

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Caracterización del cambio global en los trópicos entre 1992 y 2015

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Posgrado de Geografía para optar al grado y título de Maestría Académica en
Geografía

Marco Antonio Martínez Martínez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica
2022

Dedicatoria

A Dios y La Virgen por darme la fuerza, paciencia y sabiduría para lograr desarrollar este proyecto, y bendecirme con estudios y trabajo.

A mis padres, Laura y Mario, que han sido el pilar durante toda mi vida académica y profesional, dándome amor y respaldo incondicional para lograr obtener este y cada uno de mis logros. Sus enseñanzas me han ayudado a ser quien soy.

A mi hermano Mario, que con su apoyo y preocupación fraternal me han motivado desde siempre.

A mi novia, María Laura, que con su amor y cariño único me fortalece para seguir adelante, motivándome a crecer juntos. Tus consejos con ternura y convicción me inspiran.

A mi abuelita Sara, hacia el cielo, con amor. Gracias por tus oraciones y ternura.

Agradecimientos

Al Observatorio del Agua y del Cambio Global por el financiamiento inicial de la investigación y por el soporte en equipo computacional para el modelado de los procesos.

A los profesores Christian Birkel, Pascal Girot y Édgar Espinoza, por formar parte del equipo tutor, y apoyarme y guiarme siempre en el desarrollo de la investigación. Han sido mis mentores.

Al MSc. Jorge García Girón, gran amigo y colega, por el apoyo de su conocimiento en scripts de modelaje en R.

A la Escuela de Geografía, al Programa de Posgrado y a la Universidad de Costa Rica, por brindarme infinitas oportunidades de crecimiento personal, académico y profesional, y por procurar crear siempre la acción social, investigación de calidad y docencia eficaz en todos sus ámbitos.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Maestría Académica en Geografía



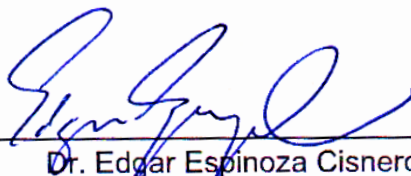
Dr. Víctor Cortés Granados

Representante de la Decana de Sistema de Estudios de Posgrado



Dr. Christian Birkel

Director de Tesis



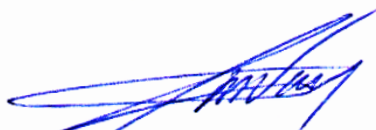
Dr. Edgar Espinoza Cisneros

Lector



M.Sc. Pascal Girot Pignot

Lector



M.Sc. Huberth Vargas Picado

Representante del Director del Posgrado en Geografía



Marco Antonio Martínez Martínez

Sustentante

Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Hoja de aprobación	iv
Resumen	vii
Abstract	x
Índice de cuadros	xiii
Índice de figuras	xiii
Índice de mapas	xiv
1. Capítulo primero: Marco introductorio	1
1.1. <i>Introducción</i>	1
1.2. <i>Área de estudio</i>	2
1.3. <i>Problema</i>	7
1.4. <i>Antecedentes</i>	9
1.5. <i>Justificación</i>	13
1.6. <i>Objetivos</i>	15
1.6.1. <i>General</i>	15
1.6.2. <i>Específicos</i>	15
2. Capítulo segundo: Marco conceptual	16
2.1. <i>Cambio global</i>	16
2.2. <i>Presión poblacional en el ambiente: nuestra huella ecológica</i>	19
2.3. <i>Cambio climático observado y antropogénicamente inducido</i>	22
2.4. <i>Desarrollo sostenible</i>	29
2.5. <i>Análisis de la causalidad en sistemas naturales y sociales</i>	32
3. Capítulo tercero: Marco metodológico	39
3.1. <i>Descarga de datos de las variables</i>	39
3.2. <i>Conformación de la base de datos espaciales de variables para el trópico</i>	41
3.3. <i>Reclasificación de la cobertura de la tierra</i>	41
3.4. <i>Remuestreo de píxeles de los ráster de las variables</i>	43
3.5. <i>Cuantificar cambios</i>	44
3.6. <i>Índice de Cambio Global para el Trópico</i>	49
3.7. <i>Análisis regional según datos del ICGT</i>	50
4. Capítulo cuarto: Cuantificación del cambio global en el trópico.	51

4.1. Cambio de cobertura de la tierra	51
4.1.1 Bosque.....	54
4.1.2. Cultivo.....	55
4.1.3. Urbano	57
4.2. Precipitación.....	63
4.3. Temperatura.....	67
4.4. Producto Interno Bruto (PIB)	71
4.5. Índice de Desarrollo Humano (IDH)	74
4.6. Población	76
5. Capítulo quinto: Índice de Cambio Global para el trópico.	79
5.1. Análisis regional del ICGT: Casos de estudio.....	84
5.1.1. Centroamérica.....	84
5.1.2. Cuenca del Amazonas.....	89
5.1.3. Cuenca del Congo	93
5.1.4. Indonesia.....	98
6. Conclusiones	102
7. Referencias bibliográficas.....	106

Resumen

La zona tropical es altamente dinámica entre sus sistemas naturales y sociales, interfuyendo energías generadoras de cambios a distintas escalas. Es una zona planearía rica en biodiversidad endémica y exótica, con grandes reservorios de agua, así como importantes áreas de bosque húmedo que proveen decenas de servicios ecosistémicos a millones de seres humanos.

No obstante, serios desafíos exponen gran parte de los territorios tropicales, donde se vislumbra que para el 2050, cerca del 50% de la población mundial viva en el trópico, lo que ejercerá mayor presión sobre el medio natural y los recursos. Es evidente la deforestación tropical, amenazando cada vez más ecosistemas y especies, y que, a su vez, el cambio de uso de la tierra sin planificación prolifera el cambio climático, donde el 24% del total de las emisiones generadas son causadas por el cambio del uso de la tierra, ganadería, agricultura, y silvicultura, y el 13% lo aportó la deforestación.

El objetivo de este proyecto de centra en caracterizar los factores clave que contribuyen a una mayor comprensión de la dinámica del cambio global en los trópicos mediante la creación del Índice de Cambio Global en el Trópico, desde los años 1992 hasta el 2015. En tanto, cambio global hace alusión a un conjunto de factores físicos y sociales cambiantes en espacio, tiempo y escala, y que las interacciones entre sí dinamizan y dificultan la predicción de una evolución del espacio.

El desarrollo de la investigación se basó en un análisis geoespacial multivariable, que lograra cuantificar el cambio temporal y espacial de la cobertura de la tierra, la precipitación, temperatura, IDH y PIB, y la población entre los años 1992 y 2015. Se trabajó con sistemas de información geográfica como herramientas esenciales de procesamiento de los datos, lo cual ayudó para la creación del Índice de Cambio Global para el Trópico (ICGT) con base en la cuantificación y en la tendencia de cambios de las variables con el fin de representar espacialmente la magnitud/intensidad del cambio global en el trópico.

Así mismo, se realizó un análisis regional, específicamente en Centroamérica, cuenca del Río Amazonas, cuenca del Río Congo e Indonesia, tomando en cuenta el estudio a detalle del comportamiento del cambio global por variable, la dinámica y relación entre sí de los

sistemas sociales y ambientales. De forma transversal, el estudio se sustenta con el análisis causa-efecto, lo que permitió detallar en las relaciones entre sistemas y el teleacoplamiento, llevando examinar los mecanismos por los que los agentes o actores ejercen cambios en el territorio, y extraer sus causas y efectos multiescalares.

Con ello, en primera instancia se obtuvo que el bosque presentó la mayor pérdida de área en términos absolutos, pero con una tasa de cambio muy leve, es decir, 756 021,91 km² a un ritmo de -0,12% por año. América presentó la tasa de cambio anual más alta (0,17%) respecto a Asia-Oceanía (0,12%) y África (0,07%). En contraparte, la cobertura de cultivo presentó el mayor aumento de área respecto a las demás coberturas en estudio, con 431.727 km² en 22 años, donde mantuvo una tasa de cambio de 0,22%. La superficie urbana tropical, en comparación a las demás coberturas en estudio, es la que tiene la tasa de cambio más alta, con un crecimiento de 3,45% por año. No obstante, su aumento fue de 80.319,10 km², significando apenas el 1,36% del total del área terrestre del trópico en el año 2015.

En términos climáticos, el 10% del trópico tendió a disminuir moderadamente en la precipitación desde 1992, con importantes núcleos en Suramérica y en el archipiélago asiático, y poco más del 8% sostuvo una tendencia al aumento de la temperatura, con núcleos importantes en América y también en los archipiélagos asiáticos. Por otro lado, respecto a la población, algunos países manifiestan aumento generalizado en gran parte de su territorio, como Haití, Nigeria, Ruanda, Burundi e India, los cuales poseen para el año 2015 un IDH bajo. El 70% del trópico muestra una leve intensidad de aumento en el PIB.

Resultados del Índice de Cambio Global para el Trópico (ICGT) muestran que, las zonas de mayor cambio o con los valores más altos son algunas islas del Caribe, Atlántico africano y de los archipiélagos del sureste asiático, así como algunos territorios costeros en los tres continentes (valores entre 0,50-0,90), sin embargo, sólo el 0,65% del trópico presenta cambios moderados a muy altos.

La caracterización y análisis del cambio global basado desde un enfoque de causa-efecto, permitió detallar con mayor profundidad sobre la injerencia de los actores sociales y económicos sobre el sistema ambiental. Por tanto, es concluyente que el principal impulsor o fuerza motriz en el cambio de bosques hacia áreas de cultivo y pastos en el trópico,

generalmente, es el comercio internacional y la creciente demanda de productos cárnicos y derivados, así como de granos, aceite industrial, azúcar, entre otros.

Así mismo, los factores que más aportes negativos han mostrado en el ICGT para las regiones analizadas son la tendencia del aumento de la temperatura, la variación diferenciada en los patrones de la tendencia de cambio de la precipitación y el cambio de cobertura, específicamente con la deforestación y el avance de la frontera agrícola

Brasil es el país en el que convergen más los factores de cambio global, sumando a los antes mencionados, el crecimiento poblacional y las migraciones hacia zonas fronterizas del bosque húmedo del Amazonas. Por su parte, en Colombia y Bolivia los efectos de cobertura y clima son perjudiciales para la cuenca.

Abstract

The tropical zone is highly dynamic between its natural and social systems, inter-flowing energies that generate changes at different scales. It is a flat zone rich in endemic and exotic biodiversity, with large water reservoirs, as well as important areas of humid forest that provide dozens of ecosystem services to millions of human beings.

However, serious challenges expose a large part of the tropical territories, where is envisioned that by 2050, about 50% of the world's population will live in the tropics, which will exert greater pressure on the natural environment and resources. Tropical deforestation is evident, threatening more and more ecosystems and species, and that, in turn, change in land use without planning proliferates climate change, where 24% of the total emissions generated are caused by climate change. from land use, livestock, agriculture, and forestry, and 13% was contributed by deforestation.

The objective of this project focuses on characterizing the key factors that contribute to a better understanding of the dynamics of global change in the tropics through the creation of the Global Change Index in the Tropics, from 1992 to 2015. Meanwhile, global change refers to a set of physical and social factors that change in space, time and scale, and that the interactions between them dynamize and make it difficult to predict the evolution of space.

The development of the research was based on a multivariable geospatial analysis, which managed to quantify the temporal and spatial change of land cover, precipitation, temperature, HDI and GDP, and the population between the years 1992 and 2015. We worked with geographic information systems as essential data processing tools, which helped to create the Global Change Index for the Tropics (ICGT) based on the quantification and trend of changes in variables in order to spatially represent the magnitude/intensity of global change in the tropics.

Likewise, a regional analysis was carried out, specifically in Central America, the Amazon River basin, the Congo River basin and Indonesia, considering the detailed study of the behavior of global change by variable, the dynamics and the relationship between social systems. and environmental. In a transversal way, the study is based on the cause-effect analysis, which allowed detailing the relationships between systems and telecoupling,

leading to examine the mechanisms by which the agents or actors exert changes in the territory, and extract their causes and multiscale effects.

With this, in the first instance it was obtained that the forest presented the greatest loss of area in absolute terms, but with a very slight rate of change, that is, 756,021.91 km² at a rate of -0.12% per year. America presented the highest annual rate of change (0.17%) compared to Asia-Oceania (0.12%) and Africa (0.07%). On the other hand, the crop cover presented the greatest increase in area compared to the other covers under study, with 431,727 km² in 22 years, where it maintained a rate of change of 0.22%. The tropical urban area, compared to the other coverages under study, is the one with the highest rate of change, with a growth of 3.45% per year. However, its increase was 80,319.10 km², meaning only 1.36% of the total land area of the tropics in 2015.

In climatic terms, 10% of the tropics tended to decrease moderately in precipitation since 1992, with important focus in South America and the Asian archipelago, and just over 8% maintained a tendency to increase in temperature, with important focus in Latin America and, in the Asian archipelagos. On the other hand, regarding the population, some countries show a generalized increase in a large part of their territory, such as Haiti, Nigeria, Rwanda, Burundi and India, which in 2015 had a low HDI. 70% of the tropics show a slight intensity of increase in GDP.

Results of the Global Change Index for the Tropics (ICGT, by its acronym in Spanish) show that the areas of greatest change or with the highest values are some islands of the Caribbean, African Atlantic and the archipelagos of Southeast Asia, as well as some coastal territories in the three continents (values between 0.50-0.90), however, only 0.65% of the tropics show moderate to very high changes.

The characterization and analysis of global change based on a cause-effect approach, allowed to detail in greater depth the interference of social and economic actors on the environmental system. Therefore, it is conclusive that the main driver or driving force in the change from forests to cultivated areas and pastures in the tropics, generally, is international trade and the growing demand for meat products and derivatives, as well as grains, industrial oil, sugar, among others.

Likewise, the factors that have shown the most negative contributions in the ICGT for the regions analyzed are the trend of increased temperature, the differentiated variation in the patterns of the trend of change in precipitation and the change in coverage, specifically with the deforestation and the advance of the agricultural frontier

Brazil is the country in which the factors of global change most converge, adding to those mentioned above, population growth and migrations to border areas of the Amazon rainforest. On the other hand, in Colombia and Bolivia the effects of coverage and climate are detrimental to the basin.

Índice de cuadros

Cuadro 1. Terminología del análisis de causalidad.	34
Cuadro 2. Repositorio y enlaces web para descargar las variables	40
Cuadro 3. Clases reclasificadas del CCI-LC.....	42
Cuadro 4. Clasificación del Índice de Cambio Global para el Trópico.....	49

Índice de figuras

Figura 1. Factores sociales, económicos y naturales que conforman el cambio global. Elaboración propia, 2019.....	18
Figura 2. Huella ecológica mundial de consumo por tipo de uso en hectáreas globales, 1961-2014. Fuente: WWF, 2018.	22
Figura 3. Componentes del sistema climático global (negrita), sus procesos e interacciones (flechas delgadas) y algunos aspectos que pueden cambiar (flechas gruesas). Fuente: IPCC, 2001.	24
Figura 4. Cambio en la temperatura global de la superficie (promedio anual) según lo observado y simulado utilizando factores humanos y naturales y solo naturales (ambos 1850-2020). Fuente: IPCC, 2021.....	25
Figura 5. a) Mapa de los cambios observados en la temperatura en superficie entre los años 1901 y 2012, derivado de las tendencias en la temperatura determinadas por regresión lineal de un conjunto de datos. b) Mapa de los cambios observados en la precipitación, en 1951 y 2010; tendencias en la acumulación anual. Fuente: IPCC, 2014.	27
Figura 6. Contribuciones al calentamiento de 2010-2019 en relación con 1850-1900, evaluadas a partir de estudios de forzamiento radiactivo Fuente: IPCC, 2021.....	28
Figura 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: ONU, 2020.	31
Figura 8. Marco causal de la deforestación en el trópico. Fuente: Geist & Lambin, 2002.38	
Figura 9. Zonificación metodológica del trópico para el procesamiento geoespacial. Fuente: Elaboración propia, 2019.....	48
Figura 10. Cobertura de la tierra en el trópico 1992-2015.....	59
Figura 11. Dinámica de cambio de la cobertura de bosque en el trópico.....	60
Figura 12. Dinámica de cambio de la cobertura de cultivo en el trópico.	61

Figura 13. Dinámica de cambio de la cobertura urbana en el trópico.	62
Figura 14. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable de precipitación.....	66
Figura 15. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable de temperatura.	70
Figura 16. <i>Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable del PIB. ..</i>	73
Figura 17. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable del IDH. ..	75
Figura 18. Distribución espacial de la variación poblacional entre el 2000 y 2015.....	78
Figura 19. Distribución espacial Índice de Cambio Global para el Trópico.	83
Figura 20. Índice de Cambio Global para el Trópico en Centroamérica y matriz de cambios multivariantes.....	88
Figura 21. Índice de Cambio Global para la cuenca del río Amazonas y matriz de cambios multivariantes.....	94
Figura 22. Índice de Cambio Global para la cuenca del río Congo y matriz de cambios multivariantes.....	97
Figura 23. Índice de Cambio Global para Indonesia y matriz de cambios multivariantes.	101

Índice de mapas

Mapa 1. Ubicación del trópico enmarcado en grilla blanca, en un contexto global. Elaboración propia, 2020.....	6
--	---



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, _____, con cédula de identidad _____, en mi
condición de autor del TFG titulado _____

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☐ NO * ☐

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Capítulo primero: Marco introductorio

1.1. Introducción

En el Planeta Tierra ocurren incalculables interrelaciones biofísicas y sociales que reorganizan y dinamizan espacios naturales para aprovechamiento del ser humano y su colectivo, con lo cual, se debe mencionar la deforestación y el cambio de cobertura, como unos de los principales efectos de la relación ser humano-entorno natural (Duarte *et al.*, 2006; Lambin *et al.*, 2003), siendo ésta una de las áreas tradicionales de investigación en Geografía. Con ello, esta investigación se centra en el área tropical del planeta, donde habita más del 40% de la población en la actualidad, y se proyecta que sea más del 50% de habitantes para el año 2050 (State of the Tropics, 2014), lo que indica que el aumento poblacional y la presión que ejerce sobre el entorno natural, han sido y serán una de las variables primarias para la alteración de la cobertura de la tierra y convertir en usos antrópicos (Lambin *et al.*, 2003).

Además, la deforestación asociada a la transformación en espacios agropecuarios es una de las actividades que más huella ecológica ha dejado desde la historia del ser humano (Lambin *et al.*, 2003; Carr, 2004), lo que tiene consecuencias significativas en los ecosistemas naturales, captura y almacenamiento de carbono, ciclos hidrogeológicos, degradación ambiental, entre otros. El cambio de cobertura y la deforestación son las principales actividades humanas que más emisiones de gases expulsan a la atmósfera en la zona tropical (State of the Tropics, 2014). Para el cambio de cobertura y uso de la tierra influyen directamente variables socioeconómicas, políticas y climáticas, que varían en espacio y tiempo (Martínez, 2018; Lambin *et al.*, 2003).

Por lo tanto, esta investigación se focalizará en caracterizar los factores clave que contribuyen a una mayor comprensión de la dinámica del cambio global en los trópicos mediante la creación del Índice de Cambio Global en el Trópico, desde los años 1992 hasta el 2015. La base de datos será conformada por información disponible en repositorios científicos, institucionales y académicos, que contienen datos espaciales de primera calidad a escala global, y que serán modelados geoespacialmente en un índice de cambio global

para del trópico con el fin de indagar en la magnitud e intensidad de los cambios de los sistemas sociales y ambientales bajo el enfoque de causa-efecto.

1.2. Área de estudio

El área de estudio de la presente investigación se concentra en la zona tropical, la cual es comprendida entre los Trópicos de Cáncer ($23^{\circ} 26' 14''$ N) y Capricornio ($23^{\circ} 26' 14''$ S), como delimitación geográfica. Por tanto, se entiende como un gran cinturón que cubre la zona más central del planeta, y en medio se ubica el paralelo 0 o ecuador (Mapa 1). Al ser una franja amplia y central, cubre gran cantidad de territorios continentales e insulares de América, África, Asia y Oceanía. Es en esta zona donde el Sol está en el cenit durante gran parte del año, emitiendo rayos en ángulos perpendiculares.

El clima tropical presenta un patrón de variaciones mínimas de temperatura al año, los cuales, acorde con Galvin (2009) los principales cambios se dan entre estaciones secas y húmedas, marcadas por el movimiento hacia el norte y el sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) en la porción central (ecuatorial), y por la incursión invernal de aire más frío a altitud cerca de los extremos del polo. Según la Clasificación Climática de Köppen, dentro del trópico se presentan las siguientes zonas climáticas: bosque tropical, sabana, estepa tropical, desierto tropical y subtropical, tierras altas, templado cálido sin estación seca, templado cálido con verano seco.

La zona central del trópico se caracteriza por presentar altos niveles de precipitación, altas temperaturas y gran humedad, lo que prolifera la dinámica natural del trópico. Por su parte, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que su principal posición ronda en los 5° N del ecuador, es de los grandes generadores de precipitación y alta humedad en la zona, ocasionando fuertes lluvias por convección del aire caliente desde la superficie, durante casi todo el año. El escenario de precipitación regional en el trópico, según Galvin (2009), muestra que las áreas desérticas tropicales presentan un promedio de 200 mm anuales, las zonas de los monzones cuentan entre 1000mm y 2500mm promedio anuales, los semidesiertos y las áreas oceánicas influenciadas por los anticiclones subtropicales tienen una precipitación total entre 200 mm y aproximadamente 1000 mm anuales, y las regiones

bajo la influencia directa de la ZCIT presentan un promedio de pluviosidad entre los 1000 mm y más de 3000 mm anuales.

Los eventos ciclónicos son parte del régimen climático de la franja tropical, los cuales necesitan una temperatura igual o mayor a 27°C para que tornen una dinámica giratoria sobre un mismo eje (Galvin, 2009), y toman como inicio entre la latitud 5° (hemisferio norte y sur) o unos grados superiores, para luego desplazarse hacia el Noreste (hemisferio norte) o hacia el Sureste (hemisferio sur), esto debido al efecto de Coriolis, que integra la física de la rotación y traslación de La Tierra como planeta en el Sistema Solar. Según sea la velocidad e intensidad de los vientos, los ciclones tropicales se clasifican en: depresión tropical, tormenta tropical y huracán (categoría 1-5).

Estos eventos ciclónicos son conocidos de distintas formas según la región en el trópico: huracán en el Pacífico nororiental, Atlántico Norte y Caribe; tifón en el Pacífico occidental; y ciclón tropical en el océano Índico y el suroeste del Pacífico. Las temporalidades de manifestación de los eventos varían según su ubicación, es decir, en el noroeste del Pacífico se presentan entre marzo y diciembre; al sur del Océano Índico entre noviembre y abril; el noreste del Pacífico, el Atlántico Norte y el Caribe se manifiestan entre junio y noviembre; y el Pacífico suroccidental entre diciembre y abril (Galvin, 2009).

La alta variabilidad climática favorece el establecimiento de cuatro grandes ecosistemas tropicales, los cuales cuentan con una correlación positiva con el promedio de lluvia anual regional (Osborne, 2000). Los ecosistemas representativos son: bosque lluvioso tropical, bosque seco tropical, sabanas tropicales y desiertos (Smith & Smith, 2007; Vargas, 2002; Osborne, 2000; Lugo *et al.*, 1974). Los bosques se ubican dónde el régimen de pluviosidad es de medio a alto, y los pastizales y arbustos, donde existe una estacionalidad marcada de la lluvia o un déficit anual (Vargas, 2002). Los bosques tropicales son el mayor reservorio en biodiversidad de todo el planeta terrestre, en donde más del 50% de la flora y fauna conocida, habitan en los trópicos (Mayaux *et al.*, 2005).

El bosque lluvioso tropical o selva tropical limitan generalmente entre las latitudes 10°N y 10°S, donde las altas temperaturas y la gran cantidad de lluvia son característicos, en promedio una temperatura de 25°C y 1500 mm anuales (Lasco, 2008), sin embargo, factores físicos como altitud, latitud y topografía, pueden mediar en la variación climática

zonal (Vargas, 2002). Las regiones de selva pluviosa tropical más grandes y representativas son: la Cuenca del Amazonas, en América del Sur; los bosques del sudeste asiático, la Cuenca del río Congo, África Occidental; y con menor área: en la costa Nororiental de Australia; Madagascar y el sur de Centroamérica (Corlett & Primack, 2008; Smith & Smith, 2007). También forman parte los bosques estacionales o los bosques tropicales secos, los cuales están influidos por una estacionalidad marcada de la precipitación durante el año, con una temporalidad de 5 a 8 meses de estación seca (FAO, 2012). Conforme más se aleje de la línea ecuatorial, más prolongada será la estacionalidad (Smith & Smith, 2007).

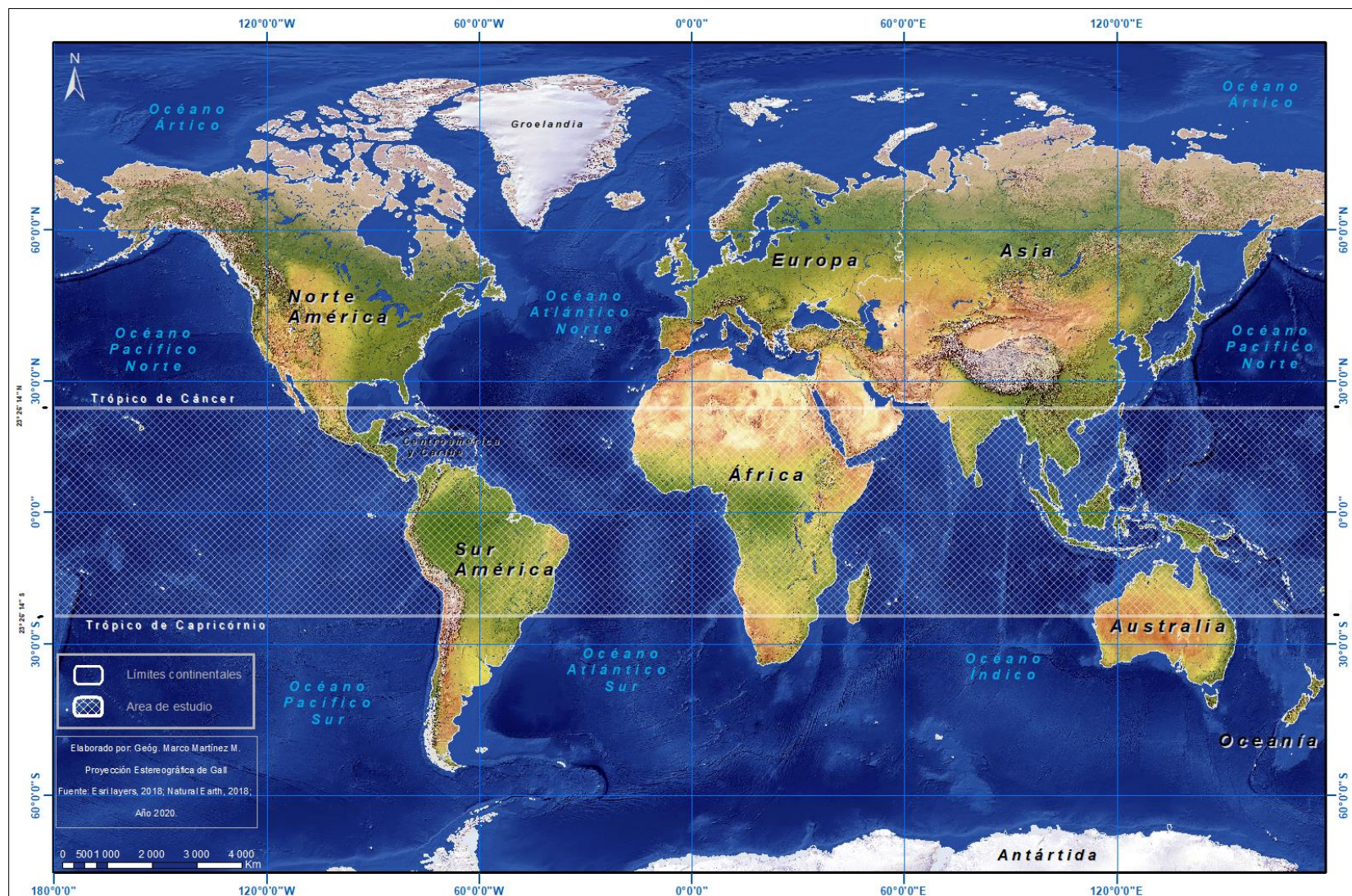
Las sabanas tropicales se caracterizan por una cubierta de gramíneas y árboles dispersos (vegetación de densidad cerrada y abierta), las cuales representan cerca del 43% de la superficie terrestre con un clima continental cálido con estacionalidad de lluvias y temperatura totalmente marcada (Gottsberger & Silberbauer, 2009; Smith & Smith, 2007; Cardoso & Bates, 2002; Walker, 1985). Según mencionan Cardoso y Bates (2002), las sabanas tropicales cubren entre 15 y 24.6 millones de kilómetros cuadrados en Suramérica, África y Asia, principalmente. La vegetación de estos biomas está expuesta y adaptada a incendios forestales recurrentes.

