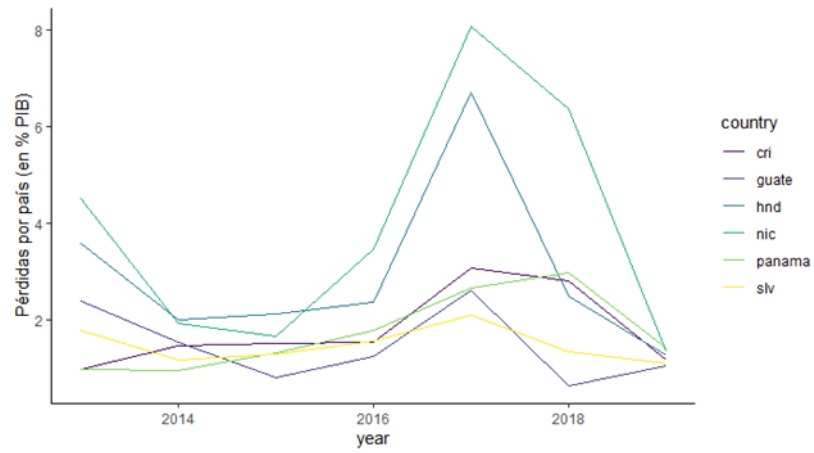
Fuente: WDI, Banco Mundial y cálculos propios.

Gráfico A3
Pérdidas por lluvias extremas por país por año (US\$ 2010 millones)



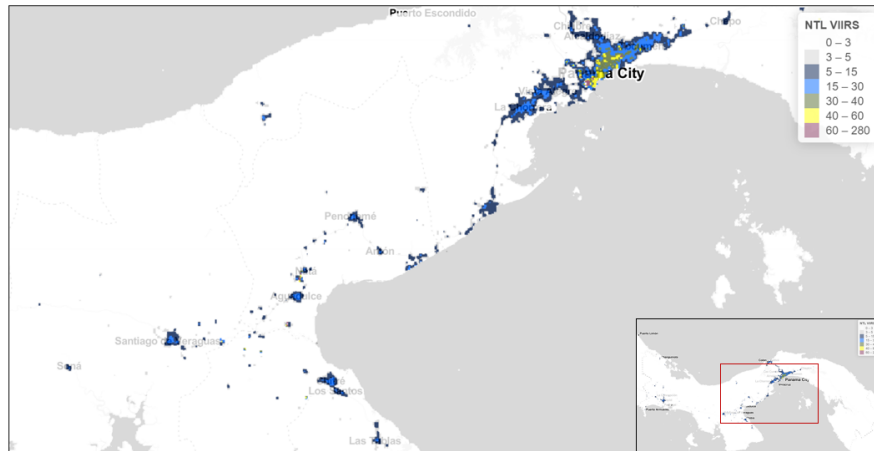
Fuente: WDI, Banco Mundial y cálculos propios.

Gráfico A4
Pérdidas por lluvias extremas por país por año (en % del PIB)



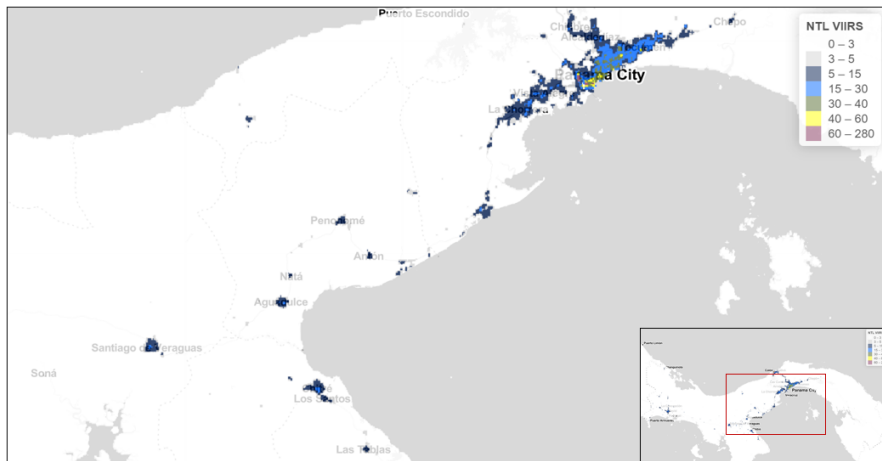
Fuente: WDI, Banco Mundial y cálculos propios.