Las áreas más áridas en el trópico son los desiertos, con las temperaturas más altas en La Tierra, dado que absorben más calor del Sol que cualquier otra superficie en climas húmedos (Balasubramanian, 2013). Durante el verano, la temperatura en el día puede superar los 40°C y bajar hasta 25°C para la noche, y para el invierno, el rango de temperatura entre 10°C y 21°C; la precipitación es nula o altamente escasa durante el año, alcanzando niveles promedio de 250mm (Balasubramanian, 2013; Rodrigues & Campos, 2009). En el trópico existen desiertos fríos y calientes, desiertos extremos y semidesiertos, algunos con la humedad necesaria para convertirse en praderas o pasturas arbustivas, y conforme aumenta la precipitación hacia el ecuador, los desiertos se convierten gradualmente en sabanas tropicales (Smith & Smith, 2007).

Por otro lado, el tema poblacional que luce el trópico es sumamente significativo. Según State of the Tropics (2014), se estima que cerca del 40% del total de la población mundial habita en el trópico, siendo aproximadamente unos 2.8 billones de personas, con una tasa de crecimiento de 2.2% anual. En este mismo informe sobre el trópico, se acota que el porcentaje de población en países en vía de desarrollo que viven en extrema pobreza

declinó del 51% en 1981 al 28% en el año 2010. Sin embargo, es en África Central y Sur donde se ha duplicado la cantidad de habitantes en pobreza extrema en los últimos 30 años.

Por último, el crecimiento económico en los países tropicales mejoró en las últimas tres décadas de manera importante, llegando a obtener una tasa de crecimiento promedio anual de 2,1% entre los años 1980-2010, incluso mayor que el resto del mundo (1,8%) (State of the Tropics, 2014). De hecho, el sur y sureste de Asia fueron las regiones tropicales de mayor crecimiento, con un promedio anual de 4,5%, a contrario de África tropical que mostró un decrecimiento anual de -0,5%. No obstante, entre los años 2016 y 2018, la tasa de crecimiento económico cayó por debajo de la del resto del mundo por primera vez desde la crisis financiera asiática en 1998 (State of the Tropics, 2020); factores que pudieron haber afectado el desarrollo económico se mencionan los eventos climáticos y naturales extremos, conflictos políticos y sociales, y brotes de enfermedades. Liu *et al.* (2021) acota que el crecimiento económico en los trópicos afecta directamente la capacidad para el secuestro de carbono, lo que resulta en un aumento en la degradación ambiental.



Mapa 1. Ubicación del trópico enmarcado en grilla blanca, en un contexto global. Elaboración propia, 2020.

1.3. Problema

La zona tropical es rica en biodiversidad y recursos naturales, que han sido objeto de interés de los países desarrollados a lo largo de la historia, con el fin de apropiación de los recursos y expansión colonial. En el siglo XXI, la mayoría de países del cinturón tropical, contienen grandes reservorios naturales como bosques perennes, flujos permanentes de agua, especies endémicas y exóticas, así como suelos fértiles y productivos (Zuidema *et al*, 2013; Asner *et al*, 2009; Vargas, 2002).

No obstante, el trópico enfrenta una serie de desafíos y problemas que han relegado el desarrollo económico y humano de los pobladores, y esto puede comprenderse desde el análisis del cambio global. Existe una correlación positiva entre el crecimiento poblacional acelerado y la deforestación de los bosques húmedos tropicales (Carr, 2004), y analizado desde otra perspectiva, el 40% de la población total mundial habita en los países tropicales, es decir, más de 2.8 billones de personas, con una tasa de crecimiento anual de 2.2 % desde 1950, siendo un valor más alto que la tasa de crecimiento anual a nivel mundial (1.4%). Se estima que para el año 2050, más del 50% de la población mundial habite en el trópico (State of the Tropics, 2014).

Además, las actividades humanas de alto impacto han llevado al detrimento ambiental de muchas áreas en el trópico. La deforestación es conducida directamente por acciones del ser humano para lograr satisfacer todo tipo de necesidades (individuales y colectivas), como la alimentación, la materia prima para sus productos, creación y expansión de asentamientos, entre otros. Es decir, procesos sociales son los que han forzado la deforestación en los trópicos, entendido por factores económicos (comercio, industrialización, modelo económico), factores políticos, factores tecnológicos (agro-tecnología), prácticas socioculturales y crecimiento poblacional (Geist & Lambin, 2001). Empero, eventos naturales extremos o atípicos en la franja tropical (huracanes, terremotos, tormentas locales, entre otros) pueden aumentar procesos de deforestación, como sucede en Haití (Martínez, 2018). Según Taubert *et al*. (2018) la tasa de deforestación tropical es de 0.5% anual desde 1990, y entre los años 2000 y 2005, se convirtieron más de 274.000 km² de bosque tropical, aproximadamente el 1.4% de total del bioma forestal (Asner *et al*, 2009).

Los bosques tropicales contienen la mayoría de la biodiversidad terrestre de la Tierra, y gran cantidad de los taxones tienen una diversidad máxima en los trópicos (Corlett y Primack, 2011). Slik *et al.* (2015) proponen que existen al menos unas 40.000 especies de árboles tropicales, pero posiblemente más de 53.000, en contraste con solo 124 en la Europa templada. No obstante, las tasas más altas de pérdida de biodiversidad a nivel global se encuentran en los trópicos, y se estima, por ejemplo, que entre 1970 y 2014, el 89% de las especies de vertebrados han disminuido en América Latina (Roe *et al.*, 2019). La alta pérdida de biodiversidad tropical está muy asociada a la deforestación, caza, asentamientos humanos, cambio de uso de la tierra, entre otros (Giam, 2017).

Aunado a lo anterior, ocurre de forma paralela un dinámico cambio de uso de la tierra, en el cual se talan grandes áreas de bosques húmedos tropicales, por efecto del avance de la frontera agrícola, siendo uno de los principales motivos de la deforestación (Peng *et al.*, 2018). Cabe destacar que el cambio de uso de la tierra es un comportamiento espacial complejo, ya que convergen factores sociales, culturales, políticos y económicos, de los cuales han acarreado una degradación y pérdida de la fertilidad del suelo, así como acidificación (Lambin *et al.*, 2003). Del total del área tropical, cerca del 40% está dedicado a tierras para cultivo para el año 2009, y en el año 2003 se estimó una degradación de suelos en 28% en todo el trópico, y, entre los años 1980 y 2009, el área dedicada para agricultura en el trópico aumentó en 2%, sin embargo, la productividad creció intensamente, tal es el caso de los cereales, que han duplicado su producción para ese tiempo (State of the Tropics, 2014). El cambio en el uso de la tierra y la deforestación, son de los mayores contribuyentes antropogénicos a las emisiones anuales de CO₂, y para el año 2008, el trópico aportó el 15% del total de emisiones de CO₂ (Cerri *et al.*, 2007).

Paralelo a la evidente degradación ambiental en el trópico, no puede olvidarse el bajo desarrollo económico y social que presenta dicha zona. Para el año 2010, el 28% del total de la población que vive en los trópicos se encuentra en pobreza extrema, en otras palabras, más de dos tercios de la población mundial que vive en la pobreza extrema, reside en los trópicos. Por otra parte, más personas experimentan desnutrición en los trópicos que en el resto del mundo, siendo el 12% del total de habitantes en la zona. De la misma forma, la tasa de urbanización en el año 2012 llegó al 45%, aumentado más de 10 puntos porcentuales en treinta años. Empero, al siglo XXI los trópicos representan el 19% del total de la actividad económica mundial, siendo el Sureste y Sur de Asia, Brasil y México los

abanderados en el desarrollo económico. Por último, para el año 2011, el 74% de las naciones en el trópico son considerados Estados corruptos (State of the Tropics, 2014).

Datos puntuales del Siglo XXI detallan un poco la problemática que acarrea la zona tropical, por ende, la mayoría de los países que forman parte del trópico. Cifras no alentadoras que se gestan en el marco del auge poblacional, deterioro ambiental global y modelo económico neoliberal, y por cuestiones históricas, los trópicos han sido víctimas de tales aseveraciones socio-económicas, políticas y ambientales que han dificultado su proceso de sub-desarrollo en el mundo. Tras lo anterior, surge el cuestionamiento central para investigar, ¿Cómo influyen ciertas variables socio-económicas y biofísicas en la dinámica del cambio global en el trópico, entre los años 1992 y 2015?

1.4. Antecedentes

El cambio global es un tema que ha acaparado la atención de la comunidad científica desde múltiples enfoques y perspectivas. A su vez, sobresalen trabajos de muchas regiones del planeta que ahondan en temas de cambio global y la gama de causas que lo forman. Recientemente se han desarrollado investigaciones que concentran sus objetivos para analizar el cambio global, así como las variables que pueden conjugarse para explicar dicha dinámica espacial. El cambio global puede estudiarse desde una escala comunal, regional, continental o hasta un nivel planetario, es por ello que la comunidad científica toma sitios de estudio como laboratorios para analizar el territorio y sus cambios.

Dentro del análisis del cambio global es primordial investigar y ahondar en el cambio del uso de la tierra y del suelo, puesto que ejerce diversas energías que afectan o inciden en las dinámicas de los sistemas sociales y ambientales de un territorio. En ese sentido, Lambin *et al.* (2003) en *Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions*, destacan la complejidad del cambio del uso de la tierra y proponen un marco para una comprensión más general del problema, con énfasis en las regiones tropicales, en donde las modificaciones de la cobertura de la tierra, impulsadas por el clima, interactúan con los cambios en dicho uso.

Los buenos aprovechamientos de las emergentes tecnologías para fundamentar estudios del cambio global son numerosos, estableciendo vínculos desde la Geomática hasta el Manejo de Recursos Naturales, la Agronomía y las Ingenierías Forestal e Hídrica, entre otros campos científicos. Bajo este enfoque se apoyan diversos científicos que utilizan herramientas geoespaciales para analizar y cuantificar el cambio global a diversas escalas. Por ejemplo, en el artículo *Remote Sensing of the Land Surface for Studies of Global Change: Models Algorithms Experiments*, Sellers *et al.* (1992) señalan la importancia de utilizar sensores remotos para obtener información espacial del terreno sobre el uso de la tierra y relacionarlo con el desarrollo de algoritmos y experimentos de laboratorio y de campo, bajo la aplicación a mediana y gran escala

Del mismo modo, en el proyecto sobre la *Evaluación espacio-temporal del cambio global, del año 1973 hasta el año 2017, en el Departamento Sur de Haití*, Martínez (2018) analizó el cambio global por medio de la cuantificación el cambio de uso de la tierra y la correlación con variables de temperatura, precipitación, el aumento poblacional, PIB e IDH, para conocer si el cambio de uso está relacionado a un cambio climático y, además, cuál ha sido la contribución del cambio global en la vulnerabilidad global de la población en Haití. La investigación fue desarrollada mediante imágenes satelitales Landsat, que permitieron la evaluación de la dinámica del cambio de uso del suelo desde el año 1973 hasta el 2017.

Combinar observaciones de imágenes de satélite históricas y recientes publicadas, además de apoyarse en servidores de imágenes de Google Earth y una revisión de literatura exhaustiva, puede estimar la extensión global actual de la deforestación, la tala selectiva y el crecimiento secundario en bosques tropicales húmedos. Así lo establecen Asner *et al.* (2009) en el artículo titulado *A Contemporary Assessment of Change in Humid Tropical Forests*, donde encontraron que el 1.4% del bioma fue deforestado entre 2000 y 2005; las estimaciones geográficas de la tala selectiva indican que por lo menos 20% del bioma bosque tropical húmedo tenían algún nivel de explotación de madera entre tal temporalidad de estudio. Aclaran también que, las estimaciones de la huella humana son conservadoras, porque no detectan la deforestación a escala muy pequeña, la tala de baja intensidad ni el crecimiento secundario no reportado, tampoco incorporan otros impactos sobre los ecosistemas forestales tropicales, como el fuego y la cacería.

Lambin *et al.* (2003) destacan que un análisis sistemático de estudios de cambio de uso a escala local, llevados a cabo en un rango de escalas de tiempo, ayuda a descubrir principios generales que proporcionan una explicación y predicción de nuevos cambios en el uso de la tierra. Grau & Aide (2008) proponen que la conectividad global conduce hacia un cambio del uso del suelo, específicamente con el aumento en la demanda de alimentos y la economía internacional inciden directamente en la deforestación, así como la demanda de los biocombustibles y la migración hacia lo rural. La colonización de la frontera forestal por parte de pequeños agricultores migrantes puede seguir siendo la principal causa inmediata de la deforestación en Centroamérica y Amazonas (Carr *et al.*, 2013).

No obstante, Zuidema *et al.* (2013), sostienen en el artículo *Tropical forest and global change: filling knowledge gaps*, que las causas de los cambios recientes en la dinámica de los bosques tropicales siguen sin estar claras, A su vez proponen llenar estas brechas de conocimiento que requieren una nueva estrategia de investigación y medidas a largo plazo bajo un estudio a gran escala, basados por comprender algunos de los cambios que los bosques tropicales tendrán en el presente siglo tras una serie de cambios globales a distintas escalas.

La conversión del bosque y el cambio de uso de la tierra afecta en gran medida en la acumulación de gases de efecto invernadero, así lo confirma el IPCC (2019) en el Informe Especial sobre Cambio Climático y Tierra, donde evidencian que cerca del 23% de las emisiones antropogénicas totales de gases de efecto invernadero, entre los años 2007-2016, se derivan de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU por sus siglas en inglés). Además, tierras de pastoreo administradas, contribuyeron con más de las tres cuartas partes de las emisiones de N₂O de las tierras de pastoreo totales entre 1961 y 2014, con focos de alta emisión, principalmente en Europa y sur de Asia. Grandes desafíos se presentan bajo este contexto, como lo son la mitigación del cambio climático con medidas de uso de la tierra sostenible, desertificación, degradación de la tierra y seguridad alimentaria.

Explorando escenarios recientes y modelos históricos de cambio climático a una escala regional, con enfoque de cambio global en términos de algunos sectores representativos de la interfaz entre el medio ambiente y la sociedad (biodiversidad, la agricultura y otros usos relacionados de la tierra, como recursos hídricos y problemas de salud), Meadows

(2005) determinó en el artículo *Global Change and Southern Africa* que la distribución del bioma, la agricultura, los pastizales y los recursos hídricos destacan como impactos negativos que aumentarán la vulnerabilidad de la mayoría de la población de la región sureste africana a los peligros naturales.

Adicionalmente, Peñuelas *et al.* (2017) en *Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services*, centraron su análisis para revisar los impactos del cambio climático y otros componentes del cambio global y sus interacciones en los bosques terrestres de las regiones mediterráneas, con especial atención a sus impactos en los servicios ecosistémicos. Sostienen además que, los experimentos y observaciones indican que, si continúan los cambios en el clima, el uso de la tierra y otros componentes del cambio global, como la contaminación y la sobreexplotación de los recursos, es probable que se supere la resiliencia de muchos bosques, alterando su estructura y función y cambiando, en su mayoría, disminuyendo su capacidad para continuar brindando sus servicios actuales.

Las interrelaciones sociales con el medio natural son afectadas por el cambio climático y cambios multivariantes, específicamente en parques nacionales. Así, Carter *et al.* (2014) en la investigación *Global Change and Human Impact Challenges in Managing Iconic National Parks* explican algunos de los efectos que el cambio climático tiene en los componentes humanos y naturales de los emblemáticos sistemas de parques nacionales, y los efectos que las interacciones humanas tienen en el componente natural de los parques nacionales, particularmente a nivel local. Añaden luego que los procesos relacionados también afectan la sostenibilidad de los parques nacionales, que se ven agravados por los factores socioeconómicos, ambientales y políticos que generan la fragmentación del paisaje, la sobreexplotación de los recursos y las presiones relacionadas.

1.5. Justificación

El trópico es una de las zonas más biodiversas, tanto en sus aguas oceánicas, como el espacio terrestre, donde se alberga cerca de dos tercias partes del total de la biodiversidad del planeta (Giam, 2017). A su vez, múltiples factores ambientales, sociales, económicos y políticos hacen una región más dinámica y compleja, en la que se han centrado numerosos estudios para tratar de comprender ciertos hechos y fenómenos que en la zona ocurren. Sin embargo, han sido investigaciones locales o regionales, que toman como análisis los bosques tropicales amazónicos y del sureste asiático y su evidente deforestación (Nobre *et al*, 2016; Badger & Dirmeyer, 2015; Stibig *et al*, 2014; Brown *et al*, 2007; Pacheco, 2004), el impacto del cambio climático (Deb, 2018; Elmhagen *et al*, 2015; Granados, 2006) y cambio del uso de la tierra y análisis con sensores remotos, bajo escala global (Xiao *et al.*, 2018), por citar unos ejemplos. No obstante, investigaciones sobre cambio global (en su entender del análisis de relaciones causa-efecto multivariantes y multiescales) en el trópico son escasas (Zhou *et al.* 2013).

En el trópico, habita cerca del 40% del total de población mundial, donde existen los niveles más bajos de IDH y PIB en todo el planeta, expresando una vulnerabilidad social y económica importante que conlleva a crisis políticas, sociales y sanitarias (State of the Tropics, 2014). La importancia de caracterizar y evaluar el cambio global en el trópico trasciende en el análisis detallado del comportamiento y la dinámica global-local de las variables sociales y biofísicas que ejercen cierta energía en los territorios, y cómo estos a su vez sostienen una interrelación de entre sus sistemas.

Las problemáticas sociales y ambientales que se materializan en el trópico motivan la investigación para ahondar en las causalidades y actores que inciden en la deforestación, cambio de uso de la tierra y del suelo, degradación del suelo, pérdida de la biodiversidad, fluctuaciones en los sistemas económicos, interacciones políticas y mercado global, entre otros. Lo interesante, además, es plantear una diferenciación geográfica de las dinámicas entre los sistemas sociales y ambientales en el trópico.

Caracterizar entonces, el cambio global en el trópico, será bajo el enfoque del análisis de causa-efecto, donde se estudiarán a fondo las interacciones entre los sistemas sociales y ambientales y los flujos de energía entre sí, determinando los actores y los impulsos que

llevan a generar cambios en el trópico. Además, se comprenderá de una mejor manera el cambio global tropical con la elaboración del Índice de Cambio Global en el Trópico, el cual brindará explicaciones basadas en relaciones multivariantes sobre la distribución espacial del cambio entre 1992-2015.

Por lo tanto, en este proyecto se conjugarán series temporales de variables ambientales, sociales, económicas y políticas que inviten a estudiar el cambio global desde el análisis multivariante geoespacial. Al manipular uno o varios de los elementos del cambio global, se logrará cuantificar los efectos directos e indirectos de los procesos naturales y antrópicos que ocurren en el trópico (Zhou *et al.* 2013). A su vez, el estudio del cambio global a gran escala, brindará respuestas paralelas para el comportamiento del clima y la dinámica de cambio de la cobertura de la tierra basado en un histórico para repensar el futuro.

1.6. Objetivos

1.6.1. General

Caracterizar los factores clave que contribuyen a una mayor comprensión de la dinámica del cambio global en los trópicos mediante la creación del Índice de Cambio Global en el Trópico, desde los años 1992 hasta el 2015.

1.6.2. Específicos

- i. Cuantificar el cambio en la cobertura de la tierra, en el producto interno bruto, en la población, el índice de desarrollo humano, la temperatura y precipitación en los trópicos por medio de fórmulas estadísticas que permitan analizar la variabilidad temporal de cada variable desde 1992 hasta el 2015.
- ii. Crear el Índice de Cambio Global para el trópico, con base en la cuantificación de cambios de las variables de cobertura de la tierra, el producto interno bruto, la población, el índice de desarrollo humano, la temperatura y la precipitación, para mostrar espacialmente las zonas de fuerte, mediana o baja intensidad de cambios multivariantes entre los años 1992 y 2015.
- iii. Realizar un análisis en cuatro regiones tropicales que muestren cambios y relaciones geográficas significativas, con base al Índice de Cambio Global para el trópico, para visualizar de forma más precisa la dinámica acumulativa del cambio global entre los años 1992 y 2015.

2. Capítulo segundo: Marco conceptual

2.1. *Cambio global*

A escala global, se han observado y registrado alteraciones socioambientales que tienen puntualmente expresiones en el Planeta Tierra. Aumentos perceptibles de la temperatura promedio, así como alteraciones en los regímenes de precipitación y el consecuente deshielo en las zonas polares favorecen el aumento de los niveles de los mares, lo cual a su vez afecta directamente a las poblaciones situadas en las regiones costeras. En la misma línea, el aumento poblacional a escala mundial ha crecido de forma exponencial. Según datos de la ONU, para el 2014 la población mundial alcanzó unos 7.200 millones de personas, proyectándose para el año de 2050 unos 10.000 millones de habitantes en la Tierra. Todo este crecimiento poblacional ejerce presión sobre el territorio, dado que demanda más tierras para cultivarlas, criar su ganado, instalar actividades de aprovechamiento de los recursos y desarrollar asentamientos humanos, diferenciado por niveles de ingreso, patrones de consumo y de producción.

Respecto a lo anterior, Zamora *et al.* (2014) fundamentan que la agricultura produjo un cambio radical en la historia de la humanidad al favorecer el aumento de la población y el establecimiento en territorios donde no habría sido posible sobrevivir, lo que condujo a la concentración de los seres humanos en poblados más o menos fijos. En otras palabras, el crecimiento de la población ha ido acompañado de un rápido incremento en el consumo per cápita de recursos tales como territorio, agua y energía (Duarte *et al.*, 2006; Lambin & Meyfroidt, 2011).

Del mismo modo, los cambios de cobertura y usos de la tierra se han intensificado en las últimas décadas, tal como lo aseguran Falcón (2014), Mas *et al.* (2009) y Rosete *et al.* (2009), gracias al incremento poblacional, así como la demanda de recursos naturales para satisfacer las necesidades de supervivencia de la población y las formas y mecanismos de apropiación de los recursos, con frecuencia ligados a fuerzas sociales, políticas y económicas, han presentado implicaciones estructurales y funcionales sobre los ecosistemas.

Equihua-Zamora *et al.* (2015) apuntan que, desde los inicios de la civilización humana, el aumento de la incipiente producción agrícola impulsó la tala de los bosques y la transformación de la cubierta vegetal. En la misma línea, Duarte *et al.* (2006) acotan que el dominio antrópico del territorio ha supuesto una conversión de ecosistemas no perturbados a ecosistemas domesticados como pastizales o campos de cultivo, o espacios totalmente antropizados como zonas urbanas.

Como se observa, son diversos los factores que inciden en un cambio global, los cuales tienen repercusiones en el territorio. En otras palabras, el término cambio global define al conjunto de cambios ambientales afectados por la actividad humana, con especial referencia a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra. Se incluyen en este término aquellas actividades que, aunque ejercidas localmente, tienen efectos que trascienden el ámbito local o regional para afectar el funcionamiento global del sistema Tierra (Duarte *et al.* 2006). De manera más concisa, cambio global se puede referir al cambio de una fracción espacial significativa de un determinado fenómeno natural y que, los cambios acumulativos tienen conexiones directas a cambios sistémicos de la Tierra, que, con el tiempo, llegan a alterarse las existencias mundiales netas de los recursos afectados (Meyer & Turner, 2002) (Figura 1).

Además, las interacciones de las actividades de los seres humanos y de procesos naturales, confieren en una amplia gama de cambios en las condiciones físicas de la tierra, océano y atmósfera (Rounsevell, 2006). Con lo anterior se concluye que, el ser humano es el principal autor del cambio global en la actualidad, y que dichos cambios se están desarrollando a un ritmo tal, que los tiempos de reacción se acortan, con las consiguientes dificultades para la necesaria adaptación de los sistemas naturales y humanos (Ozcáriz, 2008).

El cambio global debe comprenderse como un concepto amplio y holístico, multivariable y dinámico bajo un análisis espacio-temporal. Por lo tanto, se integra información sobre el cambio de cobertura de la tierra, el indudable aumento poblacional y su consecuente presión ejercida en el territorio, las posibles fluctuaciones climáticas, específicamente en temperatura y precipitación, así como los variables que expresen, en cierta medida, el desarrollo social y económico del territorio. El cambio global es interactivo espacialmente,

ya que una causa a escala local puede generar un resultado a escala regional, o una relación global-local.

Es de mencionar que, las series temporales de observación suponen el núcleo central de la investigación sobre cambio global y cambio climático, pues permiten comprobar cambios en tendencias y variaciones con respecto a patrones estadísticamente representativos (Martínez, 2018); de hecho, la herramienta que ha dado un empuje definitivo a la ciencia y observación del cambio global es la teledetección desde satélites orbitales (Duarte *et al.* 2006). Así mismo, Taubert *et al.* (2018) señalan que la tecnología en torno a los sensores remotos y su correcta aplicación permite detectar patrones de fragmentación de bosques y cambio de uso de la tierra, entre otras aplicaciones.

La detección del cambio global y su impacto en los ecosistemas, así como de las anomalías y las respuestas a las perturbaciones requiere, por un lado, de observaciones locales finas y prolongadas en el tiempo, y conectadas entre sí mediante redes de sistemas de observación, y, por otro lado, de observaciones sinópticas de menor resolución, pero de escala global (Duarte *et al.* 2006).

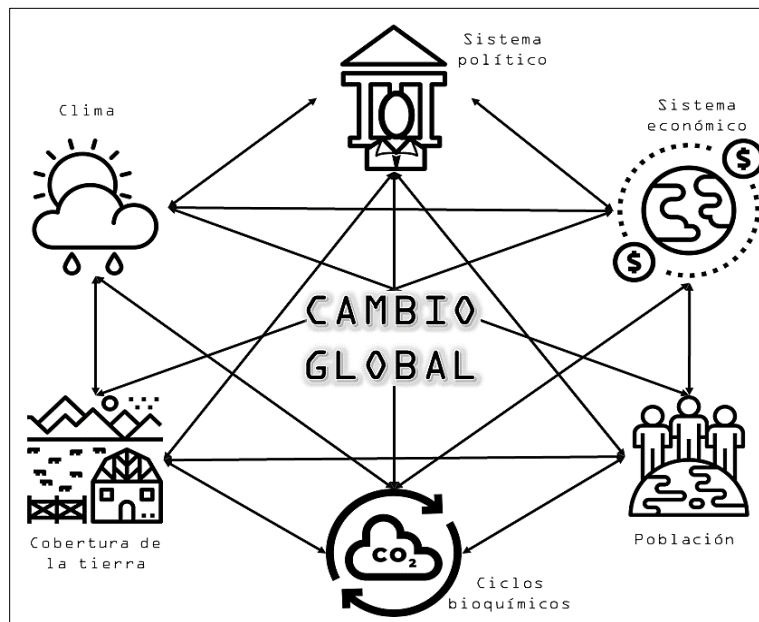


Figura 1. Factores sociales, económicos y naturales que conforman el cambio global. Elaboración propia, 2019.

Además, interacciones de las actividades de los seres humanos y de procesos naturales, confieren en una amplia gama de cambios en las condiciones físicas de la tierra, océano y atmósfera (Rounsevell, 2006). Por último, cambio global hace alusión a un conjunto de factores físicos y sociales cambiantes en espacio, tiempo y escala, y que las interacciones entre sí dinamizan y dificultan la predicción de una evolución del espacio (Martínez, 2018).

2.2. Presión poblacional en el ambiente: nuestra huella ecológica

El crecimiento poblacional que la humanidad está presenciando en pleno Siglo XXI, fue proyectada por Tomas Malthus en 1798 en su ensayo "*An Essay on the Principle of Population*", donde manifestaba que la población es infinitamente mayor que la capacidad de la tierra para producir alimentos para el hombre. Esto implica que la dificultad de la subsistencia ejerza sobre la fuerza del crecimiento de la población una fuerte y constante presión restrictiva" (Malthus, 1798). A mediados del siglo XVIII, inició un evidente crecimiento poblacional en todo el mundo, producto de las revoluciones agrarias, industrial y tecnológica (Manrique *et al.* 2007; Duarte *et al.* 2006), lo que motivó a generar la explosión poblacional que sustentamos hasta la fecha, ocasionando desde el año 1700 la conversión del 19% de los bosques del mundo en tierras de cultivo y pastos, lo que ha alterado los ciclos biogeoquímicos, las características de la superficie terrestre y los ecosistemas, cambiado significativamente el sistema de la Tierra (NCR, 1999).

Ehrlich (1968) postula que el crecimiento demográfico crecerá siempre y cuando el índice de natalidad sea mayor al índice de defunción, situación que estaría llevando a la dominación de La Tierra y la presión sobre sus recursos, con el fin de no bajar los estándares de vida promulgados por el modelo económico. El crecimiento poblacional acelerado desencadena excesos de consumo y de extracción de recursos naturales, lo que fuerza al sistema a no permanecer intacto al llevarlo más allá de sus propios límites naturales, sumando el lerdio entendimiento del problema para saber cómo actuar en el tiempo requerido (Meadows *et al.*, 1972).

El crecimiento poblacional es un tema que cala en los intereses científicos, económicos y políticos, pero ha tenido matices de preocupación al proyectar tasas de crecimiento elevadas por año, lo que indica a su vez, mayor consumo de recursos naturales y

aprovechamiento de territorios no hábiles para asentamientos. Cohen (1995) en mención de Duarte (2006) estimó que el número máximo de personas que puede soportar el Planeta Tierra, con base en un inventario de recursos disponibles (alimentos, agua, madera, entre otros), será entre los 6.000 y 15.000 millones de habitantes, con un valor mediano cercano a los 10.000 millones de habitantes, cifra a la que se aproximan mucho las proyecciones demográficas para el siglo XXI.

La población sigue creciendo aceleradamente, sin planificación alguna y con un patrón espacial desigual. Por ejemplo, mientras se expone un aumento poblacional promedio, algunos países experimentan una disminución de la población, siendo éstos los de mayor nivel de desarrollo; los 48 países menos desarrollados (muchos ubicados en la franja tropical) casi triplicarán su población, de 658 millones a 1.800 millones (Manrique *et al.* 2007). Así mismo, se estima que se alcance un total de habitantes para el año 2030 de 8.6 mil millones, 9.8 mil millones en 2050 y 11.2 mil millones en 2100 (ONU, 2017). Con lo anterior, también es de considerar el auge de las actividades industriales, las cuales consumen mucha materia prima natural.

Históricamente, se han convertido hectáreas sin perturbar para actividades netamente antrópicas, las cuales funcionan para satisfacer las necesidades alimenticias y de asentamientos. Desde 1700 hasta inicios del siglo XXI, la superficie domesticada ha aumentado de un 6% a un 40% de la superficie terrestre, con un dominio de la conversión a pastizales, según acotan Goldewijk & Battjes (1997) en mención de Duarte (2006).

La huella humana sobre la biosfera, considerada dentro del concepto del Antropoceno (etapa geológica actual del Planeta Tierra, en la que la humanidad ha emergido como una nueva fuerza capaz de controlar los procesos fundamentales de la biosfera) (Crutzen & Stoermer, 2000) es de total evidencia, con rasgos físicos marcados sobre el ambiente natural. La presión poblacional suele estudiarse desde el uso de los sensores remotos, realizando análisis multitemporales para estudiar el avance de la frontera agrícola sobre espacios forestales, o a su inversa, observar el borde del bosque.

Es aquí donde se cuestiona la capacidad de carga del planeta, ante los crecientes indicadores de aprovechamiento de recursos naturales y del territorio, y surge el término y la practicidad de huella ecológica como métrica de sostenibilidad (De la Torre, 2014). La

huella ecológica concierne la demanda humana de recursos naturales y la capacidad de la Tierra de proveer y regenerar el capital ambiental (WWF, 2018; Galli *et al.*, 2014; Lenzen *et al.*, 2006; Wackernagel & Rees, 1996). Sin embargo, los factores que tienen más peso y conducen hacia una mayor huella ecológica son el tamaño de la población y la riqueza, y otros factores socio-económicos que usualmente son señalados como impulsores de alto impacto ambiental (urbanización, distribución geográfica de la población, estructura económica, entre otros), generan un minio efecto como factores ambientalmente estresantes (Dietz *et al.*, 2007).

En los países tropicales, ésta dinámica social y ambiental es un tema de estudio contemporáneo. Investigaciones indican que la presión poblacional ejercida sobre el territorio, más específicamente sobre el medio natural, conduce a una disminución paulatina de la cobertura forestal. Así lo indican DeFries *et al.* (2010) donde el crecimiento de la población en áreas urbanas, adicionado a la extracción de material maderero para diversas actividades económicas presentan una correlación positiva con la deforestación en el trópico. Sin embargo, acotan que el crecimiento de la población rural no muestra ser una variable que afecte a la disminución de áreas boscosas en el trópico. Por su parte, la eliminación de bosques tropicales conlleva a la pérdida irreversible de especies exóticas de flora y fauna, así como la alteración de ecosistemas naturales.

El aprovechamiento del territorio y de ambientes naturales por parte del ser humano para la satisfacción de sus necesidades básicas dentro del concepto biológico de supervivencia, hace que se modifiquen espacios naturales por espacios netamente antrópicos (Figura 2). Es decir, el cambio de uso de la tierra es un fenómeno usualmente correlacionado con el actuar del ser humano, siendo uno de los motores principales para efectuar dicha dinámica espacial (Martínez, 2018; Duarte, 2006; Carr & Barbieri, 2006; Geist & Lambin, 2001).

Es común observar el cambio de la cobertura forestal por infraestructura para uso urbano, o por el establecimiento de pastizales para las diversas actividades agropecuarias, por ejemplo. Carr (2004) sostiene que la transformación de bosques para la expansión agrícola es la marca más significativa de la actividad del ser humano en la superficie del suelo del planeta. Como efecto, se formula que los cambios de uso de la tierra tan acelerados y sin ninguna planificación a nivel global por causa del ser humano, sea uno de los importantes causantes de la emisión y concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera

del Planeta Tierra (Goldewijk & Ramankutty, 2010). No obstante, también se debe considerar que el cambio de uso de la tierra puede ser ejercido de forma natural, a causa de eventos meteorológicos extremos, sismos de gran magnitud, incendios forestales naturales, entre otros eventos (Martínez, 2018).

La presión poblacional es sufrida por el ambiente natural, ya que es ejercida sobre este. El comportamiento espacial sobre el consumo del territorio es desigual alrededor del Planeta Tierra, por ende, existen regiones más vulnerables que otras a la presión que ejerce el ser humano, como lo es el trópico. Es allí donde habita la proporción más grande de población en pobreza extrema y en condiciones deplorables, lo que conduce a un mal manejo de residuos sólidos y líquidos en las ciudades, que consecuentemente, adiciona más contaminación ambiental a los ríos, bosques y otros ecosistemas naturales cerca de las ciudades.

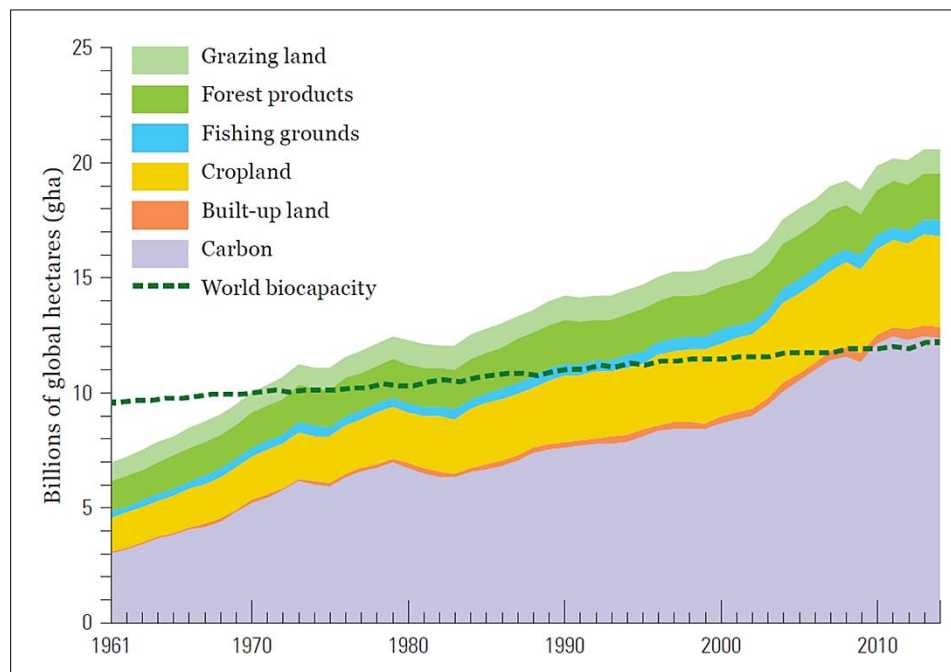


Figura 2. Huella ecológica mundial de consumo por tipo de uso en hectáreas globales, 1961-2014. Fuente: WWF, 2018.

2.3. Cambio climático observado y antropogénicamente inducido

El clima es uno de los sistemas más dinámicos y energéticos dentro del Planeta Tierra. El comportamiento climático condiciona la vida de millones de especies de flora y fauna,

influye en el proceso pedológico, así como en el modelamiento del terreno y dinámica de los sistemas fluviales. Además, incide directamente en la circulación interna de elementos químicos en los océanos, su nivel del mar y de la distribución biogeográfica de las especies marinas. Por su parte, el clima es parte del ser en la cotidianeidad del humano, es decir, condiciona fuertemente en las actividades agropecuarias a corto y mediano plazo, así como en muchas de las decisiones en el tanto político y económico (IPCC, 2001).

El clima, según se define generalmente como el "tiempo promedio", o más rigurosamente, como la descripción estadística en términos de la media y variabilidad de las cantidades relevantes a lo largo de un período de tiempo que va de meses a miles o millones de años. Estas cantidades son más a menudo variables superficiales como la temperatura, la precipitación y el viento. El clima en un sentido más amplio es el estado, incluyendo una descripción estadística, del sistema climático (IPCC, 2004). Por otro lado, Cifuentes (2010) define el clima como el conjunto de estados y cambios de las condiciones atmosféricas observadas en un área determinada durante un período de al menos 30 años. Los factores que constituyen el clima de una región son las condiciones promedio y variabilidad de los eventos extremos de precipitación, temperatura, viento y presión atmosférica (Figura 3).

El clima está mediado a su vez, por condiciones físicas del Planeta Tierra como lo son la latitud geográfica, la altitud, la distancia al mar, las orientaciones del relieve terrestre respecto al sol, la dirección de los vientos, las corrientes oceánicas, la radiación solar, composición atmosférica y el efecto de albedo (Useros, 2012), así como, por condiciones efectuadas por el ser humano, por ejemplo, las actividades industriales, agropecuarias y extractivistas, entre otras.

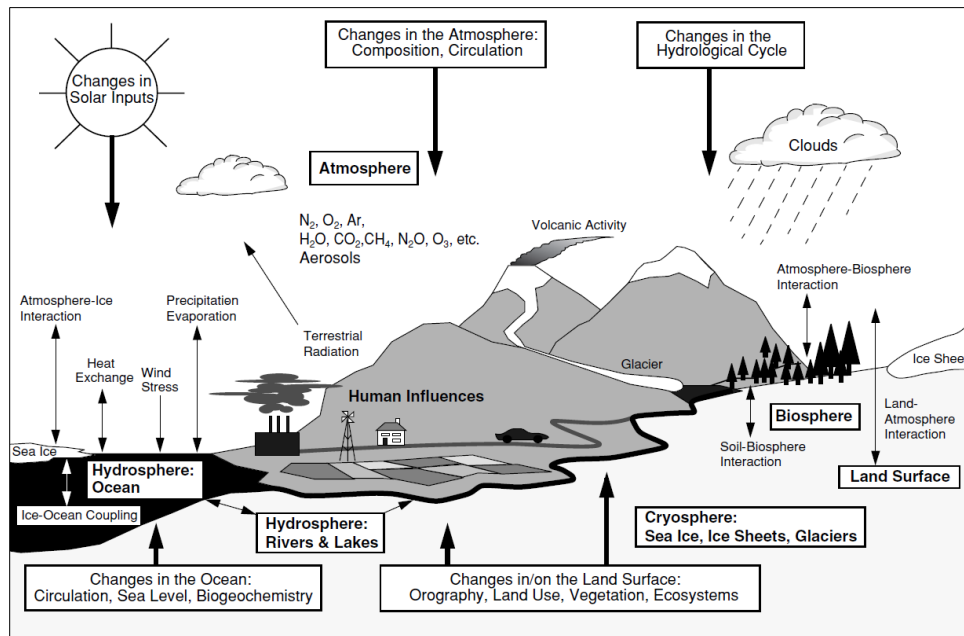


Figura 3. Componentes del sistema climático global (negrita), sus procesos e interacciones (flechas delgadas) y algunos aspectos que pueden cambiar (flechas gruesas). Fuente: IPCC, 2001.

Sin embargo, en las últimas décadas se han activado las alarmas sobre un acelerado cambio del clima a nivel global, en donde una serie importante de organizaciones e instituciones científicas han puesto serios intereses por estudiarlo a fondo y minimizar los efectos negativos consecuentes. El clima es variable durante una serie temporal amplia, bajo la influencia de mecanismos internos propios del planeta (El Niño/Oscilación del Sur, por ejemplo) y por factores externos naturales (actividad solar, movimientos planetarios, erupciones volcánicas y cambios de la composición atmosférica). Se consideran las actividades humanas como determinantes en el cambio climático de los últimos 50 años (IPCC, 2014; Cifuentes, 2010; Caballero *et al.* 2007).

El IPCC (2004) detalla que el cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea de forma natural o como resultado de la actividad humana. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992) se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

A lo largo de la historia natural del Planeta Tierra, han ocurrido una serie de cambios en el clima, los cuales han variado entre temperaturas promedio marcadamente frías, y temperaturas promedio cálidas, como ocurrió hace unos 250 millones de años, en donde el planeta se encontraba saliendo de una etapa glacial y entrando a una era de climas particularmente cálidos como lo fue la era Mesozoica (Caballero *et al.* 2007).

Según investigaciones, los cambios observados no ocurren de manera uniforme en todo el planeta, sino que existen áreas que actualmente presentan descenso en la temperatura, mientras el promedio global indica un aumento sostenido. De acuerdo con Cifuentes (2010) el calentamiento de los océanos y de la superficie terrestre, los cambios en los patrones de distribución e intensidad de la precipitación, el incremento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares, el desplazamiento del hielo marino en el Ártico y la disminución de la capa de nieve en el hemisferio norte son fenómenos que confirman el calentamiento de la superficie del planeta (Figura 5). De manera puntual, la temperatura superficial ha aumentado 0.74 °C entre 1900 y 2005 (IPCC, 2014; Useros, 2012; Cifuentes, 2010; Caballero *et al.* 2007) (Figura 4). Se presencia entonces, un inequívoco calentamiento global, que valida las teorías del nuevo período de calentamiento del planeta tras la anterior disminución de temperaturas.

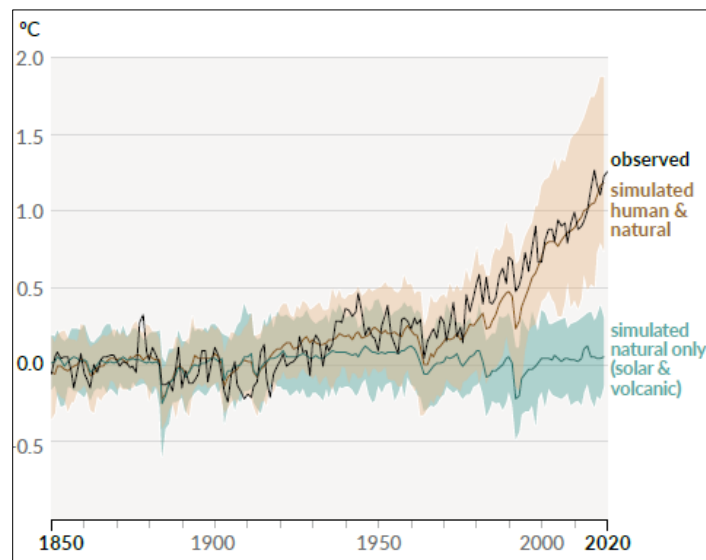


Figura 4. Cambio en la temperatura global de la superficie (promedio anual) según lo observado y simulado utilizando factores humanos y naturales y solo naturales (ambos 1850-2020). Fuente: IPCC, 2021.

Sin embargo, el calentamiento global actual a pesar de ser un proceso natural de la dinámica climática terrestre, el ser humano con sus acciones sobre el Sistema Tierra ha ocasionado una aceleración del proceso del calentamiento en La Tierra, con el aumento poblacional, procesos de industrialización y agricultura, así como el cambio de uso de la tierra desde el Siglo XVIII (Elmhagen *et al.* 2015; IPCC, 2021) (Figura 6). La emisión de severas cantidades de CO₂, N₂O y CH₄ por medio de tales actividades humanas, ha proliferado la acumulación de dichos gases en la atmósfera, lo que conduce a una manifestación del efecto invernadero aún mayor en el sistema terrestre. Los aumentos observados en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) desde alrededor de 1750 son inequívocamente causados por actividades humanas (IPCC, 2021).

El cambio de cobertura de la tierra, con mayor énfasis en la deforestación, ha sido un causante principal del aumento de la temperatura en el último siglo. El 24% del total de las emisiones generadas, son causadas por el cambio del uso de la tierra, ganadería, agricultura, y silvicultura (IPCC, 2021), y el 13% lo aportó la deforestación (Edenhofer *et al.*, 2014 en Seymour & Buchs, 2016). Los bosques intactos o bosques en estado de recuperación y restauración son capturadores de CO₂ de la atmósfera, mientras que procesos de deforestación liberan por sí mismos más cantidad de CO₂, ya sea por los incendios forestales o por el cambio de cobertura a actividades agrícolas, ganaderas o coberturas impermeables. Para el 2019, las concentraciones atmosféricas de CO₂ fueron más altas que en cualquier otro momento en al menos 2 millones de años atrás (IPCC, 2021).

Según Seymour & Buchs (2016) más de la mitad del total de la deforestación global ocurre en los trópicos, donde se encuentra, además, el mayor reservorio de carbono forestal del planeta, lo que significa que la deforestación tropical es aún mayor dañina que en alguna otra región terrestre.

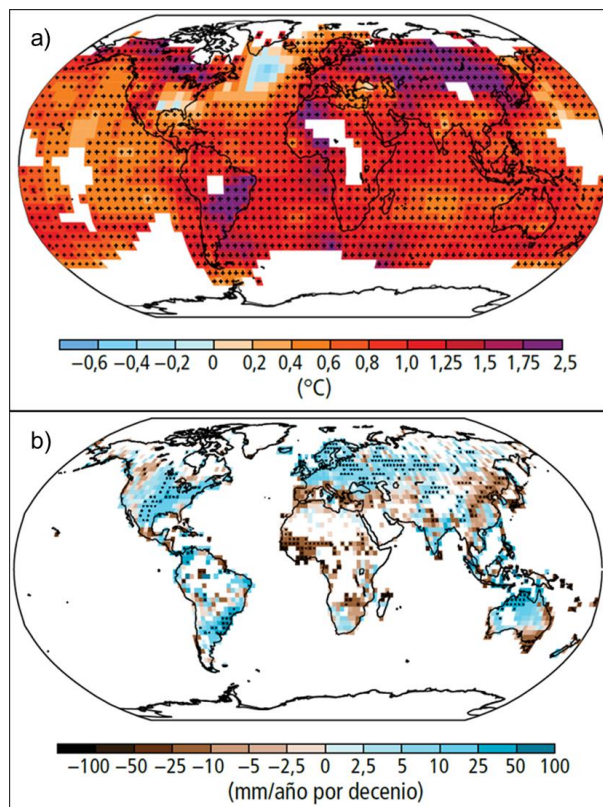


Figura 5. a) Mapa de los cambios observados en la temperatura en superficie entre los años 1901 y 2012, derivado de las tendencias en la temperatura determinadas por regresión lineal de un conjunto de datos. **b)** Mapa de los cambios observados en la precipitación, en 1951 y 2010; tendencias en la acumulación anual. Fuente: IPCC, 2014.

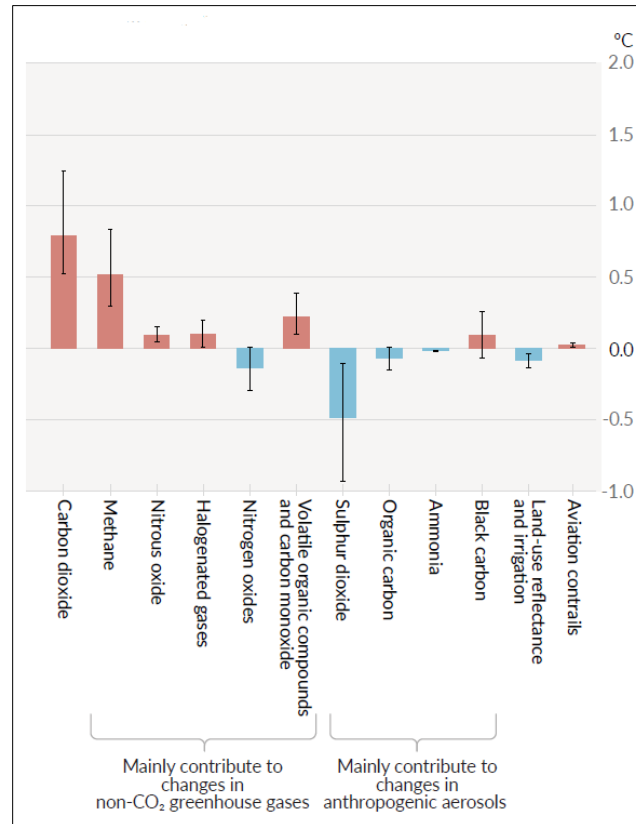


Figura 6. Contribuciones al calentamiento de 2010-2019 en relación con 1850-1900, evaluadas a partir de estudios de forzamiento radiactivo Fuente: IPCC, 2021.

El calentamiento global, comprendido desde el cambio climático, está ocasionando una serie de modificaciones en el planeta. Según el IPCC (2021), los Impactos observados atribuidos al cambio climático y al calentamiento global afectan fuertemente a los sistemas naturales y humanos: se ha observado cambios en las precipitaciones y derretimiento de nieve o hielo, lo que ha provocado una alteración notable en la dinámica hidrológica, afectando la cantidad y calidad de los recursos hídricos; muchas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático en curso; así como impactos categóricos en el rendimiento de los cultivos (impactos negativos en granos a nivel mundial).

2.4. Desarrollo sostenible

Los cambios ambientales globales que el planeta ha experimentado en los últimos siglos han sido abrumadores, disparados por la dominación y sobreexplotación antrópica del medio natural sin una adecuada gestión de los recursos que asegure y garantice reservas para el futuro próximo. Ellis *et al.* (2010) descubrieron que para el año 1700, cerca del 95% de la tierra sin hielo eran tierras silvestres y biomas seminaturales, y para el año 2000, el 55% de esas tierras ya se habían transformado en pastizales, áreas de cultivo, aldeas y centros de urbanos densos. En la misma investigación detallan que, para la época de la Revolución Industrial, casi el 50% de la población vivía entre paisajes seminaturales, y para el año 2000 fue solo el 4%, aumentando consecuentemente del 5% al 39% las tierras utilizadas para la agricultura y asentamientos urbanos.

A mediados del siglo XX, diversas instituciones internacionales y ONGs inspiradas en la cooperación internacional sobre el medio ambiente, tomaron cartas en el asunto para tratar y discutir el desarrollo económico y la contaminación ambiental como eventos que estaban comprometiendo el planeta y la salud humana, siendo entre éstas la ONU la más significativa (Klarin, 2018). En 1980, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) enlazó ideas de la economía y medio ambiente para crear el concepto de desarrollo sostenible, mencionado por primera vez en la Estrategia de Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 1980). No obstante, en 1987 la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo publicó el Reporte Brundtland, donde define el desarrollo sostenible como el ejercicio de “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (ONU, 1987).

El desarrollo sostenible se centra en garantizar que las actividades económicas actuales no alteren el ambiente drásticamente para las generaciones venideras. Bajo ese principio, se busca satisfacer las necesidades básicas de todas las personas de forma controlada y racionalizada, con miras a mejorar los estándares de vida de las sociedades actuales y futuras. Sin embargo, las interacciones económicas globales y la globalización determinan el nivel de demanda sobre el ambiente, el cual es intenso, dinámico y abrumador, causando una huella ecológica cada vez más agotadora de los recursos existentes (Rudolph & Figge, 2017), lo que generan patrones de desarrollo desiguales que hacen que, aún estados

desarrollados con poblaciones relativamente pequeñas tengan un nivel de consumo de recursos muy altos. Es decir que los factores demográficos no son los únicos motores de presión sobre el cambio de uso de la tierra y la deforestación en el trópico.

Saha (2020) sostiene que el capital humano puede sustituir el capital natural determinando una sostenibilidad débil, mientras que, si el capital humano es igual al capital natural, se refiere a una sostenibilidad fuerte. En el caso de la deforestación y cambio de uso de la tierra en el trópico, representa la débil sostenibilidad, donde el objetivo es satisfacer las demandas del mercado y aumentar las ganancias financieras. Buscar el balance entre desarrollo y sostenibilidad es complejo, sobre todo cuando existen múltiples interacciones entre sistemas sociales y ecológicos. El desarrollo sostenible enfrenta una amplia lista de desafíos globales con efectos regionales y locales, acorde a Dalal-Clayton & Bass (2002) se consideran:

- Disparidad económica e inestabilidad política.
- Extrema pobreza.
- Desnutrición y enfermedades.
- Marginalización
- Crecimiento poblacional.
- Alto consumo de recursos naturales.
- Uso de energía no renovable.
- Cambio climático.
- Deterioro de los recursos naturales y pérdida de la biodiversidad.
- Contaminación ambiental.
- Aumento de la escasez del agua.

Reconociendo la problemática y los desafíos que el planeta enfrenta, y tras una serie de convenciones internacionales para acordar medidas a nivel país sobre el medio ambiente y desarrollo económico, en la Cumbre del Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas del 2015 se publicó la Agenda 2030, con el fin de acabar con la pobreza y encaminar al mundo por un camino de paz, prosperidad y oportunidades para todos en un planeta saludable (ONU, 2020). La Agenda para el Desarrollo Sostenible consta de 17 Objetivos de Desarrollo (ODS), que continúan con el trabajo iniciado por los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), enfocados a una transformación de los sistemas financieros, económicos y políticos gubernamentales, para garantizar los derechos humanos de todos (Figura 7).

Los ODS fueron aprobados por todos los países miembros de las Naciones Unidas, implicando que sus políticas públicas sean diseñadas con miras en el desarrollo sostenible, guiadas por 169 metas e indicadores integrales. No obstante, hasta la fecha han sido insuficientes los esfuerzos que se han hecho, comprometiendo que sea factible considerar la promesa de la Agenda 2030 para las futuras generaciones (ONU, 2020). Woodbridge (2015) recalca que los ODS a nivel global tendrían desafíos que enfrentar: a) posible pérdida de integración de los 17 objetivos de forma exitosa, ya que los gobiernos pueden enfocarse sólo en los ODS que más se ajusten a sus políticas nacionales; b) poca capacidad de seguimiento a las estadísticas de monitoreo de los ODS en las oficinas nacionales; y c) el financiamiento para la implementación de los ODS en los países en vías de desarrollo tendría que venir de los países “desarrollados”.



Figura 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: ONU, 2020.

Se visualiza el enfoque de desarrollo sostenible vital para la formulación de políticas públicas y lograr enmarcar las actividades económicas y sociales dentro de la adaptación y cuidado del medio natural. Dalal-Clayton & Bass (2002) proponen que los gobiernos deben adoptar una visión estratégica de participación coordinada y de alianza internacional, considerando los efectos adversos de la globalización y cómo obtener ventaja sobre ello. Así mismo plantean que, el diálogo transparente y continuo entre sociedad-Estado lograrían

acciones concertadas y mejor planificadas, con proyectos integrales y participativos, evitando trabas y acciones centralizadas que hagan ver culpable al Estado por los efectos negativos en el desarrollo.