Mapa A1
Panamá – Luces nocturnas promedio S1 2016



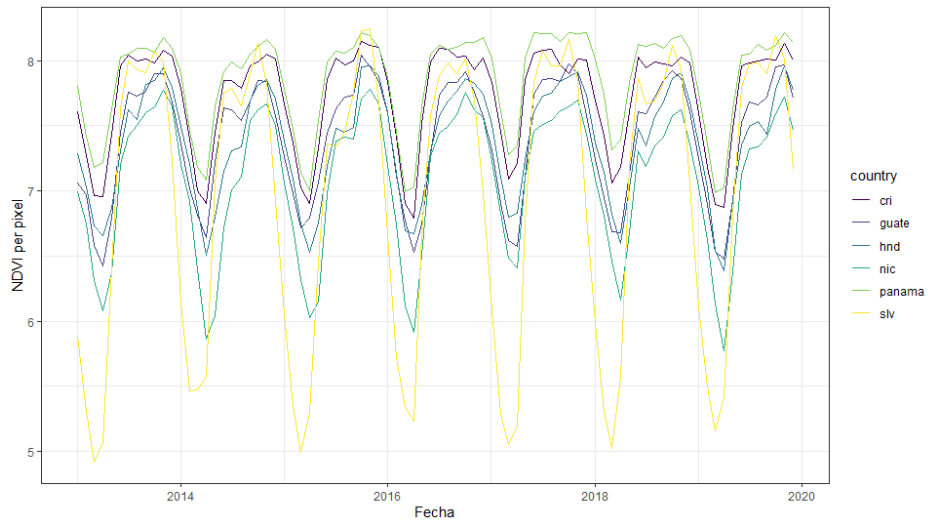
Fuente: Elaboración propia.

Mapa A2
Panamá – Luces noviembre 2016 – Lluvias extremas por T.T. OTTO



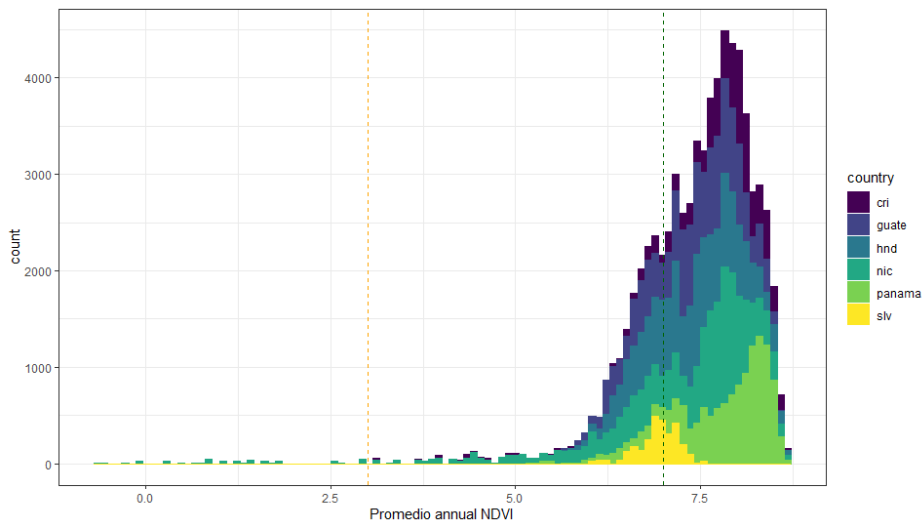
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico A5
Variación temporal del NDVI promedio por país, Centroamérica, 2013-2019



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico A6
Distribución del NDVI promedio por año, Centroamérica, 2013-2019



Fuente: Elaboración propia.

En este estudio se evalúa empíricamente cómo la cobertura boscosa puede reducir el impacto de las lluvias extremas en la actividad económica de Centroamérica. Para esos fines, se construyó un panel de datos usando observaciones de la tierra provenientes de imágenes satelitales. Se midió la actividad económica a través de las luces nocturnas y se caracterizaron las lluvias extremas usando series de lluvias diarias con alta resolución espacial. Finalmente, se evaluó y mapeó la cobertura boscosa y vegetal usando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los resultados muestran que, en promedio, entre 2013 y 2019 las lluvias extremas tuvieron un impacto económico negativo de entre un -1,9% y un -2,4% del PIB al año. El análisis también evidencia que el impacto marginal de estas lluvias es diferenciado en el territorio y se reduce en las zonas con mayor cobertura boscosa y vegetal. Esto permite cuantificar los beneficios económicos de un incremento de la cobertura boscosa: un NDVI regional promedio un 4% más alto habría reducido el impacto económico de las lluvias extremas a la mitad. Estos resultados indican que la conservación y restauración de bosques constituye una estrategia eficiente de adaptación al cambio climático, e ilustran la necesidad de concebir las políticas públicas de forma integral, analizando simultáneamente sus dimensiones económicas, sociales y ambientales.