2.5. *Análisis de la causalidad en sistemas naturales y sociales*

En los últimos dos siglos, el planeta ha evidenciado cambios sustanciales en el ambiente, en gran parte, mediado por el auge de la actividad industrial y comercial y al aumento poblacional desmedido. Esta época es caracterizada por cambios ambientales muy notables, impulsados en su mayoría por el ser humano, exacerbando la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y proliferando cada vez más un mundo globalizado y conectado en todas sus dimensiones, la que es posible llamarla Antropoceno (Crutzen & Stoermer, 2000). El ser humano, en su afán de dominar el mundo, ha creado conexiones con el ambiente, el cual ha sido el proveedor de materia prima y servicios ecosistémicos para satisfacer sus necesidades básicas (y otras no tan básicas). No obstante, las interacciones ambientales han existido desde la creación del Planeta Tierra.

Espacios geográficos a escala global, regional o local, comparten flujos de energía y de materia tras la conexión de ciertos elementos de carácter natural y social, lo que dinamiza y vuelve un más compleja la comprensión del sistema terrestre como un todo. En este sentido, Liu *et al.* (2013) proponen que existen sistemas sociales y naturales teleacoplados y conectados, sin importar las distancias geográficas que existan entre sí. Basado en un enfoque analítico multinivel y multivariable, el teleacoplamiento sistemático trata de analizar los distintos agentes (empresas, corporaciones, gobiernos, etc.) que, motivados por una serie de causas económicas, políticas, sociales o naturales generan ciertos efectos en un sistema receptor, los cuales pueden ser positivos o negativos, según sea el manejo de la causa por parte de los agentes.

A modo de ejemplo, Liu *et al.* (2013) exponen al caso del comercio de la soja entre Brasil y China. Ambos países son considerados sistemas, unidades geográficas distantes con entes de poder y componentes sociales y naturales, relacionados por el comercio de la soja causado tras la alta demanda de China (sistema receptor) para satisfacer los abastos de alimento de la ganadería, lo cual Brasil (sistema emisor) siembra la soja en grandes cantidades facilitado por ciertas políticas públicas entre el gobierno y las agroindustrias

(agentes). Esto crea un efecto una deforestación y cambio de uso del suelo para instaurar el siembro de la soja en Brasil, mientras en China se motiva a la recuperación de zonas de conservación y restauración de bosque. El teleacoplamiento entre los sistemas existe desde la causalidad de la demanda por la soja y la aptitud climática, política y agronómica en Brasil para la siembra, y las facilidades que crean los agentes para el intercambio comercial internacional, a pesar de los daños ambientales que pueda tener dicha actividad.

Tras múltiples conexiones socio-naturales a diferentes escalas y diversas distancias geográficas, se han generado varios efectos o resultados negativos en la sociedad y en el ambiente, como lo ha sido la deforestación de un 23% de los bosques en Indonesia por la alta demanda de aceite de palma a nivel mundial influidas por transnacionales alimenticias (Austin *et al.*, 2019), o el alto potencial en afectaciones de salud de pobladores tras la contaminación de acuíferos en ciertas regiones de Costa Rica por el uso desmedido de agroquímicos en el cultivo de la piña, tras el auge de las exportaciones de la fruta a inicios del siglo XXI (Boeglin, 2010; Montiel, 2015)

Analizar la causalidad y delimitar los mecanismos, efectos y agentes o actores, ayudará en gran manera la comprensión de la interacción de los sistemas, o bien, el tratamiento que se le debe dar a los resultados causales. Carlson *et al.* (2018) apuntan en la necesidad de revisar rigurosamente las causas y motivos de forma cualitativa y cuantitativa, ya que precisa en la complejidad de las relaciones sociedad-naturaleza, y logra determinar si el cambio de uso de la tierra está influenciado por el comercio internacional, por ejemplo. Por su parte, Meyfroidt (2015) señala que una evaluación causal detallada y un mapeo actoral sistemático, ayudará a modelar comportamientos en los efectos causales, y poder predecir si habrá resultados positivos o negativos en un territorio, y con ello realizar planes de intervención mejor acoplados a la realidad que eviten daños sociales y ambientales con políticas públicas pertinentes. En el Cuadro 1 se enlistan una serie de términos que complementan el análisis de la causalidad en sistemas teleacoplados.

Cuadro 1. Terminología del análisis de causalidad.

Término	Descripción	Ejemplos
Resultados	Cualquier evento, hecho o variable para el que se quiera explicar por qué y cómo ocurrió.	Las muchas dimensiones de la intensificación agrícola, generalmente considerada como un tipo de cambio de uso de la tierra, resaltan la importancia de definir con precisión un resultado de interés.
Factor	Cualquier evento, hecho o variable movilizada en una explicación	La diferencia en la tenencia de la tierra se presentó como un factor para explicar las diferencias en los cambios en la cobertura de la tierra a lo largo de la frontera entre Kenia y Tanzania en el ecosistema Serengueti-Mara.
Causa	Un factor que produce un efecto causal en un resultado a través de una cadena de mecanismos.	Las políticas de uso de la tierra y la intensificación agrícola de los pequeños agricultores fueron dos causas de la reforestación en Vietnam
Efecto causal	El cambio en una variable de resultado provocado por el cambio en el valor de una variable explicativa (la causa).	Las concesiones madereras tuvieron el efecto causal de reducir la deforestación en Camerún.

Mecanismo causal	Los procesos a través de los cuales un factor produce su efecto.	La urbanización puede causar el abandono de la tierra (el efecto causal) a través de una reducción de la mano de obra agrícola (el mecanismo causal).
Cadena causal	Una serie de mecanismos causales que vinculan una causa subyacente con el resultado final de interés.	En el camino de la escasez forestal a la transición forestal, la deforestación eventualmente provoca una escasez de productos forestales, lo que provoca aumentos de precios. Mientras tanto, la deforestación también provoca una disminución de los servicios ambientales proporcionados por los bosques, por ejemplo, en términos de protección contra la erosión del suelo y regulación de los flujos hidrológicos. Esto, a su vez, provoca reacciones de los actores privados y los gobiernos para proteger los bosques restantes y restaurar y plantar árboles.
Explicación causal	Identificar las causas de un resultado.	Idealmente, requiere identificar efectos y mecanismos causales.
	Factores que son causas típicas o hipotéticas del cambio territorial o	Las políticas forestales y de conservación, el reasentamiento humano y

Impulsor / fuerza motriz	ambiental y tienen alguna evidencia de asociación con el resultado, pero para los cuales la evidencia o el conocimiento no son suficientes para establecer firmemente los efectos causales y explicar los mecanismos causales.	la integración del mercado fueron los principales impulsores de la disminución de la quema en el sudeste asiático, mientras que los principales impulsores en América Latina fueron la integración del mercado y las políticas que fomentan la ganadería y los cultivos comerciales a través de créditos o subsidios
Causa próxima / causa directa	Un factor que constituye una causa directa del fenómeno a explicar. Un factor que interviene cerca del final de la cadena causal.	La expansión de la soja fue una de las principales causas de la deforestación en la Amazonía durante el período 2001-2004, pero su función directa disminuyó posteriormente.
Causa subyacente / causa indirecta	Un factor que causa las causas próximas de la cobertura del suelo o el cambio ambiental.	La expansión del café en la década de 2000 fue una causa subyacente o indirecta de la deforestación en las tierras altas centrales de Vietnam, la principal causa directa fue la agricultura migratoria empujada hacia el bosque por la expansión del café.
Determinante espacial	Un factor que contribuye a la explicación estadística de (la ubicación de) un resultado (u otras	Se demostró que la accesibilidad es un determinante espacial del cambio y la fragmentación

	características espaciales como un patrón o estructura espacial).	de la cubierta forestal en Honduras, aunque con complejas relaciones causales.
Factor contextual	Un factor que está presente en gran medida en un lugar determinado y que explica la ubicación, el momento o la prevalencia de un evento.	La proximidad geográfica, histórica, política o lingüística podría predisponer a los países a tener diferentes reacciones de uso de la tierra a las políticas de biocombustibles implementadas en un país determinado.
Factor desencadenante	Factor estocástico, de corta duración o que cambia rápidamente, y que explica la ubicación o el momento precisos de un evento.	Las inundaciones fueron desencadenantes importantes de las políticas de protección forestal y forestación en la Francia y Suiza del siglo XIX, y contribuyeron a provocar el momento específico de las reformas.

Fuente: Meyfroidt, 2015.

Las interacciones de actores o agentes están motivadas por muchas causas que responden a su vez a la conectividad global actual y que los resultados tendrán efectos en otros territorios lejanos a los focos centrales de flujos de materia. Las relaciones hacia dentro o hacia afuera de sistemas en lugares distantes, lleva a un mayor desafío para mantener la sostenibilidad ambiental, como sucede con los esfuerzos y competencias globales por dominar y gobernar las cadenas de valor globales de productos agrícolas clave, por ejemplo, la soja, aceite de palma, carne de res, eucalipto, caña de azúcar (Munroe *et al.*, 2019). En el caso de la deforestación tropical, Geist & Lambin (2002) proponen un marco causal donde detallan que los factores más prominentes son de índole económicos, instituciones, políticas nacionales e influencias remotas (en el nivel subyacente) que

impulsan la expansión agrícola, la extracción de madera y la extensión de infraestructura (en el nivel próximo) (Figura 8).

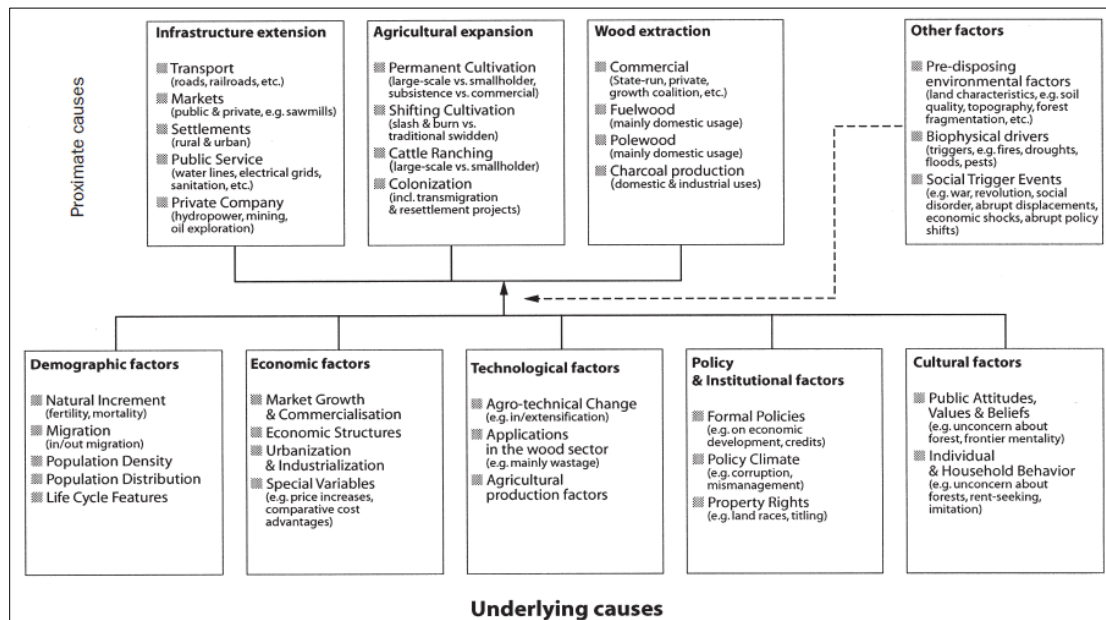


Figura 8. Marco causal de la deforestación en el trópico. Fuente: Geist & Lambin, 2002.

En un mundo globalizado, las relaciones sistemáticas tendrán una vía libre y facilidades para correlacionar intereses comerciales y políticos que involucren cada vez más actores con injerencia en aspectos socioambientales a diversas escalas. Rudolph & Figge (2017) sostienen que las conexiones entre sistemas sociales y naturales son cada vez más ágiles por medio de las velocidades de comunicación y tecnológicas que se desarrollan con la globalización. Al respecto, el internet ha funcionado como un canal predilecto para relacionar y encadenar sistemas a diversas escalas.

La globalización determina un nivel de demanda sobre el medio ambiente y sus recursos, operando y apropiándose de las dimensiones sociales, políticas, culturales y económicas, intensificando interacciones globales, regionales y locales entre sí. La globalización y la interconexión económica presentan retos que afectan a la sociedad y ambiente, como la falta de gobernanza en materia de uso de la tierra y emisiones de carbono global, la intensificación de la producción agrícola y presión humana al ambiente provocando estrés ecológico, el menosprecio de acciones para mitigar la huella ecológica por defender intereses económicos (Rudolph & Figge, 2017), y el mal manejo y manipulación de las negociaciones ante el cambio climático por grandes actores corporativos globales que buscan sostener una política económica desregularizada (Munroe *et al.*, 2019).

3. Capítulo tercero: Marco metodológico

El estudio del cambio global invita a plantear un análisis multivariable de diversas dimensiones y escalas, lo que aumenta la complejidad en el tratamiento de datos, en donde es esencial incorporar información espacial de datos socioeconómicos, demográficos, biofísicos, ambientales entre otros. El uso de repositorios globales multiescalares es uno de los pilares para obtener las variables necesarias una vez premeditada la zona de estudio, el objetivo y la disponibilidad de datos.

Para la presente investigación, una base de datos geoespacial ordenada y delimitada geográficamente, permitió disponer de preprocesos de reclasificación de variables y remuestrear el tamaño de pixel para homogenizar todos los ráster y así garantizar resultados más certeros. Además, se cuantificaron los cambios para la cobertura de la tierra con la aplicación de la tasa de cambio, la tendencia del cambio histórico para la precipitación, temperatura, IDH y PIB, y la población mediante su variabilidad histórica.

El Índice de Cambio Global para el Trópico (ICGT) se conformó por medio de la cuantificación del cambio de las variables, sumando además la direccionalidad de cambio de la cobertura de la tierra. El cálculo del ICGT se basó en el promedio de las variables. Con ello, se realizó un análisis regional que permita ver el comportamiento multivariable y del cambio global en cuatro regiones del trópico.

3.1. *Descarga de datos de las variables*

Como ya se ha dicho, el cambio global debe considerarse desde el ámbito multivariable, bajo dimensiones socioeconómicas, demográficas y físicoambientales, que permitan analizar las dinámicas multiescalares en un territorio. La elección de las variables para el desarrollo de la investigación debía cumplir con ciertos parámetros, como la disponibilidad en repositorios científicos y académicos, origen de la fuente confiable y replicable, disponibilidad entre el tiempo de estudio y con datos anuales (1992-2015), y que estuviera a nivel global o al trópico.

Es por ello que se seleccionaron las variables de cobertura de la tierra, precipitación, temperatura, Producto Interno Bruto, Índice de Desarrollo Humano y población. El tipo de archivo necesario para el desarrollo del proyecto debía ser en .tiff, a un tamaño de celda no mayor a los 10 km, para luego lograr remuestrear los píxeles a 1 km. Los repositorios que proveyeron las variables, se compilan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Repositorio y enlaces web para descargar las variables

Variable	Temporalidad disponible de los datos (años)	Repositorio y enlace web	Resolución y extensión espacial
Población total	2000, 2005, 2010, 2015, 2020	Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-count-rev11/data-download	Resolución horizontal de 30 arcos de segundo (aproximadamente 1 km en el ecuador) Ráster global
Temperatura y lluvia	1992 al 2014	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0	0,05°
Índice de Desarrollo Humano	1990 al 2015	Dryad Digital Repository http://www.datadryad.org:8080/resource/doi:10.5061/dryad.dk1j0/10?show=full	Resolución de 5 arcos de minuto (9.25km) Ráster global
PIB	1990 al 2015	Dryad Digital Repository https://datadryad.org/resource/doi:10.5061/dryad.dk1j0	Resolución de 5 arcos de minuto (9.25km) Ráster global
Cobertura de la tierra	1992 al 2015	ESA Climate Change Initiative (CCI-LC) http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php	Resolución espacial de 300m Extensión espacial entre los paralelos 90°N y 90°S

Fuente: Elaboración propia, 2019.

3.2. Conformación de la base de datos espaciales de variables para el trópico

Todos los productos ráster enlistados en el Cuadro 1, presentan una extensión espacial global o mayor a la extensión del trópico, por tanto, se realizó un corte de los ráster para la zona en estudio con una capa tipo polígono de países del mundo (extrayendo luego sólo los polígonos dentro de los paralelos 23° 26' 14" N y 23° 26' 14" S), tomada del repositorio de datos libres de ArcGis. Para el caso de la cobertura de la tierra, se calcularon las áreas terrestres y se eliminó el área oceánica como una cobertura de análisis para la presente investigación.

3.3. Reclasificación de la cobertura de la tierra

Como se mencionó en el punto 3.1, se obtuvieron datos anuales de la cobertura de la tierra de *ESA Climate Change Initiative (CCI-LC)* desde el año 1992 al 2015, los cuales se reclasificaron con el fin de estructurar un nuevo producto con clases de cobertura reagrupadas según su similitud ecosistémica y de uso, como se propone en La Guía de Buenas Prácticas para el Uso de la Tierra, el Cambio de Uso de la Tierra y la Silvicultura del IPCC. Estas categorías se consideran de nivel superior y aptas para representar áreas terrestres dentro de un país, según las Directrices del IPCC y los requisitos de los Artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo de Kioto (IPCC, 2003).

A pesar de que la guía fue la base de la reclasificación, se sustituyeron las categorías de humedales y otros, por suelo descubierto y cuerpos de agua, dos clases representativas en los trópicos y con alto interés de estudio en la presente investigación. Esta reclasificación se hizo en el programa ArcGis 10.6. Las categorías de cobertura reclasificadas se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clases reclasificadas del CCI-LC.

Clases de cobertura reclasificada (Código)	Código de clases de CCI-LC	Leyenda de clases de CCI-LC
Bosque (1)	12	Cubierta de árbol o arbusto
	50	Cubierta arbórea, de hoja ancha, siempreverde, cerrada a abierta (> 15%)
	60	Cubierta arbórea, de hoja ancha, decidua, cerrada a abierta (> 15%)
	61	Cubierta arbórea, de hoja ancha, decidua, cerrada (> 40%)
	62	Cubierta arbórea, de hoja ancha, decidua, abierta (15-40%)
	70	Cubierta de árbol, con hojas, siempreverde, cerrada a abierta (> 15%)
	71	Cubierta de árbol, con hojas, siempreverde, cerrada (> 40%)
	72	Cubierta de árbol, con hojas, siempreverde, abierta (15-40%)
	80	Cubierta de árbol, con hojas, decidua, cerrada a abierta (> 15%)
	81	Cubierta de árbol, con hojas, caducas, cerrada (> 40%)
	82	Cubierta de árbol, con hojas, caducas, abierta (15-40%)
	90	Cubierta arbórea, tipo hoja mixta (de hoja ancha y de hoja afilada)
	100	Mosaico de árboles y arbustos (> 50%) / cubierta herbácea (<50%)
	120	Arbustos
	121	Arbustos de hoja perenne
	122	Arbustos de hoja caduca
	160	Cubierta de árboles, agua inundada, fresca o salobre.
	170	Cubierta arbórea, inundada, agua salina.
	180	Arbusto o cubierta herbácea, inundada, agua dulce / salina / salobre
Pastos (2)	11	Cubierta herbácea
	110	Cobertura herbácea de mosaico (> 50%) / árbol y arbusto (<50%)
	130	Pastos / pradera
	140	Líquenes y musgos
Cultivos (3)	10	Tierras de cultivo, de secano
	20	Tierras de cultivo, regadas o post-inundaciones.
	30	Tierras de cultivo de mosaico (> 50%) / vegetación natural (árbol, arbusto, cubierta herbácea) (<50%)
	40	Vegetación natural de mosaico (árbol, arbusto, cubierta herbácea) (> 50%) / tierras de cultivo (<50%)

Suelos descubiertos (4)	150	Vegetación escasa (árbol, arbusto, cubierta herbácea) (<15%)
	152	Arbusto escaso (<15%)
	153	Cobertura herbácea escasa (<15%)
	200	Áreas desnudas
	201	Áreas desnudas consolidadas
	202	Áreas desnudas no consolidadas
Urbano (5)	190	Urbano
Cuerpos de agua (6)	210	Cuerpos de agua
Nieve o hielo permanente (7)	220	Nieve y hielo permanente

3.4. Remuestreo de píxeles de los ráster de las variables

Con los ráster descargados y compilados, es necesario modificar la resolución espacial de los ráster, para homogenizar los píxeles a la hora de proceder al álgebra de mapas, cuantificar cambios y cálculos geoestadísticos. La resolución del pixel a remuestrear fue hacia 1km, con ello, únicamente el ráster de población no tuvo cambio de resolución espacial (Cuadro 2). Este proceso se realizó con el programa computacional R Studio versión 3.6.1, con la acción de *resample* (*x*, *y*, *method*="bilinear", *filename*="", ...). El script codificado en RStudio es el siguiente, como ejemplo la variable precipitación:

```
require(ráster)
```

```
require(rgdal)
```

```
precip92 <- ráster ("PRECIPITACION/1992_precip_TROP.tif")
```

```
precip93 <- ráster ("PRECIPITACION/1993_precip_TROP.tif")
```

```
precip94 <- ráster ("PRECIPITACION/1994_precip_TROP.tif")
```

```
precip95 <- ráster ("PRECIPITACION/1995_precip_TROP.tif")
```

```
.
```

```
.
```

```
.
```

```

rem_pib99 <- ráster ("rem_pib99.tif")

rem_precip92 <- ráster ::resample(precip92, rem_pib99, method="bilinear")
rem_precip93<- ráster ::resample(precip93, rem_pib99, method="bilinear")
rem_precip94 <- ráster ::resample(precip94, rem_pib99, method="bilinear")
rem_precip95 <- ráster ::resample(precip95, rem_pib99, method="bilinear")
.
.
.
writeRáster (rem_temp92, "rem_temp92.tif")
writeRáster (rem_temp93, "rem_temp93.tif")
writeRáster (rem_temp94, "rem_temp94.tif")
writeRáster (rem_temp95, "rem_temp95.tif")
.
.
.

```

3.5. Cuantificar cambios

Para determinar si existe una tendencia, cuantificar el cambio, su direccionalidad y la significancia, se utilizó la prueba de Mann-Kendall (MK), la cual elimina ruido de fondo y los corrige mediante una correlación serial típica, lo que implica una transformación de los datos, la cual es útil para datos ambientales y climáticos (Pohlert, 2017). La prueba de MK establece como hipótesis nula H_0 que los datos ($x_1, \dots, x_N$) son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Si la serie analizada tiene autocorrelación positiva, la varianza estadística de la prueba S es subestimada, aumentando así la probabilidad de detección de tendencia (López *et al.*, 2007). La solidez de la fórmula permite calcular el análisis de tendencia a datos socioeconómicos.

Un valor estadístico que se utilizó para analizar la tendencia de cambio es tau, el cual es una correlación y mide a su vez la fuerza de la relación entre dos variables o datos. El tau de MK tomará valores entre ± 1 y $+1$, donde el rango positivo indica que ambas variables aumentan, y el negativo indica mientras aumenta el rango de una variable, la otra disminuye (Karmeshu, 2012). La fórmula a utilizar (Pohlert, 2017) se presenta como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Ecuación 1.

Donde:

n : tamaño de la muestra.

x_j y x_i : datos secuenciales

Bajo esta fórmula, se calculará la tendencia de cambio de IDH, PIB, precipitación y temperatura. La fórmula se realizará en el programa RStudio versión 3.6.1, mediante la función *MannKendall(x)* calculando el valor tau (signo de la tendencia) y el valor p (significancia o probabilidad de un resultado no aleatorio). Para practicidad y facilidad de correr las fórmulas en el computador, se dividió todo en trópico en nueve zonas (Figura 9), en donde se aplicó la fórmula de MK para cada una de éstas. Es válido mencionar que, la Península Arábiga tropical fue tomado en cuenta en la zona 6, por pragmatismo técnico y cercanía a África. Por tanto, en los capítulos de interpretación de los datos, los valores de esta región asiática se contarán para África. El script codificado en RStudio es el siguiente:

```
library("sp")
library("ráster ")
library("Kendall")
library("rgdal")

fun_sm <- list.files(pattern = "tif$")
sm_stack <- stack(fun_sm)
fun_kendall <- function(x){ return(unlist(MannKendall(x)))}
kendall_result <- calc(sm_stack, fun_kendall)
writeRáster (kendall_result, filename = "", format="GTiff", overwrite=TRUE)
```

Una vez exportado el ráster en formato TIFF, en QGIS Desktop 3.10.1 se extraen los valores de tau y p-value, los cuales están materializados como bandas en el ráster, donde la banda 1 es tau y la banda 2 es p-value.

Asimismo, se aplicó la direccionalidad de cambio (Martínez, 2018) en la cobertura de la tierra para obtener un ráster con información matricial y extraer datos de dónde se han manifestado cambios espaciales importantes, tomando como base la codificación de las coberturas reclasificadas anteriormente. Se calcularon porcentaje de áreas basándose en la conversión del tamaño de pixel y la cantidad total de relacionado a una determinada clase de cobertura.

Respecto a la variable de población, al tener datos ráster disponibles únicamente para los años 2000, 2005, 2010 y 2015, se realizó una resta entre los años 2015 y 2000 para mostrar en donde hubo variación de población. Se aplicó el T-Test en RStudio para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de los datos de poblaciones de los años en cuestión. El script del T-Test es:

```
require(ráster )
```

```
require(rgdal)
```

```
pob2000<-ráster ("E:/TESIS_MAESTRIA/Poblacion_remuestra/rem_pob00.tif")
```

```
pob2020<-ráster ("E:/TESIS_MAESTRIA/Poblacion_remuestra/rem_pob20.tif")
```

```
t.test(pob2000,pob2020)
```

Luego, para efectos de homologación de datos a la hora de interpretar y la creación del índice (se explicará en el siguiente apartado), se tomaron los valores de variación poblacional y se normalizaron entre -1 a 1 para que coincidieran los valores con los rangos de valores de las demás variables. Los datos normalizados permiten analizar la intensidad de la variación poblacional y observar espacialmente donde hubo aumento y disminución en el trópico. De la misma forma, los datos estarían calculados según la zonificación por regiones por continente.

La fórmula de normalización corresponde a:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_j}{x_{max\ j} - x_j} * 1$$

Ecuación 2.

Donde:

x_{ij}^* : El valor del atributo normalizado en la base de datos.

$x_{max\ j}$, x_j : Los valores máximo y mínimo del atributo, respectivamente.

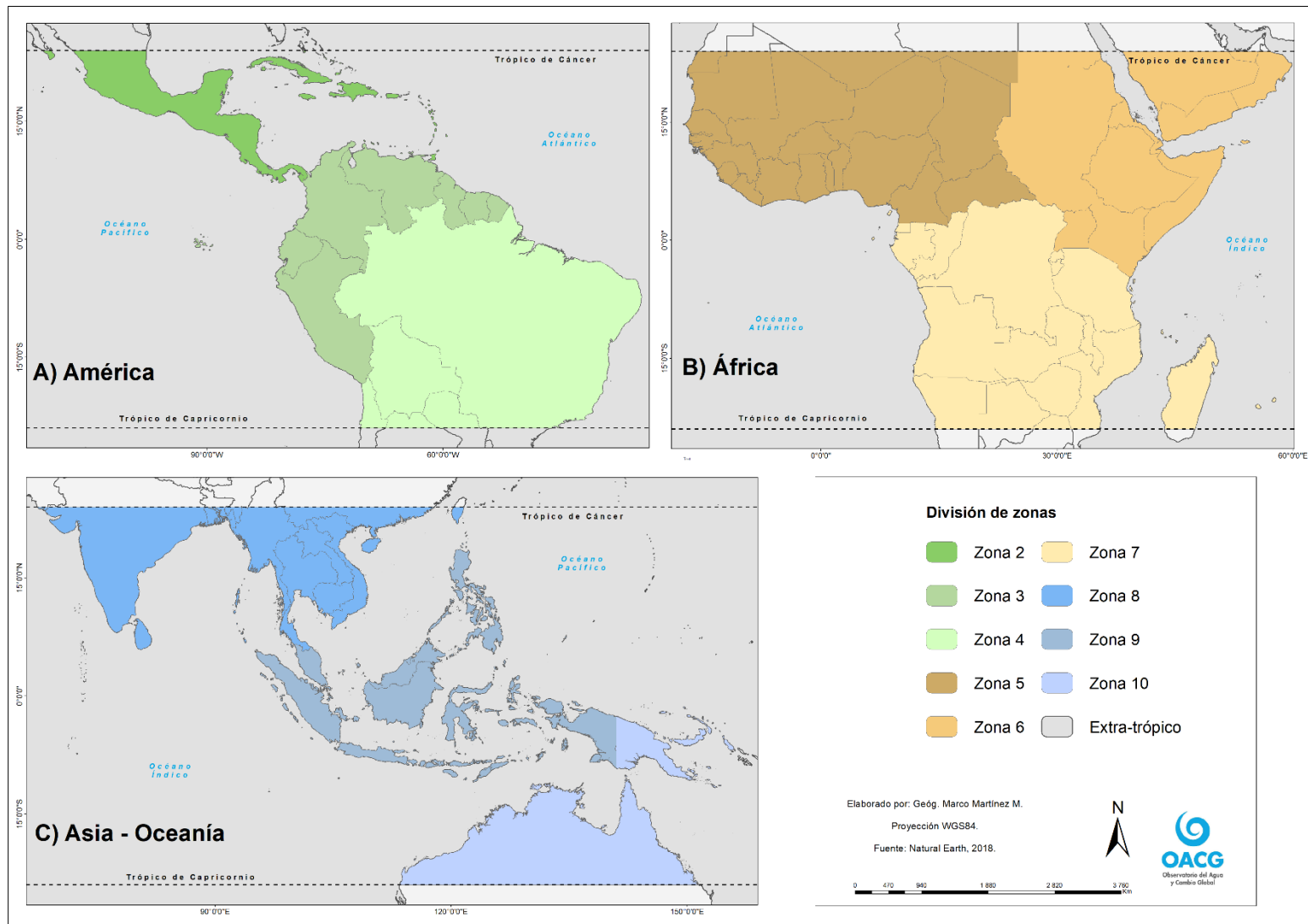


Figura 9. Zonificación metodológica del trópico para el procesamiento geoespacial. Fuente: Elaboración propia, 2019

3.6. Índice de Cambio Global para el Trópico

Con base en la cuantificación y en la tendencia de cambios de las variables, se creó el Índice de Cambio Global para el trópico (ICGT), con el fin de representar espacialmente la magnitud/intensidad del cambio global (a como se conceptualizó en este trabajo) por 22 años en la franja tropical. Se creó una categorización numérica, en primera instancia, entre 0 y 1, para luego establecer una relación cualitativa de cambio a través de categorías ordinales (Cuadro 4).

Los valores que se utilizaron de las variables del PIB, IDH, precipitación y temperatura fueron del tau, calculados anteriormente para medir la tendencia de cambio, con un rango de -1 a 1. En el caso de la temperatura, los valores arrojados por el tau en sí son inversos respecto a las demás variables, ya que el valor -1, por ejemplo, no indica una vulnerabilidad o afectación, sino una relativa direccionalidad positiva. En este caso, se multiplicó en Ráster Calculator el ráster tau de la temperatura por -1, para invertir los valores y lograr emparejar el criterio del análisis. Con la población, se utilizó el valor normalizado de la variación poblacional, con rango entre -1 y 1.

Cuadro 4. Clasificación del Índice de Cambio Global para el Trópico.

Codificación	Clase cualitativa	Rango cuantitativo
1	Muy bajo	[0 – 0,21 [
2	Bajo	[0,21 – 0,41 [
3	Moderado	[0,41 – 0,61 [
4	Alto	[0,61 – 0,81 [
5	Muy alto	[0,81 - 1]

Para el uso de la tierra, el dato que interesa incorporar en el índice es la direccionalidad de cambio, ya que éste incorpora la dinámica transicional entre las diversas coberturas de la tierra a través de los años. Por ende, basado en el cálculo matricial de la direccionalidad, y para efectos del objetivo del índice, interesaba únicamente la información de dónde hubo cambios de cobertura en 23 años y en dónde no. Es decir, según la matriz de

direccionalidad, aquellos pixeles que presentaron cambios se les adjudicó el valor 1, y aquellos donde se mantuvo la cobertura (sin cambios), se otorgó el valor 0. Con ello, el ráster ya estaba listo para incorporarlo en el cálculo del ICGT.

A continuación, se procedió a normalizar el valor de las variables de PIB, IDH, precipitación, temperatura y población entre 0-1 para obtener únicamente los pixeles que mostraran donde hubo cambio. En este caso, los valores cercanos a -1 y 1 dan a entender que fueron pixeles que exponen cambios altos, y aquellos cercanos a 0, que tuvieron cambios muy leves o nulos. Con ello, se procedió a convertir el valor negativo a positivo, con multiplicar todos aquellos valores por -1, con el fin de homologar los valores de cambio alto y bajo entre sí. Por último, se calculó el promedio de todas las variables en la calculadora ráster para obtener el Índice de Cambio Global en el Trópico, ya que, en este caso, no se infiere que las variables manifiestan peso diferenciado, sino igualitario. Por lo tanto, la fórmula del promedio es:

$$\underline{X} = \frac{\sum_{k=1}^n * X_k}{n}$$

Ecuación 3.

El ráster de salida, con valores entre 0-1 se reclasificaron cualitativamente con base en las clases del Cuadro 4.

3.7. *Análisis regional según datos del ICGT*

Consideradas y detalladas las tendencias, los cambios multivariantes y el ICGT, se seleccionaron cuatro regiones de gran importancia forestal, de biodiversidad, socioeconómica, así como climática, donde convergen situaciones políticas locales e internacionales que las vuelven vulnerables en sus sistemas sociales y ambientales. El análisis se basó en el estudio a detalle del comportamiento del cambio global por variable, la dinámica y relación entre sí tomando en cuenta el territorio. Además, se fundamentó con revisiones bibliográficas que complementaban los resultados obtenidos y daban validez científica al análisis mediante un enfoque de causa-efecto en el cambio global.

4. Capítulo cuarto: Cuantificación del cambio global en el trópico.

Observar y estudiar el trópico desde distintos espectros, y comprender que en los diversos territorios se manifiestan dinámicas y energías entre sistemas sociales y ambientales, es facilitado por el enfoque holístico del cambio global. El trópico es una zona planetaria con vulnerabilidades, donde se encuentra cerca del 50% del total de población mundial, con los mayores “hotspots” de cambio climático (Giorgi, 2006; Cifuentes, 2010) y con altos niveles de corrupción y de pobreza (State of the Tropics, 2014). En los siguientes párrafos se examinarán y detallarán cada una de las variables que forman parte de la investigación, cuantificando el cambio y delimitar patrones ambientales y sociales que fundamenten los siguientes capítulos.

4.1. *Cambio de cobertura de la tierra*

El cambio de cobertura en la franja tropical, y en otras latitudes, es multivariable en su causa, donde factores socioeconómicos, políticos y ambientales convergen entre sí, lo que hace ser dinámico y complejo (Lambin, *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2007; Edelman *et al.*, 2014). Por cobertura de la tierra se entiende el material físico en la superficie terrestre que interactúa con la radiación electromagnética y es reflejada enérgicamente para poder ser observada en sistemas de teledetección espacial y analizadas desde una figura satelital (Fisher, Comber y Wadsworth, 2005). Con ello, las categorías de cobertura bajo estudio en este proyecto, extraídas del CCI-LC, son el bosque, pasto, cultivo, suelo descubierto, cuerpo de agua, área urbana o impermeable y hielo permanente o nieve.

A este punto es necesario diferenciar los conceptos de cobertura de la tierra y uso del suelo, ya que usualmente se utilizan de manera indistinta. Di Gregorio & Jansen (2000) señalan que cobertura de la tierra es la superficie bio-física observada de La Tierra, mientras que uso del suelo se caracteriza por las modificaciones, actividades e insumos que las personas emprenden en un determinado tipo de cobertura terrestre para cultivarla, cambiarla o mantenerla, donde se establece un vínculo directo entre ambiente-humanidad. Cobertura de la tierra se refiere a los atributos de la superficie terrestre, como la biota, suelo, topografía y estructuras humanas, siendo entonces el uso del suelo el propósito por el cual los

humanos explotan y consumen la cobertura de la tierra (Lambin & Geist, 2006). Una cubierta terrestre, como los pastizales puede soportar muchos usos de la tierra, como los pastos para ganadería, recreación o agricultura mixta con barbecho (Haines-Young, 2009).

Con análisis de escala global, en la Gráfico 1 se observa que no hubo cambios significativos entre los años 1992 y 2015, asemejando una relativa dinámica baja en el cambio de coberturas. (Figura 10). En este sentido, el Planeta Tierra debe incurrir en mega eventos naturales (o antrópicos) para que la cobertura cambie de forma drástica en un lapso de 22 años (glaciaciones, por ejemplo). El cambio de cobertura es gradual y lento; de hecho, en algunas partes del mundo, el proceso de conversión masiva de la cubierta terrestre se ha detenido, o incluso se ha revertido (Goldewijk & Ramankutty, 2010). El cambio tangible se evidencia a escalas regionales, donde el ser humano y otros factores ambientales causan su efecto inmediato. El cambio de cobertura tropical-global inicia desde lo local, donde en espacio y tiempo convergen más variables que alteran las coberturas, y éstas a su vez, el funcionamiento sistemático planetario.

El Gráfico 2 detalla la dinámica de los cambios de cobertura tropical, en donde cada una de estas sostuvo permutaciones de área desiguales. El bosque presentó la mayor pérdida de área en términos absolutos, pero con una tasa de cambio muy leve; el pasto y cultivo fueron las coberturas que más aumentaron (siendo el cultivo con más área), y ambos con una tasa de cambio similar; suelo descubierto disminuyó ligeramente respecto al bosque, con la tasa de cambio mínimamente negativa. La cobertura urbana aumentó en términos de área, no con fuerza respecto a las demás coberturas, pero demuestra que su tasa de cambio fue superior a las demás debido al rápido crecimiento urbano; los cuerpos de agua crecieron muy poco, así como la tasa de cambio lo indica; y la nieve es un área mínima en la escala del trópico que no se referencia la ínfima e imperceptible disminución de área.

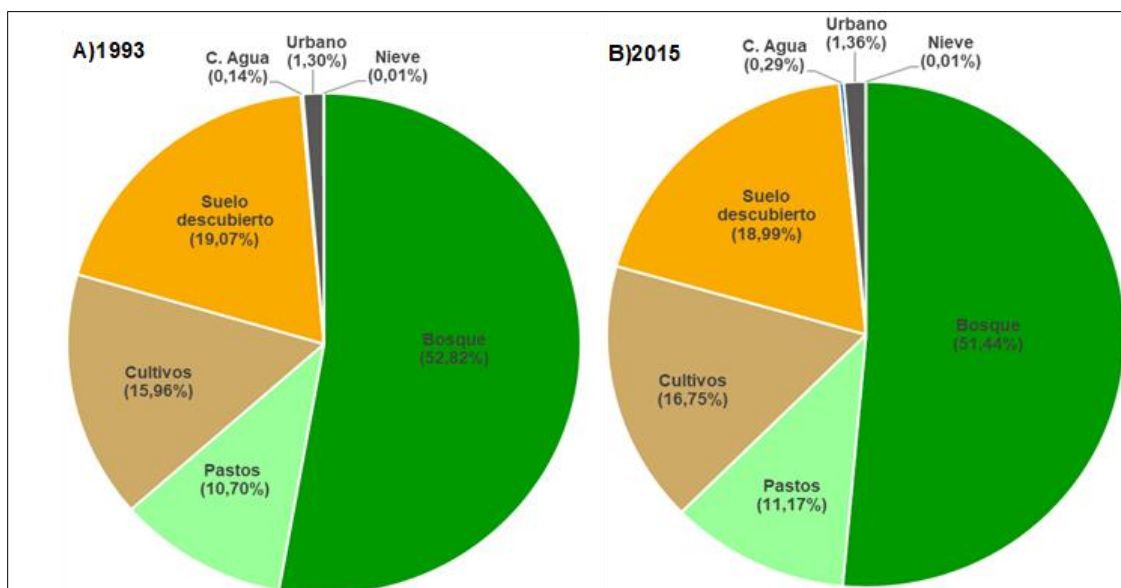


Gráfico 1. Porcentaje de áreas de las coberturas para los años 1992 y 2015.

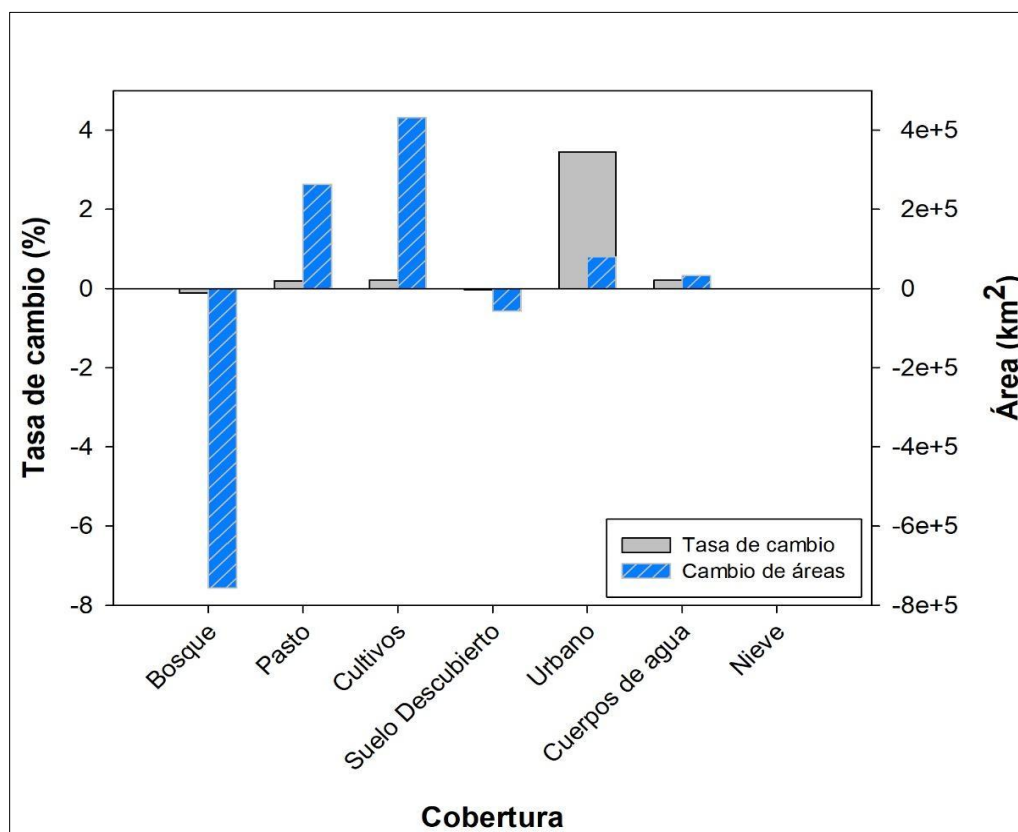


Gráfico 2. Cambio de áreas y la tasa de cambio anual por cobertura.

Para este estudio, se detallan los cambios en las coberturas de bosque, cultivos y áreas urbanas e impermeables, ya que estas variables son las de más peso en los escritos de cambio de cobertura tropical, realizando un análisis por continente dada a la escala de los cambios de cobertura.

4.1.1 Bosque

La cobertura forestal es la más extensa en el trópico, abarcando 27 911 834,02 km² (50,94%) para el año 2015. Respecto al año 1992, hubo una disminución de 756 021,91 km² a un ritmo de -0,12% por año. Los bosques tropicales son los que experimentaron el mayor descenso de área respecto a las demás coberturas en estudio. Esta disminución es explicada por la deforestación, definida por la FAO (2020) como la conversión de los bosques a otro tipo de uso/cobertura de la tierra, independientemente si es inducido por humanos o no.

A nivel porcentual general, pareciera que la deforestación es mínima; sin embargo, en la Figura 11 se muestran espacialmente los parches forestales en decrecimiento durante 22 años. Se reconoce que los bosques en el trópico son de los más antropo-perturbados en el Planeta (State of the Tropics, 2014), sin embargo, por la naturaleza de disponibilidad de datos para analizar la deforestación y otras dinámicas de cobertura (e.g. por medio de sensores remotos), no existen datos confiables sino a partir de finales del Siglo XX (Lambin *et al.*, 2003; Achard *et al.*, 2014; Carter *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2018).

Analizando el cambio de cobertura forestal por continente, América presentó la tasa de cambio anual más alta (0,17%) respecto a Asia-Oceanía (0,12%) y África (0,07%) con una disminución de 432.136 km². En América se evidencian dos regiones de importante deforestación en 22 años: Centroamérica, con dos puntos calientes sobresalientes (el sector del Petén y el noreste de Nicaragua); y la cuenca del río Amazonas, con especial atención en los estados de Amazonas, Pará, Rondônia y Mato Grosso en Brasil, el centro de Bolivia y el norte de Paraguay. A modo de ejemplo, Alves *et al.* (2009) sugieren que la transición del bosque en la Amazonía es multi-dependiente y diferenciado espacialmente, en donde interfieren la distancia de carreteras y poblados, suelo y topografía, tenencia de la tierra y las condiciones del mercado forestal y agropecuario zonal. El 2.43% del total del

área americana tropical cambió de bosque a cultivo, y el 1% de bosque por pastos, siendo éstas coberturas las de mayor porcentaje de cambio respecto a las demás. De hecho, las probabilidades en Mato Grosso de cambio del bosque hacia usos agropecuarios (soya en su mayoría) supera el 70% (Alves *et al.*, 2009). En este sentido, denota el evidente peso del sector agropecuario en el continente americano que los bosques han precedido.

En África hubo una disminución forestal de 181.645 km², con casos de deforestación a lo largo del frente boscoso subsahariano, Liberia y Costa de Marfil, el noreste de Tanzania, Malawi y el este de Zambia. Por su parte, tan solo el 0,87% del total del trópico africano presentó un cambio de bosque hacia cultivo y un 0,46% hacia pastos. Por otro lado, en la cuenca baja del río Congo, existen dos parches bien definidos de recuperación forestal, en lo que Hansen *et al.* (2008) explican que se debe a la poca densidad poblacional y la intensidad de consumo del medio natural (distinto al extractivismo forestal de la Amazonía, por ejemplo) y programas de conservación forestal; así como en el noroeste de Angola y en el sureste de Tanzania. Paradójicamente, en estas zonas de recuperación forestal, las coberturas existentes para el año 1992 eran los pastos y cultivos.

Así mismo, en Asia la cobertura forestal disminuyó 142.242 km², con puntos calientes de deforestación en Indonesia (centro de Sumatra), Isla de Borneo, Camboya y Vietnam. Hacia inicios del siglo XXI, el sureste de Asia experimentó la tasa más alta de deforestación a nivel global, con 0,71% anual, impulsado en gran medida la intensificación y expansión de la agricultura, migración hacia áreas rurales y la tala ilegal (Austin *et al.*, 2018; Lambin *et al.*, 2003). En Asia, respecto al total de su área tropical, el 1,89% cambió de bosque a cultivo, no obstante, el 0,30% hacia pasto.

4.1.2. Cultivo

La cobertura de cultivo es la tercera más extensa en el trópico, abarcando 9.143.230 km² en el año 2015. Así mismo, presentó el mayor aumento de área respecto a las demás coberturas en estudio, con 431.727 km² en 22 años, donde mantuvo una tasa de cambio de 0,22%. En la Figura 12 se observa una distribución espacial de la cobertura de cultivo diferenciada por continente en el trópico, donde se manifiesta una concentración relativa de cultivos en Asia-Oceanía, conteniendo el 31% del total del área del continente en el trópico,

siendo para África el 14% y para América el 11%, esto en el año 2015. Sin embargo, América tropical presentó la tasa de cambio más alta (0,64%) en comparación a África (0,14%) y Asia-Oceanía (0,10%).

La cobertura de cultivo en América tropical presentó una particular dinámica de cambio, específicamente en la región de Mesoamérica y norte de Suramérica, donde hubo una disminución de 16167,64 km², siendo la única región en el trópico que perdiera cobertura de cultivo en 22 años. De hecho, de toda la cobertura de cultivo en cambio en esta región, el 88% pasó a convertirse en bosques tropicales. Del mismo modo, la deforestación localizada en la cuenca de río Amazonas y centro de Suramérica expuesta anteriormente, en la Figura 12A se observa como área ganada para cultivo, siendo el 99% del total del cambio de bosque hacia cultivo.

En el África tropical, hubo un aumento de 120354 km², donde registró su mayor ganancia en el frente de la región sur-subsahariana. Específicamente, el 80% del total del área de cambio en esta región precedieron bosques tropicales, y el 18% eran áreas con pastos. Por otro lado, la pérdida más significativa de cobertura de cultivo que se muestra en la Figura 12B (cuenca del río Congo y sureste de Tanzania) corresponde a la dirección de cambio hacia bosque.

La cobertura de cultivo en Asia-Oceanía, tuvo el comportamiento, en casi su totalidad, a la estabilidad de la cobertura y en algunas zonas específicas, en ganancia de área. El caso predominante de estabilidad del área de cultivo lo presenta la Península del Indostán, así como los archipiélagos del sur de Indonesia. Para el año 2015, ésta cobertura dominaba, luego del bosque, con 3440339 km², aumentando 77292 km² desde el año 1992. En esta región tropical, se presentaron una serie de focos de aumento de la cobertura de cultivo, específicamente en las islas de Sumatra, Borneo y al noreste de Papúa Nueva Guinea, representando el 99% del total del área de ganancia de cobertura de cultivo precedido de la cobertura forestal del año 1992. A nivel del Asia-Oceanía tropical es el 97% del total del área de ganancia que precede de la cobertura forestal.

4.1.3. Urbano

La superficie urbana tropical, en comparación a las demás coberturas en estudio, es la que tiene la tasa de cambio más alta, con un crecimiento de 3,45% por año. No obstante, su aumento ha sido de 80.319,10 km², significando apenas el 1,36% del total del área terrestre del trópico en el año 2015. Se infiere que, relativamente a su tamaño de área, la cobertura urbana presentó la mayor dinámica de cambio, con altos niveles de aumento desde el año 1992; es decir, con un incremento porcentual de 111% en 22 años.

Desde la escala general tropical es poco visible la mancha urbana, sin embargo, en la Figura 12 se observa cómo se ha esparcido bajo un efecto centrífugo desde el borde de las ciudades y principales centros urbanos. El 44% del total de cobertura urbana se encuentra en Asia tropical, el 35% está en América y el 20% en África. Lo anterior se respalda con la fundación de las mega ciudades asiáticas dedicadas a economías tecnológicas, industriales y mercantiles globales. Para el caso de África, los datos iniciales del año 1992 no presentan información completa para esta cobertura, por lo que no es útil mostrar datos comparativos; no obstante, para el año 2015 sí se cuentan con toda la información.

La cobertura urbana en América tropical muestra haber conservado el origen visto en 1992, creciendo hacia la periferia de una forma no muy explosiva horizontalmente, al menos en las principales ciudades. La cobertura urbana ha crecido 23958 km², con una tasa de crecimiento de 2,72% anuales. Empero, para el año 2015 representó solo el 0,33% del total del trópico americano terrestre, siendo el continente con menor área urbana del planeta Tierra.

A lo largo de Mesoamérica, no se vislumbra la aparición de una mancha urbana nueva que ejerza presión sobre el territorio, no sobrepasando los 7 km de expansión horizontal desde el borde (Figura 12A). La Ciudad de México tendió a crecer en el año 2015 hacia el noreste con una morfología semi anillada, Ciudad de Guatemala con parches urbanos muy unidos aún a la cobertura de 1992 (misma tendencia de las ciudades de Honduras, El Salvador y Nicaragua), y San José creció particularmente hacia el oeste del Valle Central. De la misma forma al sureste de Brasil (Figura 12B), las ciudades principales y demás asentamientos urbanos han crecido de una forma no muy extensa en 22 años, marcando la diferencia las

ciudades de Goiania y Brasilia, con un crecimiento horizontal desde el borde de la mancha de 1992 que supera los 8km.

En Asia se muestran las dinámicas de crecimiento urbano más significativas del trópico, con la tasa de cambio más alta (3,97%) y el mayor aumento de área (39263 km²). No obstante, el 0,61% del total del continente asiático tropical es cobertura urbana, pero con el 45% del área urbana total del trópico. En las Figuras 13C y 13D se exponen las ciudades asiáticas con mayor la dinámica de crecimiento horizontal en el trópico. Las ciudades del noreste asiático, específicamente Guangzhou, Hong Kong, Hanói, Bangkok y Ciudad de Ho Chi Ming muestran para el año 2015 un crecimiento mucho más abierto que en América, bajo una forma de extensión radial que sigue los patrones de principales vías de comunicación, con aproximadamente 27km de aumento desde el borde urbano de 1992. El sur de China tropical y en Tailandia, se observa la ampliación del área circundante de los centros urbanos occidentales a Guangzhou -Shantou y norte de Bangkok, respectivamente.

Bajo este mismo esquema, la ciudad de Kuala Lumpur tuvo para el 2015 una expansión urbana hacia el sur, oeste y norte con casi 20km lineales, así como el sur de Malasia y la ciudad de Singapur, la cual muestra haber sido una de las ciudades con mayor cambio de área en 22 años (Figura 13D). La Isla de Java en Indonesia presenta tres grandes núcleos urbanos, de los cuales Yakarta con la mancha urbana más grande, creció un poco más en la cercanía de la ciudad hacia una tendencia de interconexión con las ciudades circunvecinas, y Surabaya creció radialmente hacia el sur formando una visible conexión con otros asentamientos urbanos.

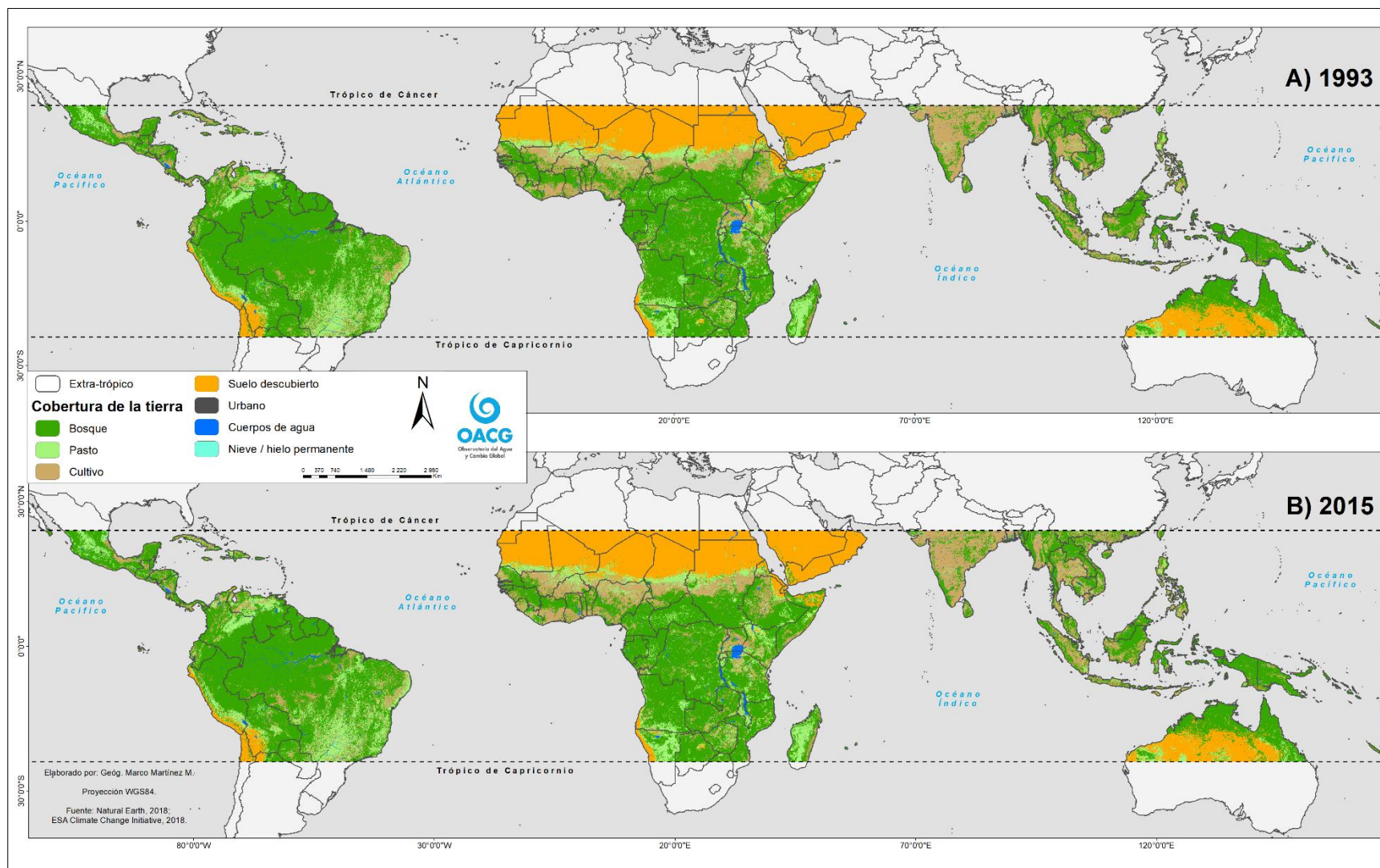


Figura 10. Cobertura de la tierra en el trópico 1992-2015.

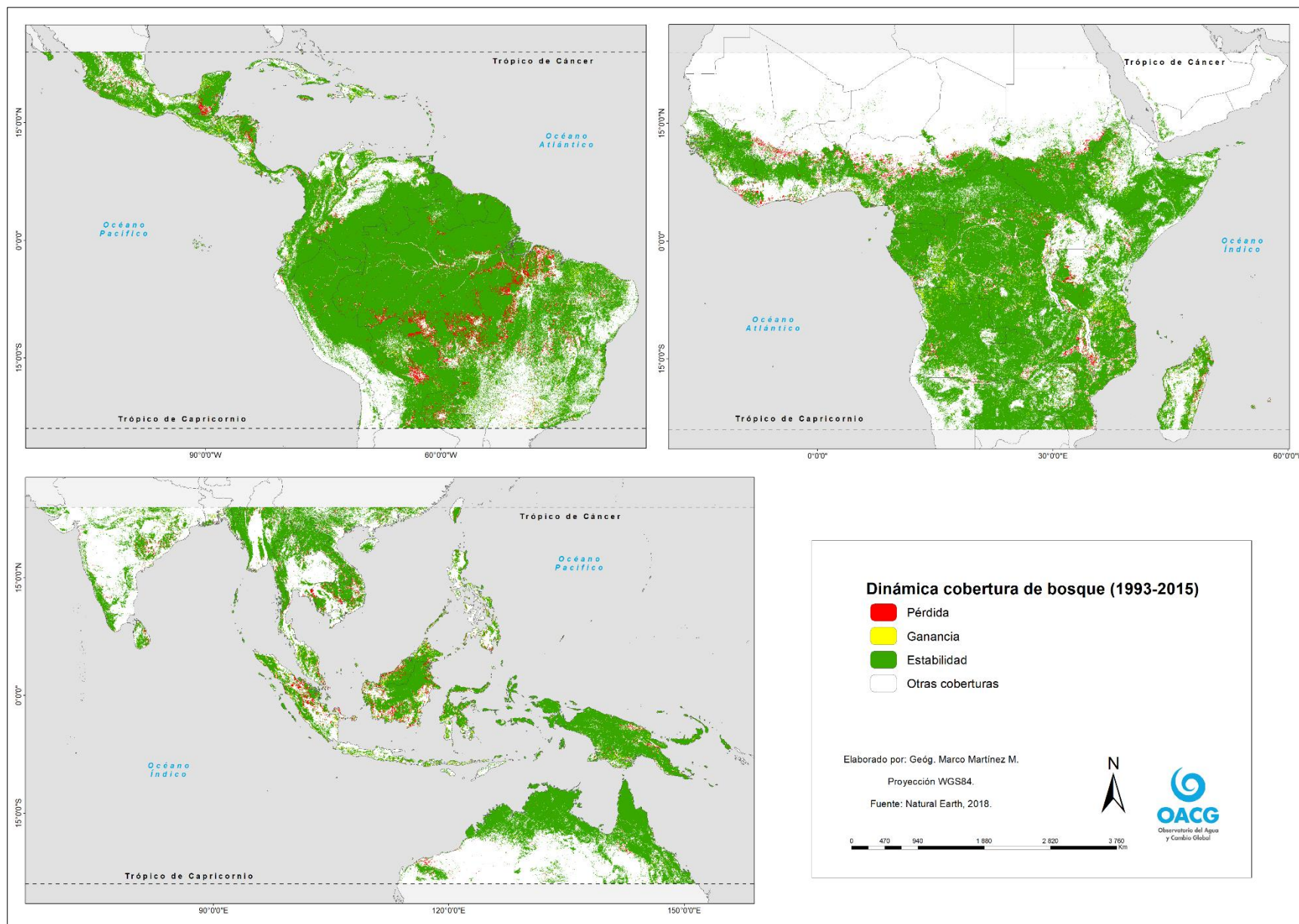


Figura 11. Dinámica de cambio de la cobertura de bosque en el trópico.

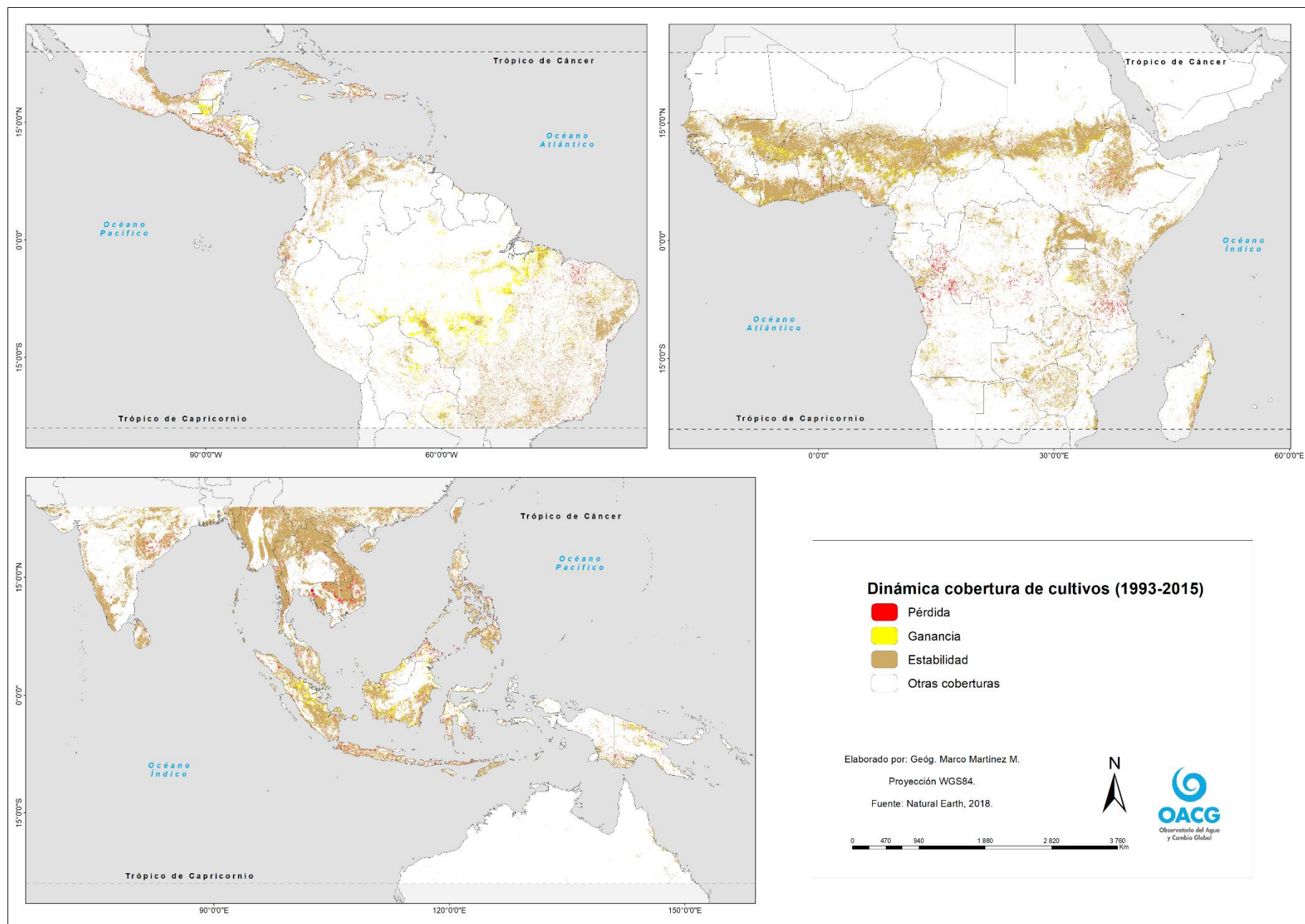


Figura 12. Dinámica de cambio de la cobertura de cultivo en el trópico.

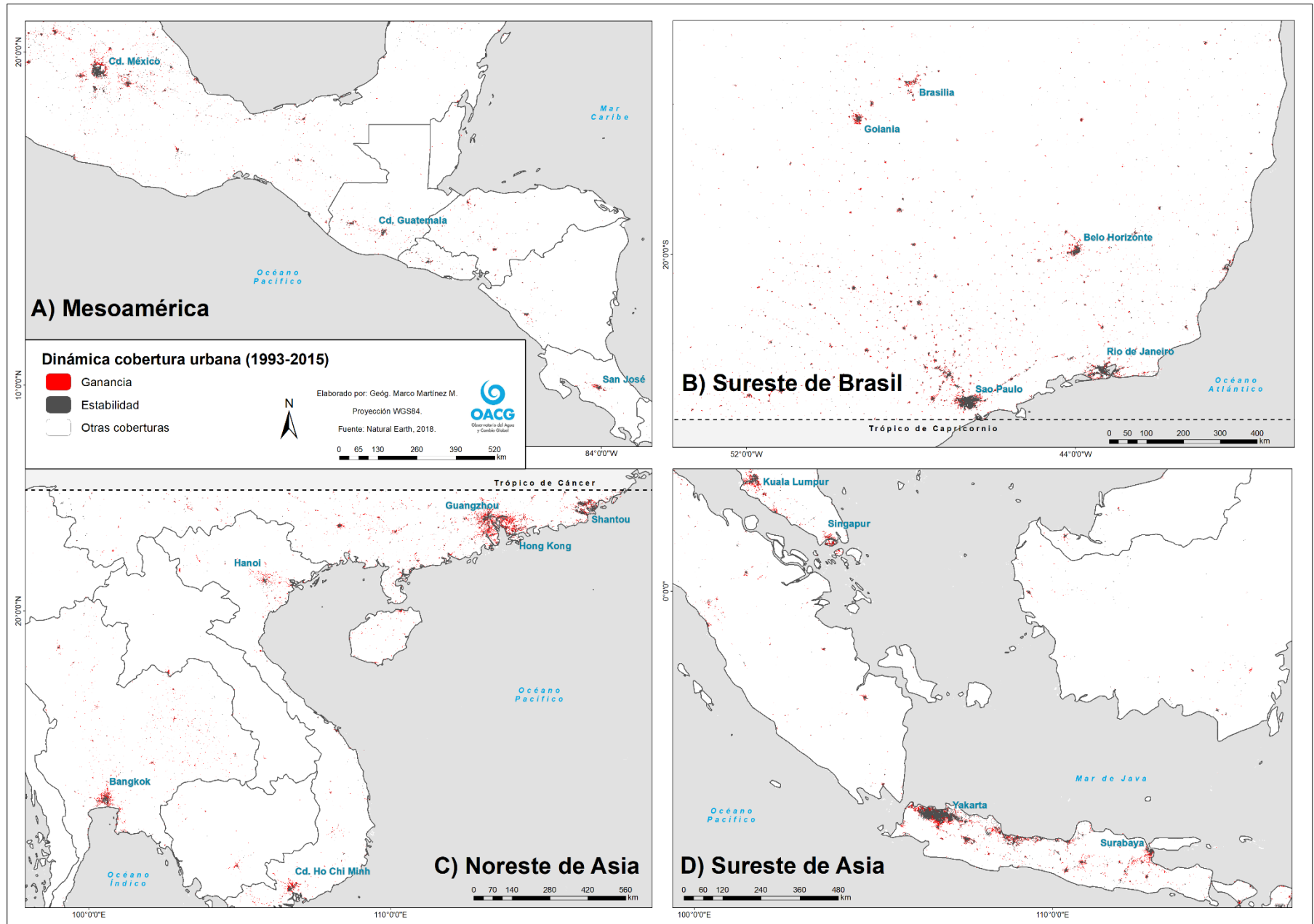


Figura 13. Dinámica de cambio de la cobertura urbana en el trópico.

4.2. Precipitación

Los cambios en la precipitación se analizaron por medio de la fórmula de Mann Kendall, la cual indica la tendencia de cambio durante 22 años. En la zona tropical se encuentran regiones climáticas que se caracterizan por presentar altos niveles de precipitación anual, así como otras que carecen de humedad relativa y se tornan más secas (Galvin, 2009). Por ende, los patrones de cambio son amorfos y desiguales según las condiciones climáticas y geográficas zonales, lo que aumenta la complejidad en la interpretación.

En la Figura 14A se presenta la distribución de la tendencia de cambio de la precipitación, donde se observa a escala general, que el 75% del trópico terrestre tuvo la tendencia de estabilidad en la cantidad de lluvia registrada desde el año 1992, es decir, el tau no indica una significativa disminución o aumento de la precipitación, sino un mínimo cambio. El 14% sostuvo la tendencia de un moderado aumento, especialmente distribuido dentro la zona más húmeda del trópico central, en el este subsahariano y al sureste de la Península Arábiga. Por otro lado, el 10% del trópico tendió a disminuir moderadamente desde 1992, con importantes núcleos en Suramérica y en el archipiélago asiático, principalmente. Para los valores extremos (-1 y 1), no hay datos asociados que indiquen tendencias de cambio extremas en la precipitación del trópico.

La América tropical muestra importantes focos donde la tendencia fue de moderada disminución (tau= -0,6 a -0,2), abarcando el 21% del total de su área, siendo el continente que presentó la mayoría de áreas con tendencia de disminución de la precipitación, concentrando el 61% del total de esta clase en el trópico. Por su parte, el 55% de Suramérica tendió hacia una disminución moderada, región donde se agruparon grandes núcleos, como lo fueron en la cuenca alta de la del Rio Amazonas y en su desembocadura, en la costa este de Brasil y al sur (entre los estados de Goiás y Minas Gerias), al sur de Bolivia, y en la región del Chocó, una de las más pluviosas del trópico americano. En la misma línea, apenas el 8% de Mesoamérica y Caribe presentó una tendencia a la disminución pluvial, con una concentración en su mayoría en el centro de México y en el Caribe costarricense.

En contraparte, el 9% de América tropical tuvo la tendencia hacia el aumento moderado, expresado en el 16% de Suramérica con núcleos específicamente en casi todo Ecuador y

sureste de Colombia, algunos sectores en Perú, en el centro de Brasil (estado de Mato Grosso) en gran parte de Paraguay tropical y territorios vecinos de Brasil. En Mesoamérica, el 20,5% del territorio tendió hacia un moderado aumento, con núcleos de cambio en la Península de Yucatán y costa oeste de México, al oeste de Honduras, noreste de Nicaragua, región central de Costa Rica y gran parte de Cuba. De forma general, el 68% de América tropical sostuvo una tendencia mínima o leve de cambio, resaltando que países como República Dominicana, Panamá, Venezuela, Surinam y Guyana Francesa no tienen importantes núcleos de tendencias de cambio considerables.

El trópico de África mostró tendencias de cambio distintas a América y Asia-Oceanía, en cuanto a aumentos y disminuciones moderadas en la precipitación. El 3% de todo el territorio, tuvo tendencias de disminución, con algunos núcleos muy dispersos sin abarcar grandes extensiones espaciales, considerando de mayor importancia el sur de Costa de Marfil, en el este de Somalia, sur de Etiopía y sureste de Sudán, en el suroeste de Angola y en el este de la Isla de Madagascar.

No obstante, el 22% del trópico africano tendió hacia el aumento de la precipitación, presentando importantes áreas en Guinea, Sierra Leona y el oeste de Liberia, además de un núcleo de gran tamaño (el de mayor cobertura en el trópico) que va desde el norte del Congo, sur de Sudán, atraviesa de este a oeste la República Centroafricana, cubre el centro y sur de Camerún, el sur de Nigeria, abarca casi en su totalidad a Guinea Ecuatorial y Gabón, norte, centro y sur de Congo y el norte de Angola. De hecho, este gran núcleo se concentra en el noroeste y oeste (desembocadura) de la cuenca del Río Congo. Del mismo modo, otros núcleos de aumento moderado se muestran entre el sur de Egipto y norte de Sudán, al noreste de Etiopía y la costa sureste de Eritrea, entre las costas este de Tanzania y Kenia, y entre el sur de Zimbabue, norte de Sudáfrica y suroeste de Mozambique. Así mismo, el 75% del África tropical sostuvo la tendencia de cambios mínimos en la precipitación, cubriendo a países bajo esta clase como el sur de Sahara Occidental, sur de Argelia, Níger y Malawi.

Por su parte, el 13% del trópico asiático y de Oceanía, sostuvo la tendencia a la disminución de la precipitación, con concentraciones focalizadas al noroeste de Laos, entre los estados de Tripura y Mizoram en India, sur de Taiwán, al centro-norte de Isla de Sumatra, las costas este y sur de Isla de Borneo, centro de Isla de Java, sur de Islas Mindanao en Filipinas,

noroeste, sector oeste y sur de Papúa de Indonesia, y en el centro del trópico australiano. De hecho, la región insular asiática concentra el 53% del total de núcleos con disminución de la precipitación, respecto a este continente.

En cuanto al aumento moderado, corresponde al 4% del trópico asiático con unas pequeñas concentraciones (respecto a los demás continentes) entre los estados de Madhya Pradesh y Maharastra en India, al norte de la línea tropical de Myanmar, entre las provincias de Guangzhou y Guangxi en China, la región costera norte del Golfo de Tailandia y al suroeste de Tailandia, al norte en la Isla de Sumatra y al suroeste tropical de Australia. Con ello, se observa una mínima correspondencia de la tendencia del aumento pluvial en la región insular y archipiélagos asiáticos, en donde, sí se manifiesta fuertemente la tendencia hacia la disminución. Empero, el 80% corresponde a un aumento o disminución leve, destacando que, en India, Bangladesh y Papúa-Nueva Guinea gran parte de sus territorios tropicales mantuvieron la tendencia al cambio mínimo.

En la Figura 14B, se observa la distribución espacial del valor P que indica el nivel de certeza relacionada a la tendencia de cambio, en donde las tonalidades rojizas expresan una relación superior al 85%, y las más claras, inferiores al 85%. Con ello, son algunos núcleos de alta certeza, en todo el trópico, que muestran que la tendencia de cambio tuvo una alta probabilidad de ocurrencia, y estos tienen una relación espacial con las clases de moderada disminución (-0,6 - -0,2) y aumento (0,2 – 0,6) de la precipitación. En América, estos *hotspots* sostienen mayor distribución en Suramérica que en Mesoamérica, acertando fuertemente las tendencias de cambio de moderada disminución y aumento pluvial.

En África, los valores de alta probabilidad están relacionados, en su mayoría, con los núcleos de aumento de la precipitación, específicamente los mencionados en las cercanías de la cuenca de Río Congo, entre Guinea y Sierra Leona, entre Sudán y Egipto, entre Etiopía y Eritrea y al sur del trópico africano. En Asia por su parte, disminuyen los *hotspots* de alta certeza del valor P, y estos se focalizan en relación a los núcleos de disminución de lluvia. Es decir, los focos donde se relacionan con un 90% o más de probabilidad en la disminución del cambio pluvial, son al norte de Laos, al este de Borneos, y un sector al centro del trópico australiano.

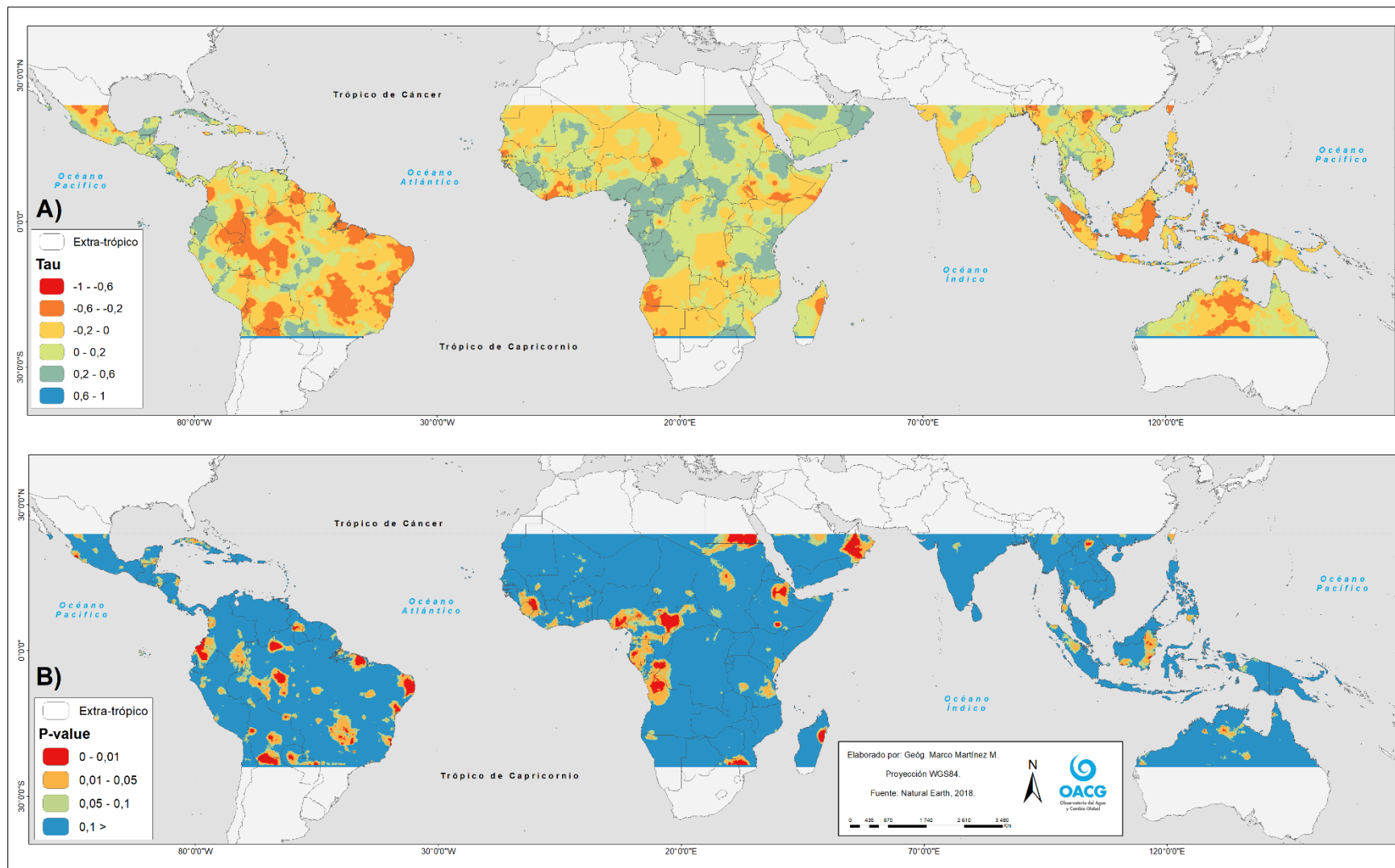


Figura 14. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable de precipitación.

4.3. Temperatura

La temperatura en el trópico, es una variable climática que tiene poca fluctuación en su rango durante un año, en comparación con otras regiones latitudinales de La Tierra. Cerca de la línea ecuatorial la diferencia de temperatura promedio, entre los meses más cálidos y fríos, rara vez supera los 4°C. Conforme hacia se aleja hacia los bordes tropicales, la diferencia promedio no supera los 15°C (State of the Tropics, 2014). Al igual que la precipitación, se manifiestan cambios con patrones desiguales propios de la climatología de cada región intratropical.

La Figura 15 muestra la distribución espacial del índice de tau, el cual expresa la intensidad de la tendencia de cambio en la temperatura entre el año 1992 al año 2015. Así mismo, la relación probabilística de que dicho evento de tendencia se haya manifestado en veintitrés años. A escala general, cerca del 17% del trópico presentó una tendencia de disminución en la temperatura, con mayor énfasis en África; poco más del 8% sostuvo una tendencia al aumento, con núcleos importantes en América y los archipiélagos asiáticos; y el 74% del trópico tuvo una tendencia mínima entre el aumento y la disminución. En el caso del valor extremo positivo (máxima tendencia de aumento) hay una pequeña presencia al suroeste de Colombia y al suroeste de Omán, y, para el valor extremo negativo, es en Sumatra donde se manifestó una tendencia de disminución extrema de temperatura, siendo apenas el 0,04 % del total de la franja tropical.

En el trópico americano, el 10% presentó tendencia de una moderada disminución, con cinco núcleos de mayor importancia a lo largo del neotrópico: en la Península de Yucatán, al centro de Cuba, al este de Colombia y este de Venezuela, entre los estados de Rondônia y Mato Grosso en Brasil, y entre el centro-este de Paraguay tropical, los estados de Mato Grosso del Sur, Paraná y São Paulo en Brasil. Al suroeste de Colombia, específicamente en la provincia de Nariño, se presentó un muy pequeño núcleo con tendencia de aumento máximo en la temperatura, siendo el único representativo en América.

No obstante, cerca del 14% del neotrópico se relaciona con tendencia moderada al aumento de la temperatura, siendo el continente con el mayor porcentaje de área bajo esta categoría. Por tanto, son en mayor cantidad los núcleos a lo largo del continente, en Mesoamérica y Caribe, por ejemplo, se presentaron tres de gran importancia: en el centro de México, entre

el este de Guatemala, sur de Belice, casi todo El Salvador y gran parte de Honduras, así como en la región este de Cuba y Norte de Haití. En Suramérica, son numerosos los focos bajo la categoría de tendencia de aumento moderado de la temperatura: al oeste de Colombia, entre la costa oeste y norte de Ecuador y el suroeste de Colombia, al oeste de Venezuela y noreste de Guyana, en la desembocadura del Río Amazonas, al sur de Perú, al oeste de Brasil (entre los Estados de Amazonas y Acre), al centro del Estado de Minas Gerais y una serie de núcleos en el Estado de Bahía en Brasil. Por otro lado, el 75% del América Tropical mostró bajas tendencias de aumento o disminución de la temperatura, con algunos países que, en su mayoría, se mantuvieron bajo esta clase: Costa Rica, Panamá, Surinam y el norte de Chile.

En el trópico africano, se presentaron la mayor cantidad de áreas con tendencia a la disminución, cubriendo el 25% del territorio africano tropical, y representando el 12% en relación a toda la franja tropical. Múltiples y variados en forma son los núcleos de esta tendencia, donde los más representativos son: entre el suroeste argelino y el este de Mali; entre el este de Senegal, el este de Guinea-Bissau, casi todo Guinea, todo Sierra Leona y el este de Liberia; entre el sur de Burkina Faso, el norte de Ghana y Togo, y el noroeste de Benín; una franja desde el sur de Chad, el centro y norte de Camerún y la región este y sur de Nigeria; un gran núcleo que cubre casi toda Somalia, el sur de Etiopía, el sur de Sudán (prácticamente todo Sudán del Sur), el este de República Centroafricana, toda Ruanda, el noreste de República Democrática del Congo, casi en la totalidad de Uganda y Kenia, el norte y sur de Tanzania, el centro de Malawi, y el norte, sur y este de Mozambique; el sur de Madagascar tropical; el bloque central de Yemen; y unos núcleos en Arabia Saudita y Omán.

Por el contrario, tan sólo el 4% del trópico africano mantuvo una tendencia al aumento moderado de la temperatura, con núcleos bastante dispersos entre sí: al sur de Libia con una leve extensión hacia las fronteras con Chad, Sudán y Egipto; en el centro-norte de Etiopía; entre Congo y Camerún, y en el centro de este último; entre los límites de República Democrática del Congo, Tanzania y Zambia; así como entre Zambia y Tanzania; al centro y oeste de Botsuana y este de Zimbabwe; en el centro de Namibia; y entre el sureste de Arabia Saudita, oeste de Yemen y este de Omán. Por su parte, justo en este último núcleo, está englobado el único mini núcleo del trópico con la máxima tendencia de aumento de la temperatura, específicamente en la costa sureste de Omán. No obstante, el 70% del trópico

africano presentó tendencias mínimas de aumento o disminución de la temperatura, resaltando únicamente bajo esta condición, países como Angola, Guinea-Bissau y Gambia.

Por último, el trópico asiático manifestó el único núcleo de la tendencia extrema mínima de disminución de la temperatura, justo al noreste de la isla de Sumatra, en la provincia de Aceh, en Indonesia. Este núcleo cubre tan solo el 0,2% del total de Asia tropical, y apenas el 0,04% de todo el trópico. Bajo esta línea, esta región registra el área más baja de toda la franja con la tendencia de disminución moderada, correspondiente al 4,8% y con pequeños núcleos distribuidos: al noroeste del estado de Gujarat y al este del estado de Orissa, India; entre la costa este de Bangladesh, el sur del estado de Mizoram (India) y suroeste de Chin (Myanmar); al este de Guangxi y al este de Guangzhou , en China; región centro-sur de Taiwán; centro-norte de Tailandia; una cinturón central en Camboya; costa sur de Vietnam; noreste y centro de Sumatra; casi toda la isla de Mindanao, Filipinas: y casi su totalidad de las Islas Malucas Septentrionales de Indonesia.

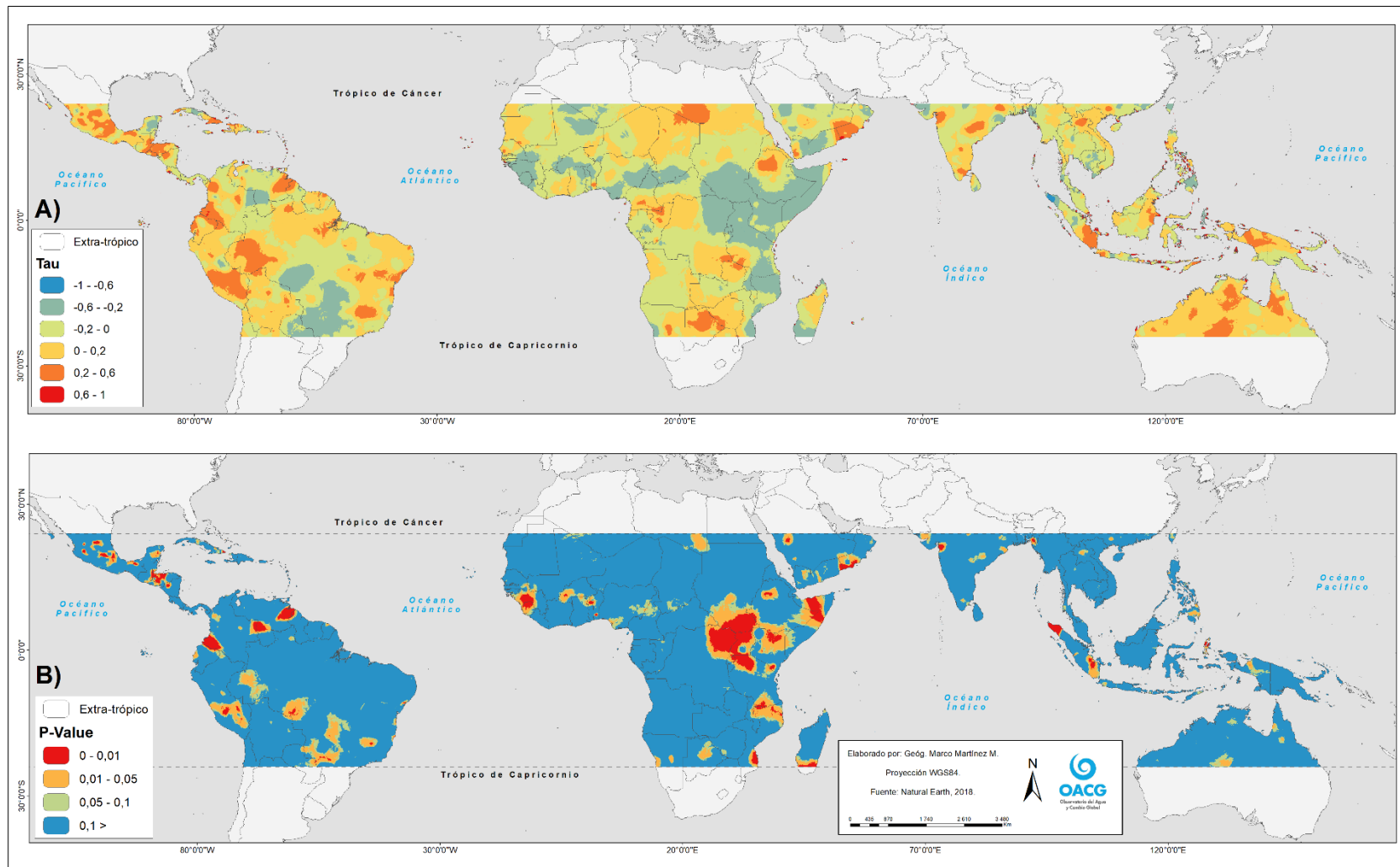


Figura 15. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable de temperatura.

4.4. *Producto Interno Bruto (PIB)*

En el PIB se ven reflejados muchos de los impactos generados por el cambio climático, desastres antropogénicos, fluctuaciones económicas, crisis sanitarias y eventos políticos opresivos que causan crisis económicas a nivel local y global, afectando los niveles de ingresos financieros de los países. De la misma forma, buenas políticas públicas financieras, enfocadas en el desarrollo sostenible y sustentable, participación ciudadana, apertura a nuevas economías y mercados, entre otros, potencian el crecimiento del PIB en un país o región. En este sentido, State of The Tropics (2014) detallan que, desde inicios de los años 90 hasta el 2014, el PIB en la región tropical ha sostenido un crecimiento del 4,7%, mayor que el resto del mundo (3.4%)

La distribución espacial del tau (Figura 16), muestra una leve intensidad de aumento en casi el 70% de toda la franja tropical, presentando un 17% con un aumento considerable. No obstante, cerca del 15% presenta una moderada intensidad en la disminución del PIB, y no existen territorios tropicales que manifiesten una alta disminución en la intensidad de cambio entre los años 1992 y 2015. Por lo tanto, cerca del 77% del trópico sostuvo una tendencia hacia el aumento del PIB.

En el Neotrópico, el PIB mostró un mosaico variado en cuanto a la diversidad de la intensidad de la tendencia de cambio. Desde un análisis a escala estatal/provincial y nacional (escala de datos original del ráster del PIB), resultó que el 17,70% manifestó una intensidad de crecimiento moderada a alta, específicamente, y con gran notoriedad en Ecuador, Perú, el sector tropical de Paraguay y el estado de Pará, en Brasil. El 44% del trópico americano presentó una leve intensidad en el aumento del PIB, incluyendo en su totalidad países como Cuba, Haití, República Dominicana, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Venezuela, las Guayanas, Surinam y Bolivia. Cerca del 40% expuso una tendencia de cambio con intensidad leve a moderada, tales fueron los casos de varios estados mexicanos, Belice, casi la totalidad de Guatemala, Puerto Rico y la mayoría de las Antillas Menores, el este y sur de Colombia, el cinturón oeste y sur de estados brasileños, así como el este.

En África por su parte, el 75% de la región tropical presentó una tendencia de aumento leve del PIB, y son puntuales los países que expresaron una tendencia al aumento moderado y

alto, como lo fueron Níger, Guinea Bissau, Costa de Marfil, Togo, Gabón, Burundi, Malawi, Zimbabue y República Democrática del Congo (único país africano en presentar una tendencia de aumento de alta intensidad). No obstante, países como Gambia, Guinea Ecuatorial y Guinea mostraron una tendencia alta a la disminución del PIB.

En Asia tropical el escenario es un poco distinto, en el tanto que, tan solo el 0,10% corresponde a una tendencia con intensidad moderada a la disminución del PIB, ubicándose al sur de Vietnam. De forma mayoritaria, territorialmente, el 87% manifestó una tendencia de leve intensidad de aumento en el PIB, y el 11% para una intensidad de aumento moderado, de forma más notoria en las islas indonesias de Sumatra, Sulawesi, Molucas Septentrionales y Molucas, así como en Papúa Nueva-Guinea.

En América tropical, no obstante, la manifestación de una muy alta significancia de la intensidad de la tendencia de cambio, se presentó específicamente en las provincias del centro y sur de Guatemala, las regiones internas coincidentes a la tendencia del aumento en Ecuador, Perú y Paraguay. En África, de la misma forma, mostró una fuerte significancia en Níger y Gabón, donde se demostró una tendencia de moderado aumento del PIB, y en la República Democrática del Congo que tuvo la única alta intensidad en el aumento del PIB. De menor forma en Asia tropical, Nueva Zelanda, Molucas Septentrionales y Molucas coincidieron con una significancia en su intensidad de cambio cercano al 0.01.

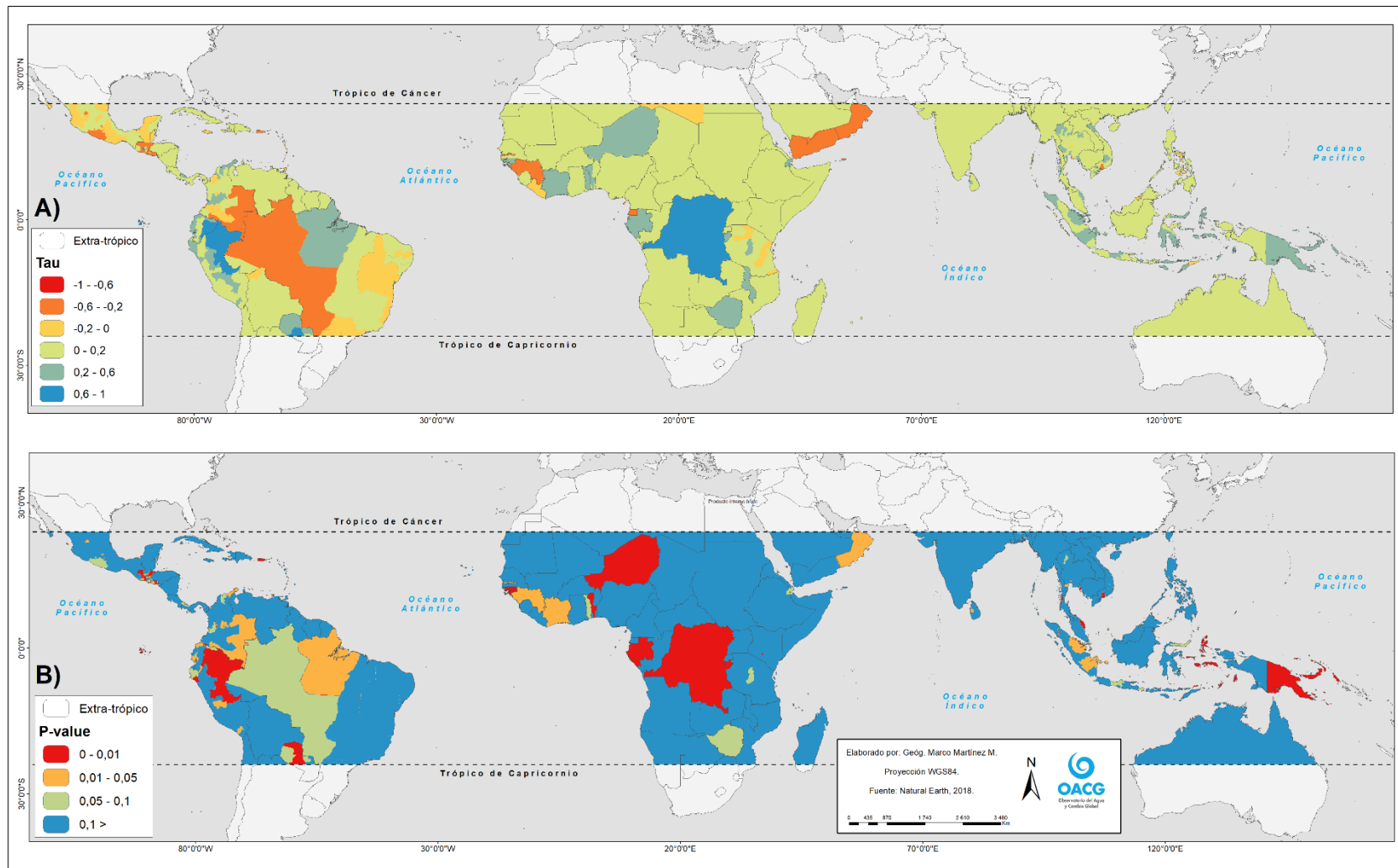


Figura 16. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable del PIB.

4.5. Índice de Desarrollo Humano (IDH)

El progreso y desarrollo humano, medido mediante el Índice de Desarrollo Humano, muestra desde 1990 un relativo progreso a nivel mundial, y dentro de la franja tropical, no es la excepción, donde se ha aumentado desde 1990 al 2010 en 0.10 (State of The Tropics, 2014). Esto se ve reflejado también en la Figura 17, que, según el valor de tau, muestra de una leve a moderada intensidad en la tendencia de cambio del IDH. A diferencia de las anteriores variables, en este caso se observa una distribución de valores tau un tanto homogéneos, sin mucha amplitud y diferencia de rangos entre los países intracontinentales del trópico. No obstante, a nivel general entre los continentes sí.

En América tropical, son muy pocos los países que presentaron una intensidad moderada en la tendencia hacia el aumento: El Salvador, Honduras, Costa Rica, Panamá, Ecuador, Surinam, Guayana Francesa, Bolivia y Paraguay. El 79% tuvo una leve intensidad en el aumento del IDH, y solo Cuba manifestó una leve intensidad en la disminución del IDH. De hecho, la región neotropical es la única en no evidenciar un aumento de mayor intensidad, respecto a África y Asia.

En África, por su parte, el 55% del territorio, son países que mostraron un moderado aumento en la intensidad del cambio del IDH, generalmente los de la región este, centro, suroeste y sur. La región subsahariana, en su mayoría, junto con Madagascar, Tanzania, Zambia, Camerún y República Centroafricana, representan el 40% del trópico africano con una intensidad de aumento leve del IDH. Únicamente Sudan del Sur y Guinea Ecuatorial manifestaron una leve intensidad en la disminución del índice, y el sur de Libia tuvo una moderada disminución del IDH.

En un escenario más homogéneo, el 61% de Asia tropical contó con un aumento moderado en la intensidad de la tendencia de cambio del IDH, y el 39% con una intensidad de aumento leve. Es decir, en ningún país de esta región, presentó algún tipo de disminución en la tendencia de cambio del IDH, a diferencia de África y América.

Sin embargo, a nivel de todo el trópico, los países que demostraron el valor de significancia más alto fueron Zimbabue y el norte de Sudáfrica, y el sur de Libia y Namibia, una significancia moderada. En la demás región tropical, se observan valores por debajo de 0.1.

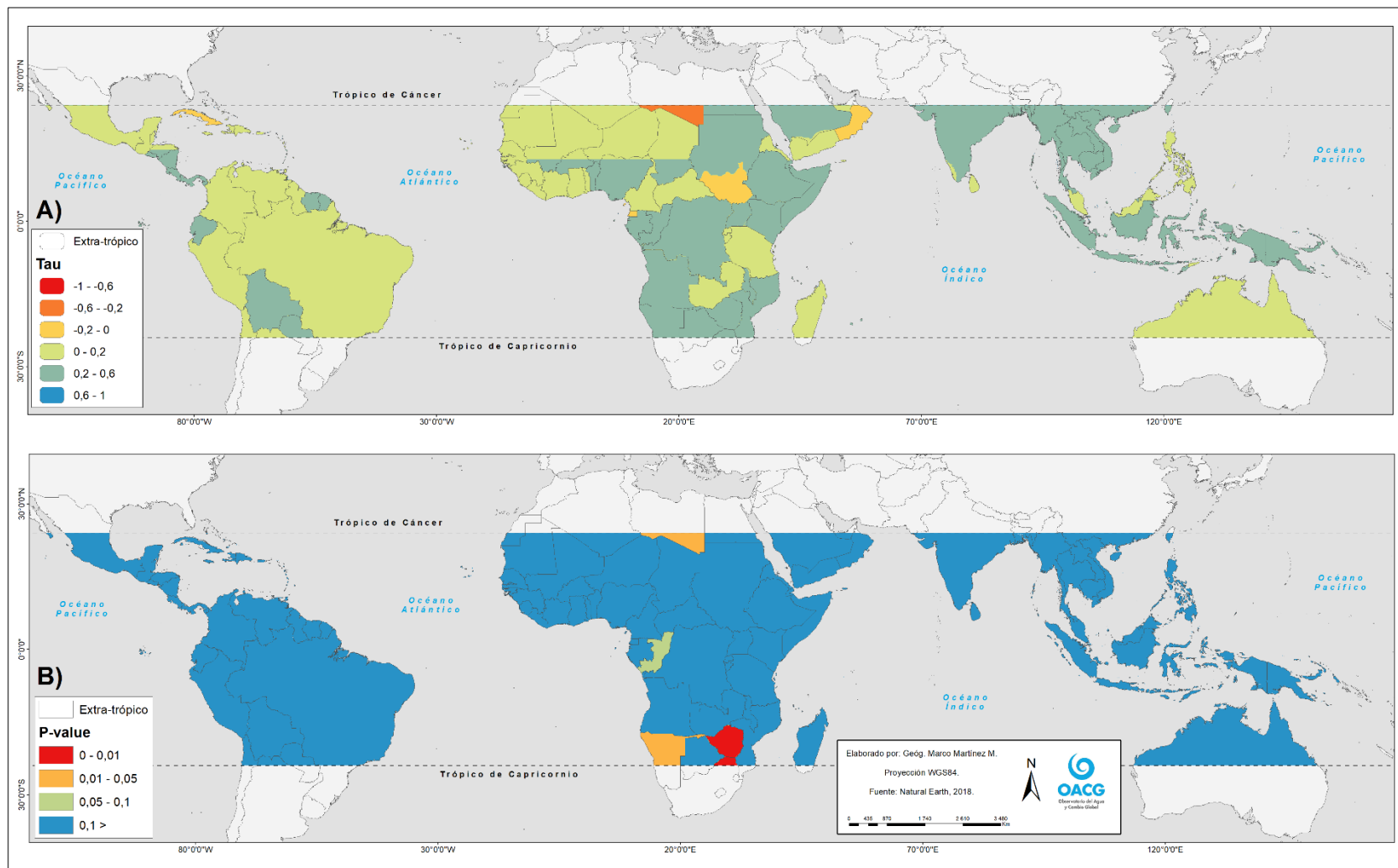


Figura 17. Distribución espacial del índice de tau y el p-value para la variable del IDH.

4.6. Población

El crecimiento poblacional en la franja tropical durante las últimas décadas ha venido en aumento. Actualmente se encuentra poco más del 40% del total de población, y se estima que en 40 años viva más del 50% de la población mundial total (López-Carr & Bilsborrow, 2009). Para el año 2015 habitaban 3.048.709.905 personas, aumentando en un 31,6% respecto al año 2000. En la Figura 18 se observa un comportamiento general que indica una focalización del aumento en las ciudades principales de cada país, excepto algunos países que manifiestan aumento generalizado en gran parte de su territorio, como Haití, Nigeria, Ruanda, Burundi e India. En correlación, estos países en mención para el 2015 fueron clasificados con un Índice de Desarrollo Humano bajo. El nivel de confianza del análisis de la variación población, determinado por el *T-Test*, es del 95%.

En América la población aumentó en 108.304.211 personas entre el 2000 y 2015, creciendo en un 27% en quince años. Porcentualmente, las Islas Turcas y Caicos, San Cristóbal y Nieves y Guayana Francesa son los territorios que presentaron el valor más alto de variación poblacional, con 47%, 45% y 43% respectivamente. Sin embargo, Haití mostró un aumento prácticamente generalizado en su territorio, aumentando poco más de 4 millones de personas (35% más respecto al año 2000). México mostró un aumento del 22%, equivalente a casi 22 millones de personas. En Centroamérica, Guatemala tuvo el mayor aumento porcentual, con 29%, y el menor El Salvador con 14% y Costa Rica con 16%.

Brasil fue el país americano donde más población aumentó, con 29.901.900 habitantes, sin embargo, representa un 16% de aumento respecto al 2000, y los focos más importantes de aumento se encuentran en las ciudades centrales y periféricas del sureste, como Goiania, Brasilia, São Pablo, Rio de Janeiro y Belo Horizonte. Colombia es el segundo país en Sudamérica y el tercero en América con mayor aumento, con más de 16 millones de personas, alcanzando un 30% de aumento poblacional, donde se evidencian focos de aumento en el corredor montañoso central.

Por su parte, Cuba y Puerto Rico representan la disminución población en el continente, con aproximadamente 110 mil habitantes menos, siendo las Islas Vírgenes Americanas donde hubo el menor porcentaje de variación, con -4%. Un fenómeno interesante de mencionar es la disminución de población en ciertas ciudades de América tropical, que se

evidencian en la Figura 18, particularmente las zonas centrales de la Ciudad de México, Guadalajara, San Salvador y San José. Alrededor de ellas, se observan regiones donde existe un aumento poblacional alto.

En el caso de África tropical, es el continente que más aumento poblacional reveló, con un total de 329.938.119 personas entre el 2000 y 2015, y con un porcentaje de aumento del 55%. Los países con el mayor aumento son los que se encuentran en la franja central africana. Nigeria tuvo el mayor aumento en África, y el segundo en el trópico, con aproximadamente 68 millones de habitantes, y un porcentaje de crecimiento del 37%, seguido de R.D. del Congo con poco más de 43 millones de personas más respecto al 2000, y presentando el porcentaje más alto en África, con 49% de crecimiento. El otro visible aumento poblacional se manifestó en la región este de África, específicamente en Etiopía, Uganda, Kenia, Ruanda y Burundi. Estos dos últimos exponen un crecimiento poblacional en casi todo su territorio. Únicamente, República del Congo tuvo una disminución de 1.185.830 habitantes, con un porcentaje de -33% entre el 2000 y 2015.

Por otro lado, Asia mostró un importante crecimiento de población, con 278.311.918 habitantes, sin embargo, tiene el porcentaje más bajo, con 22% de aumento respecto al año 2000. No obstante, la región de India tropical tiene el abrumante aumento de 126.864.000 de personas, el más alto en el trópico, seguido de Indonesia con aproximadamente 54 millones de habitantes. En Bangladesh es donde se encuentra el mayor aumento de población en un pixel en todo el trópico, con un valor de 49335 por 1km², y es el único país que gran parte de su territorio ostenta aumento poblacional.

La región china en el trópico es pequeña respecto al tamaño total del territorio, pero es suficiente para aportar 31.885.700 de personas más, concentrándose en gran medida en las ciudades primarias de la provincia de Guangzhou. Además, en el Pacífico asiático habita el 30% del total de población que aumentó entre el 2000 y 2015, siendo Indonesia donde hubo mayor crecimiento con 54.325.300 de personas (21% de aumento), y Filipinas con 18.230.400 de personas (18% de aumento). Los casos de disminución son pocos, y relacionados con la ubicación de ciudades capitales, por ejemplo, en la ciudad de Naypyidaw en Myanmar, al noreste de Hanói en Vietnam y al norte de Bangkok. Aunado a ello, la Región de Mindanao, así como el archipiélago de Sulu en las Filipinas, manifiestan en casi su totalidad territorial disminución poblacional.

5. Capítulo quinto: Índice de Cambio Global para el trópico.

En el cambio global, conceptualmente, convergen diversas variables de carácter espacio temporal con dinámicas internas distintas entre sí, conducidas de cierta forma por agentes internos y externos de un territorio, lo que puede llevar a observar manifestaciones de cambio en otro sitio a cualquier escala. El funcionamiento natural de la Tierra ha sido afectado por las acciones humanas, en especial desde la Revolución Industrial, modificando y destruyendo miles de hectáreas alrededor del mundo para establecer nuevos ecosistemas antropizados.

La interacción de los sistemas sociales entre sí, y éstos con los sistemas biofísicos y naturales es una característica del cambio global, tomando en cuenta los efectos multiescalares que imponen una gran dificultad para la predicción de su evolución (Duarte, 2016). El cambio del uso de la tierra y del suelo son las manifestaciones más evidentes del cambio global en el trópico, donde se materializa la conversión de bosques tropicales por zona agrícolas y de pastura, que, en su efecto, ha alterado el clima en las décadas más recientes de forma acelerada (Scholes & Breemen, 1997).

Estudiar el cambio global lleva consigo grandes retos para distinguir y fundamentar la problemática en un territorio, obtener los datos socioeconómicos, políticos y físico-naturales, desarrollar la métrica y la cuantificación de los efectos, así como validar e interpretar los resultados generados. La amplia conectividad global ha facilitado importantes repositorios de información científica que, con diversas herramientas tecnológicas geoespaciales, se ha logrado investigar de mejor forma el cambio global, creando análisis históricos, modelos y proyecciones donde se integran datos de los sistemas sociales y naturales de un territorio o región planetaria.

Con ello, se creó el Índice de Cambio Global para el Trópico (ICGT), el cual se centra en medir la intensidad espacial del cambio multivariable entre 1992 y el 2015. El ICGT es una herramienta útil que explica cómo en un territorio convergen ciertas variables sociales y ambientales para dictar una dinámica compleja, derivada de cambios positivos o negativos según sean los factores iniciales del modelo.

En este sentido, el ICGT muestra que hubo cambios en todo el trópico con diversa intensidad (Figura 19), exponiendo el 80% del trópico con cambios muy bajos y 18,9% de cambios bajos, y con tan sólo el 0,65% de cambios moderados a muy altos. A nivel general, se distingue un escenario poco alterado, con cambios leves en su mayoría, sin embargo, según sea la escala de análisis, se observan territorios que en 15 años han presentado importantes dinámicas entre los sistemas sociales y ambientales.

La Figura 19 hace notar que en todas las regiones continentales del trópico existen focos relacionados a una mayor intensidad de cambio global, incluso países en su mayoría territorial. De hecho, las zonas de mayor cambio o con los valores más altos son algunas islas del Caribe, Atlántico africano y de los archipiélagos del sureste asiático, así como algunos territorios costeros en los tres continentes.

Una interesante relación espacial, aproximada, coexiste con la distribución de valores del índice entre 0,35 – 0,60 (cambios moderados) y la ubicación de los bosques tropicales húmedos, especialmente en la región sur y sureste de la Amazonía, África y Asia insular, justo donde se encuentran los principales bosques húmedos y zonas más biodiversas del trópico. A modo de ejemplo, casi el 10% de los bosques húmedos africanos se encuentran entre los valores de 0,30 a 0,60, y el 5% de la cuenca del Amazonas bajo los mismos valores.

Por otra parte, existen ecosistemas de manglares ubicados en territorios que presentan un valor moderado a alto en el ICGT, principalmente en varias de las islas de las Antillas Menores, costa noroeste de Brasil, costa este africana, sur de Bangladesh y sector noroeste de Sumatra, en Indonesia. Cerca del 20% de los manglares de las Antillas Menores, están relacionados con áreas que tienen un índice de cambio global entre moderado y alto.

Una calificación media o alta del índice en ecosistemas frágiles aumentan la vulnerabilidad de las especies de flora y fauna que forman parte del sistema, además de comprometer los servicios ecosistémicos que brindan a la sociedad y al ambiente natural. El índice brinda información de dónde ocurrieron cambios de forma intensa o no, y, sí existen coincidencias espacio-temporales de cambios socioeconómicos y ambientales perjudiciales, vuelven aún más vulnerables ciertos territorios.

En los ecosistemas desérticos y xerófilos, coinciden más bien valores del índice muy bajos, cercanos a 0, lo que evidencia que, en estos lugares durante 23 años, han sido muy leves los cambios entre los sistemas sociales y ambientales. En este sentido, este comportamiento es mucho más evidente en la franja del Sahara tropical, desierto de Arabia y región norte del trópico mexicano (Desierto de Chihuahua)

El América tropical posee un 82% de su territorio en cambios globales muy bajos, y un 17% con valores entre 0,20 y 0,40. No obstante, sí posee regiones y territorios con cambios más notorios en su interior, como lo es el Triángulo Norte Centroamericano, destacando más El Salvador y en sus cercanías al Golfo de Fonseca; las islas caribeñas, específicamente Bahamas, Islas Británicas e Islas Vírgenes, éstas dos últimas con valores máximos de 0,9 en sectores de su territorio; en Costa Rica destaca el Área Metropolitana y el distrito de Puntarenas, empero, Isla Chiriquí tiene un valor máximo de 0,57 e Isla del Coco con 0,85 (ICGT muy alto).

En Suramérica destaca la parte alta de la cuenca amazónica, puntualmente el noreste de Ecuador (país con gran parte de su territorio con mayor valor del índice) y el centro y norte de Perú con valores cercanos al 0,43. Los principales causes de la cuenca del Amazonas presentan también notables diferencias del índice respecto a su entorno, así como grandes áreas en los departamentos de Mato-Grosso, Rondônia y Pará de Brasil, con valores que superan el 0,40. Los países de Guayana, Surinam y Guyana Francesa son los que tiene los cambios más bajos en casi todo su territorio.

En África, se observa más notoriamente un índice moderado en la franja central del continente, especialmente los territorios de Guinea, Sierra Leona y Guinea-Bissau, norte de Togo y en el este y costa sureste de Nigeria. En la cuenca del Congo particularmente, llama la atención el este de República Democrática del Congo, la desembocadura de la cuenca y las veredas de los principales afluentes de la cuenca, no obstante, todo el país de República Democrática del Congo resalta con valores medio entre sus territorios vecinos.

Conjuntamente, los valores correspondientes a altos cambios globales se ubican en las islas de Socotra y Kilmia de Yemen, en el archipiélago sur en el Mar Rojo, la mayoría de las islas de Cabo Verde, en especial São Nicolau y Sal, que poseen el valor 1, siendo el máximo en el ICGT. De forma contraria, como se mencionó en líneas anteriores, la franja

Subsahariana posee los valores de cambios globales muy bajos, concretamente Mauritania y Argelia casi en sus totalidades territoriales, y el centro y norte de Chad.

Asia tropical, por su parte, concentra los valores altos y medios en el archipiélago sureste, y no en India o la Península Indochina, donde se sitúa la mayor cantidad de población. No obstante, las islas délticas de los ríos Ganges, en Bangladesh, presentan valores de hasta 0,85 en el índice (isla Sandwip), la costa noroeste y las islas del sur de Myanmar, así como las islas de Lantau y Hong Kong. Es entonces, en Filipinas expone todas las islas del Mar de Sibuyán, las del estrecho de Mindoro y del Mar de Mindanao.

Indonesia por su parte, en la isla de Sumatra, al norte cuenta con valores cercanos a 0,41, en el centro con 0,48 y el sureste con 0,40; las islas del archipiélago del estrecho de Singapur, la isla Riau, así como en archipiélago en el Mar de las Molucas. En Papúa Nueva Guinea destacan los archipiélagos en el Mar de Bismark y el de Louisiade en el Mar de Salomón con cambios de moderados a altos.

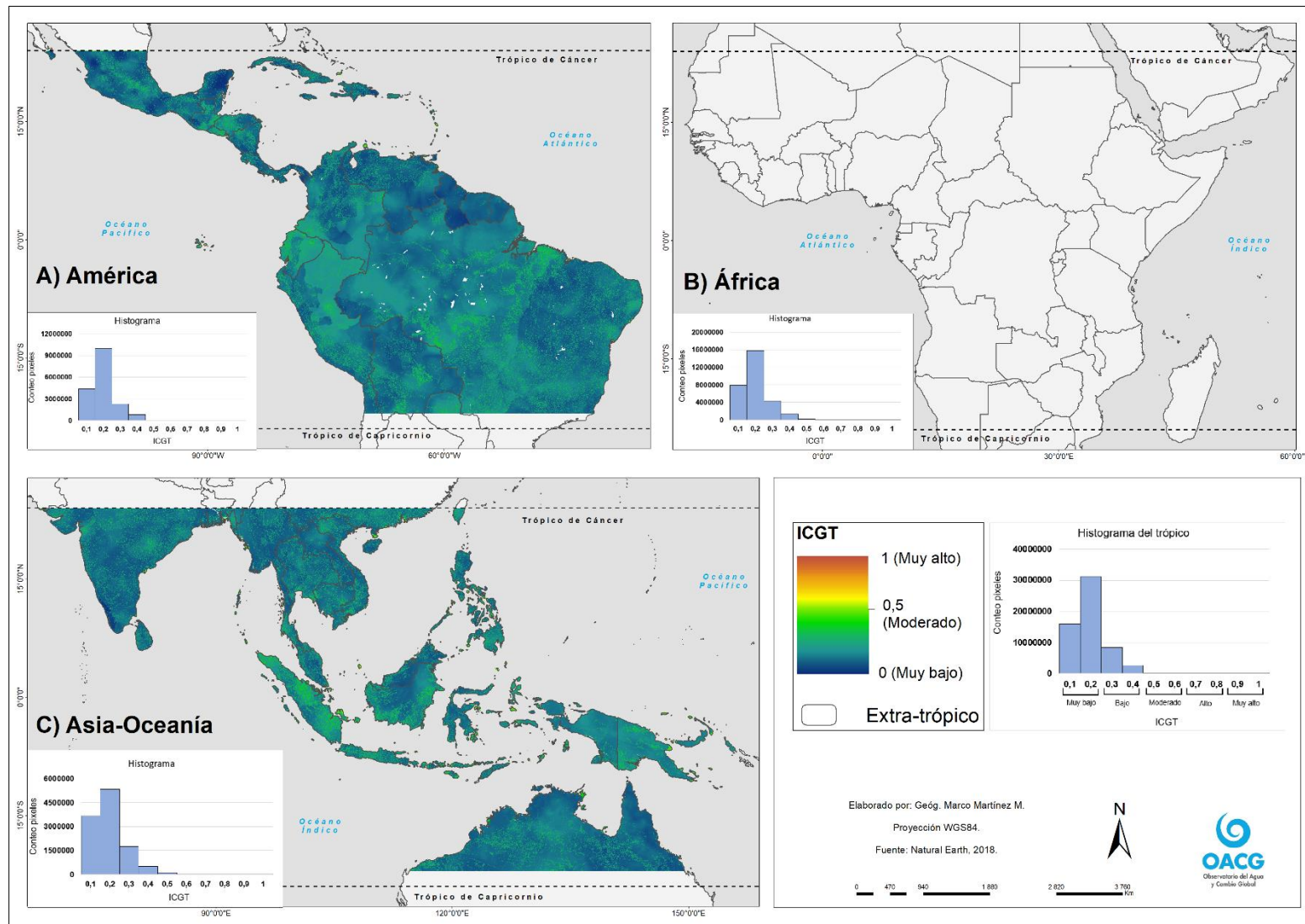


Figura 19. Distribución espacial Índice de Cambio Global para el Trópico.

5.1. *Análisis regional del ICGT: Casos de estudio*

El Índice de Cambio Global para el Trópico manifiesta lo dinámico y cambiante que es esta región de la Tierra y que en su interior muestra heterogeneidad geográfica basada en la conjunción de diversas variables, en la que cada una ejerce su energía motivada por agentes directos o indirectos a ellas. Es por ello que en las siguientes líneas se analizarán cuatro regiones de suma importancia en el trópico con el objetivo de indagar minuciosamente la razón del comportamiento del ICGT con base a los patrones expuestos por las variables socioeconómicas y ambientales, además de determinar si existe algún tipo de afectación ante el cambio global.

La región de Centroamérica, la cuenca del río Amazonas, la cuenca del río Congo y el archipiélago indonesio serán de mucha utilidad para comprender cómo funciona el cambio global determinado tras el índice creado, y observar cómo ciertas dinámicas geográficas, sociales, políticas y económicas propias de cada región inciden negativa o positivamente en los territorios. A su vez, estas son las regiones que presentan mayores valores del ICGT, además de presentar gran vulnerabilidad ambiental y social, lo que es necesario examinar a fondo el accionar multivariable.

5.1.1. *Centroamérica*

Según valores del ICGT (Figura 20), presenta un rango de valores de 0 - 0,85, siendo los más altos en las islas de la región (Isla del Coco en Costa Rica, Cayo Mayor en Nicaragua y Roatán en Honduras, por ejemplo). Continentalmente, los datos más altos se ubican entre la zona norte de Nicaragua, gran parte de Honduras y El Salvador, y la frontera este de Guatemala con algunas zonas de la Selva Maya.

Un fuerte cambio de uso de la tierra, manifestado en deforestación por áreas de cultivo y pasturas, se ha presentado más notoriamente en Guatemala, justamente en la zona central-norte, entre las provincias de Guatemala y Petén, invadiendo las fronteras forestales de la Reserva de la Biósfera Maya y traspasando hacia el Área de Conservación de Rio Bravo en Belice. Por su parte, el otro frente de deforestación importante en la región se presenta en la región del Caribe de Nicaragua, afectando las Reservas Naturales de Bosawás,

Alamikamba, Cerro Wawashan y demás reservas entre las provincias de Atlántico Norte y Sur.

Los impulsores de la deforestación en Centroamérica son múltiples, y con variable intensidad entre los mismos países. Pacheco et al. (2021) identifica una serie de factores que han propiciado la tala de bosques masiva, específicamente para la Selva Maya, donde los principales motivos han sido: la producción ganadera extensiva causada por actividades ilícitas y comercio ilegal, y agricultura de pequeña y gran escala para cultivar soja, palma africana y otros productos comerciales, generando incluso incendios forestales para la limpieza de terrenos.

No obstante, los agentes primarios de la deforestación son los pequeños y mediados agricultores al migrar hacia territorios rurales en busca de tierras cultivables, lo que ha generado el aumento del frente de deforestación con patrones espaciales significativos cerca de parques y reservas naturales importantes, como sucede en Petén (López-Carr & Burgdorfer, 2013), impulsados además por el auge a inicios del siglo XXI de los agroquímicos y nueva tecnología agrícola que les ayudó a expedirse a nuevas tierras (López-Carr et al., 2006).

Sin embargo, el comercio internacional incide en el aprovechamiento de tierras forestadas para la instauración de áreas cultivables y de ganadería para satisfacer la demanda global interviniendo grandes empresas en el Estado creando políticas públicas para favorecer la nueva producción, tal como sucedió con el monocultivo de la piña en Costa Rica a inicios de la década del 2010 (Boeglin, 2010). Se podría pensar entonces, que la globalización y la economía internacional son las que interfiere, de cierta forma, en el cambio de uso de la tierra y la deforestación en Centroamérica.

Según el análisis de la tendencia de cambio del clima en la región, presenta a Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua como los países con un mayor nivel de aumento de temperatura, y Nicaragua, El Salvador y la zona oeste de la provincia del Atlántico Norte con la tendencia hacia el aumento de precipitación. En el resto del territorio, climáticamente muestra una tendencia muy baja o neutral de cambio.

Investigaciones climáticas de Centroamérica apuntan que esta es una de las regiones más vulnerables ante el cambio climático, y el mayor “*hot spot*” de los trópicos, donde los extremos de temperatura aumentaron entre 0,2 °C y 0,3 °C por década (Giorgi, 2006; Cifuentes, 2010). De acuerdo a los resultados obtenidos, se concuerda con Hidalgo (2021) que las tendencias observadas de la temperatura han aumentado significativa en varias partes de Centroamérica.

Así mismo, son coincidentes los resultados con Cifuentes (2010) puesto que en la región no se observa una disminución fuerte de la precipitación, lo que sugiere es que los patrones de precipitación tienden a llover durante menos tiempo, pero de forma más intensa. Se presenta, únicamente, en la zona del Caribe central de Costa Rica un foco de disminución en la tendencia de cambio de la precipitación.

Los cambios en el clima de la región son motivados por varios impulsores, y a su vez presentan múltiples estresores derivados de los sistemas naturales y sociales. Magrin (2014) menciona que, en Centroamérica, parte de los cambios observados en el clima se atribuyen a la variabilidad climática propia de la región, pero que, de forma significativa las actividades humanas y el cambio de uso de la tierra y del suelo han sumado fuerzas en el cambio climático. Anteriormente se detalló la alta vulnerabilidad ambiental ante el cambio de uso de la tierra en la región, materializada en deforestación, lo que lleva a una menor capacidad de captación de dióxido de carbono.

Ante la evidencia de cambios en el clima y las proyecciones poco esperanzadoras para Centroamérica, son necesarias la formulación de planes de adaptación y acción ante el cambio climático, con enfoques de producción bajo carbono neutralidad y desarrollo sostenible. Todos los países de Centroamérica tienen políticas de acción ante el cambio climático, unas un tanto diferentes que otras, y otros países más comprometidos que otros. Hidalgo (2021) puntualiza que Costa Rica y Panamá presentan planes robustos de adaptación, y en los demás territorios cuentan con políticas ambientales que tratan la acción ante el cambio climático, teniendo ejes en común en manejo del agua, agricultura y gestión del riesgo.

A lo anterior, suma además el importante aumento población en la región, con mayor enfoque en el Triángulo Norte, donde se evidencia la concentración del crecimiento en las

ciudades más importantes de cada país. Por otro lado, es en esta sección centroamericana donde se ubica un alto porcentaje de población rural, que según el Banco Mundial (2021) para el 2015, Guatemala poseía un 50%, Honduras el 45% y Nicaragua un 42%.

Con relación al cambio de uso de la tierra, en estos tres países, a excepción de El Salvador, es donde se presentó la mayor deforestación de la región para crear nuevas tierras cultivables y pasturas ganaderas. En ese sentido, López-Carr & Bilsborrow (2009) evidenciaron que, para inicios del siglo XXI, mientras existió un alto porcentaje de población rural en Centroamérica, hubo una disminución en las áreas forestales, aumentando a un 16% los pastos y 39% a áreas cultivables, especialmente en Guatemala, Honduras y Nicaragua.

La presión antrópica ejercida en el medio por acceder a nuevas tierras y domesticarlas por parte de los locales y pequeños agricultores es una consecuencia de las políticas estatales por generar empleos y por el sistema económico internacional que ha moldeado a los países centroamericanos en el subdesarrollo (López-Carr *et al.*, 2006), y la migración hacia el campo es una respuesta en busca de mejores oportunidades (López-Carr & Burgdorfer, 2013).

El subdesarrollo en Centroamérica es evidente, y marca cierto peso en el ICGT, al mostrar cambios negativos por los factores socioeconómicos en Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua. A pesar de que en el IDH la mayoría de los países del istmo han tendido hacia un crecimiento moderado, no es resultado de una mejora significativa en la calidad de vida de los pobladores, y que, de cierta forma, el PIB mismo lo refleja. Problemas históricos en la región, especialmente en el Triángulo Norte, han acrecentado un nivel de desarrollo bajo y con tendencias reducidas en cuanto al crecimiento económico.

Leggett (2007) acota que la región es vulnerable de forma amplia, por ingresos inequitativos, falta de ordenamiento territorial, pobreza masiva, corrupción, tráfico de drogas y armas y una inestabilidad post conflictos políticos. Existe una correlación entre el IDH bajo y el nivel de rapidez de la deforestación en Nicaragua y Guatemala, las dos naciones más pobres de la región, gran parte en áreas de colonización de hogares de pequeños agricultores (López-Carr & Burgdorfer, 2013).

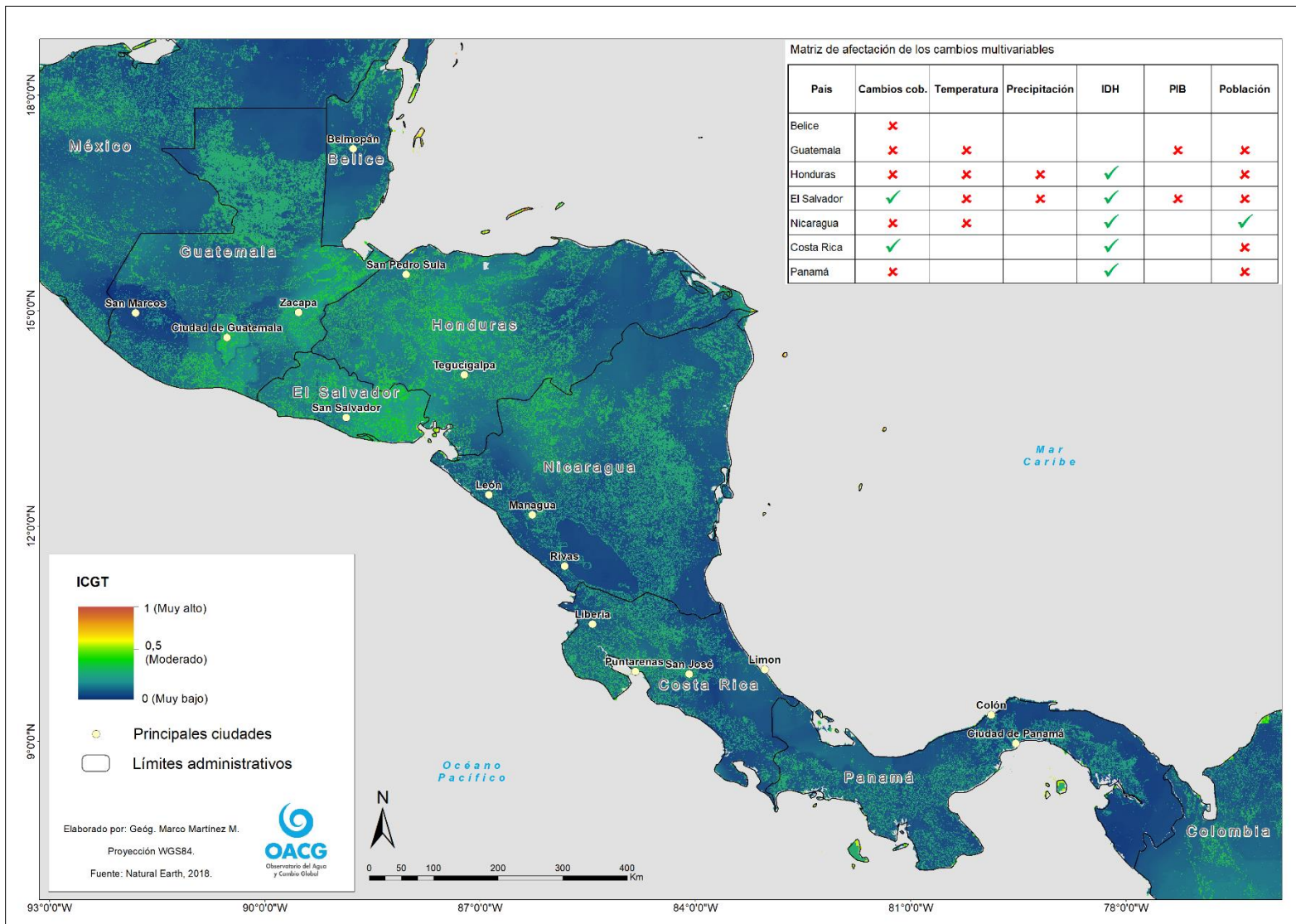


Figura 20. Índice de Cambio Global para el Trópico en Centroamérica y matriz de cambios multivariables.

5.1.2. Cuenca del Amazonas

Respecto a Centroamérica, y otras regiones del trópico, el valor máximo del índice en la cuenca es de 0,4, relacionado geográficamente en la parte alta de la cuenca (Pucallpa en Perú, y noreste de Ecuador), los estados de Mato-Grosso, Rondônia y Pará, y al sur de la cuenca, en el departamento de Santa Cruz. De modo contrario, los valores cercanos a 0 se ubican el sur de Venezuela y al oeste del estado de Amazonas en Brasil (Figura 21).

La enorme biodiversidad que contiene la cuenca es de las más ricas a nivel mundial, sumado a sus incalculables servicios ecosistémicos que brinca al ambiente y al ser humano, además de ser el hogar de varias tribus locales. No obstante, la riqueza en flora y fauna en el Amazonas se ha visto comprometido por la alta y evidente deforestación desde mediados del siglo XX. Pérez (2021) destaca que desde 1960 el Amazonas inició con los embates y la presión producida por la producción industrial.

La manifestación más relevante dentro del cambio de uso de la tierra y del suelo en la cuenca es la deforestación, la cual es motivada e impulsada por varias causas sociales, económicas y políticas, con épocas de mayor transformación del bosque, y otras con un auge en la recuperación forestal. Son amplias y diversas las causas, en las que Fearnside (2017) cita:

- Especulación y tenencia de la tierra, una forma práctica de asegurar la propiedad es deforestar para pastoreo de ganado, o “mejorar” el terreno (deforestar y plantar) para reclamar el título de propiedad.
- Demanda internacional de productos para exportación como la soja y carne vacuna, impulsando la conversión de tierras forestales a agropecuarias. China es el principal país importador de soja de Brasil, además, Rusia, Estados Unidos y también China son los mayores compradores de carne vacuna brasileña.
- Gobernanza departamental endeble que favorece la deforestación, incluso en fechas pre electorales.
- Incentivos fiscales ofrecidos por el gobierno brasileño para motivar a los ganaderos a tomar tierras y deforestarlas, así como préstamos generosos con tasas de interés bajas.

- Lavado del dinero en actividades agropecuarias tras vínculos con el tráfico de droga, secuestro de camiones, corrupción del gobierno, entre otros.
- Tala de árboles y venta maderera.
- Minería a cielo abierto de hierro, bauxita, aluminio, entre otros. Además de la tala para la extracción, expone una contaminación significativa a los cuerpos de agua.
- La apertura de carreteras dentro de la Amazonía es de los factores más poderosos en la deforestación, ya que motiva a los ganaderos y agricultores a trasladarse y buscar terrenos para transformar el bosque en actividades productivas. El 80% de la deforestación de la cuenca en territorio brasileño se sitúa a lo largo del arco de la deforestación, una franja en media luna que va de sur a este del borde del bosque.
- Y, el aumento poblacional sobre todo en territorios rurales, ya que ejercen presión por el medio y demandan acceso a tierras productivas.

Además, históricamente en Brasil han existido gobiernos que han favorecido, de cierta forma, la deforestación masiva en la Amazonía, creando políticas públicas o desarticulando ciertos organismos estatales que dan paso al incremento de la eliminación de áreas forestales y convertirlas a áreas productivas. Los gobiernos tienen el poder de establecer e implementar políticas fiscales, regulaciones de uso de la tierra, infraestructura energética y de transporte, políticas de importación y exportación, negociación del financiamiento y muchas otras acciones e instrumentos que influyen en el destino de los bosques (Ardila *et al*, 2021).

Es preocupante repensar el estado actual de la Amazonía brasileña, ya que el presidente Jair Bolsonaro ha creado todo un sistema que ha desmantelado el poder conservacionista en los bosques de la cuenca. En el 2019, redujo en un 50% las plazas de funcionarios del Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables (IBAMA), los cuales se encargan de monitorear y fiscalizar el cumplimiento de la ley en el Amazonas, lo que han disminuido significativamente las multas en la región y han aumentado correlacionalmente las tasas de deforestación, por ejemplo (Pérez, 2021).

En Brasil ha creado leyes y reglamentos que regulen la deforestación y el daño ambiental que se ha generado en la cuenca desde 1960 (incluso desde el siglo XIX), con la reformulación de la constitución en 1988, desarrollando ciertos apartados para la conservación del ambiente y la instauración de oficinas estatales para la vigilancia de la

deforestación y tala ilegal (Pérez, 2021). A pesar de ello, Bolsonaro muestra total negligencia por la conservación de los bosques amazónicos, y que de forma indirecta incentiva la deforestación y sobre aprovechamiento de la tierra para fines totalmente económicos, mediados en parte por el orden económico global.

En Bolivia por su parte, presenta el otro frente de mayor deforestación relativa dentro de la cuenca, que expuso gran parte del departamento de Santa Cruz. Müller *et al.* (2012) determinan tres causas principales de las conversiones de tierras forestales a otros usos, principalmente agropecuarios: 1) expansión de tierras dedicadas a agricultura mecanizada, 2) crecimiento de la agricultura a pequeña escala, y 3) expansión de la ganadería. Los resultados obtenidos concuerdan con Müller *et al.* (2014), basados en Killeen *et al.* (2007) y Cuellar *et al.* (2012), y evidencian que la actividad que más causó deforestación en las partes bajas de Bolivia fue la agricultura mecanizada, siendo casi el 54% del total entre los años 1992-2004.

El factor común de la deforestación entre Bolivia y Brasil es la actuación de las empresas transnacionales para crear grandes terrenos cultivables de soja, caña de azúcar, maíz y arroz (productos en Bolivia). No obstante, se identifican empresas brasileñas y colonos japoneses y menonitas como los actores principales de la mecanización de tierras bolivianas. El 60% de la deforestación entre el 2005 y 2010 fue causada por la expansión de la ganadería hacia fronteras boscosas (Müller *et al.*, 2014).

Hoy en día, la cuenca del río Amazonas cumple un rol muy importante en el sistema climático e hidrológico mundial. La convergencia de varios impulsores del cambio global está interactuando de forma no lineal en la cuenca, principalmente el cambio de uso de la tierra y el cambio climático, con sus mayores manifestaciones en la deforestación y el calentamiento global, que están induciendo a una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos e incendios forestales, lo que somete a los bosques amazónicos a una mayor presión ambiental y alta vulnerabilidad (Nobre *et al.*, 2016).

Con base a los resultados obtenidos, se observa una particular tendencia general al aumento de la temperatura en la cuenca, más específicamente en la región trifronteriza de Colombia, Ecuador y Perú, sur de Perú y oeste de Brasil, en el estado de Amazonas. Por su parte, la mayor tendencia a una importante disminución de la precipitación se encuentra

en el norte y centro de la cuenca, justamente donde conserva el mayor reservorio forestal del Amazonas, además del sur de la cuenca en territorio boliviano.

Acorde a lo mencionado, Marengo *et al.* (2011) proponen que existe una relación entre la disminución de la precipitación en áreas deforestadas de la cuenca amazónica, además de una disminución del caudal y el aumento de la temperatura. Según Sampaio *et al.* (2007) y Sampaio (2008) en mención de Marengo *et al.* (2011) sugieren que cuando se pierde más del 40% de la extensión original de la selva amazónica, las precipitaciones disminuirán significativamente.

Efectos como estos, evidencia la enorme vulnerabilidad climática y ambiental que presenta la cuenca del Amazonas, cuestionando el papel del gobierno en miras de la conservación del gran reservorio de carbono en el mundo. La pérdida de la cobertura forestal a corto plazo, o los efectos negativos del cambio climático a largo plazo podrían tener impactos más amplios en la intensificación de la sequía y aumento de incendios forestales, potenciando nuevos cambios de la cobertura de la tierra y cambio climático, como un círculo vicioso (Marengo & Souza, 2018).

Del mismo modo, el sistema económico de los países que integran en su mayoría la cuenca, para el año 2015 presentaron un promedio de PIB de US\$ 6.075.000 (Banco Mundial, 2021), lo que infiere que el nivel económico de los países no es el óptimo y que sus finanzas no cubren las necesidades de conservación requeridas en la cuenca y su sistema ambiental en general. Los países han sacado un enorme provecho a los recursos naturales que la cuenca brinda, por ejemplo, la creación de grandes plantas hidroeléctricas para aprovechar el considerable caudal hídrico, el aprovechamiento de plantas medicinales, extracción de minerales e hidrocarburos y la explotación de la tierra para establecer ganadería y cultivos causando deforestación.

En Perú y Ecuador, la búsqueda de petróleo y gas impulsó el desarrollo, ocasionando grandes impactos ambientales y sociales como el desplazamiento de los pueblos indígenas por enfermedades exógenas, contaminación (aire, agua y tierra), deforestación y agotamiento de los recursos naturales (Kashyap, 2004). Con base a los datos obtenidos, gran parte de la cuenca, específicamente los estados de Rondônia, Mato Grosso y Amazonas en Brasil, además de Colombia, presentan una tendencia a la disminución del

IDH, con contraria tendencia para Ecuador y Perú. Conjuntamente, el análisis de tendencia del PIB sólo muestra a Ecuador y Bolivia con un moderado aumento en su valor, los demás territorios presentan un comportamiento estable.

Por último, el crecimiento poblacional con los datos recopilados revela ser mayor en la parte alta de la cuenca (Ecuador y Perú) y en las tierras bajas de Bolivia y Perú, y de forma muy dispersa en el territorio brasileño, coincidente espacialmente con las áreas de explanación urbana. Fearnside (2017) afirma que el aumento de la población es un factor que ejerce presión por recursos de la cuenca, materializándose de alguna forma en la deforestación y apropiación de terrenos forestales. El mismo autor señala que, la presión no proviene de las áreas urbanas sino de las poblaciones rurales que abren paso con la ampliación de las carreteras intra-amazonas que el mismo estado construye.

5.1.3. Cuenca del Congo

La cuenca del río Congo, situada en África central es uno de los ecosistemas más biodiversos del continente, ubicándose además el bosque africano tropical más lluvioso, representando cerca del 70% de toda la masa forestal de África (Megevand, 2013). Según datos del IGCT, se presenta un valor máximo de 0,53, ubicado precisamente en la capital del R.D. del Congo, Kinshasa, y valores de entre 0,40 a 0,45 en la sección de la cuenca baja (sur de la provincia de Bandundu) y noroeste de R.D. Congo. Por el contrario, en el sur de la República Centroafricana, el noroeste de Angola y la sección fronteriza de Tanzania con R.D. del Congo es donde se presentan los valores de menor rango o cercanos a 0, es decir, donde los cambios globales manifestaron un dinamismo muy bajo o nulo.

En la cuenca se presentan ciertos parches de deforestación de forma dispersa, concentrándose en su mayoría en la R.D. del Congo y en la sección este de la cuenca, en Tanzania. Empero, comparado con la cuenca del Amazonas, o Centroamérica, en la del Congo no se exponen grandes parches de deforestación, más bien, en la sección sur y este de la cuenca se presentaron importantes áreas de recuperación forestal, puesto que la deforestación y la degradación ambiental han sido mínimas (Megevand, 2013).

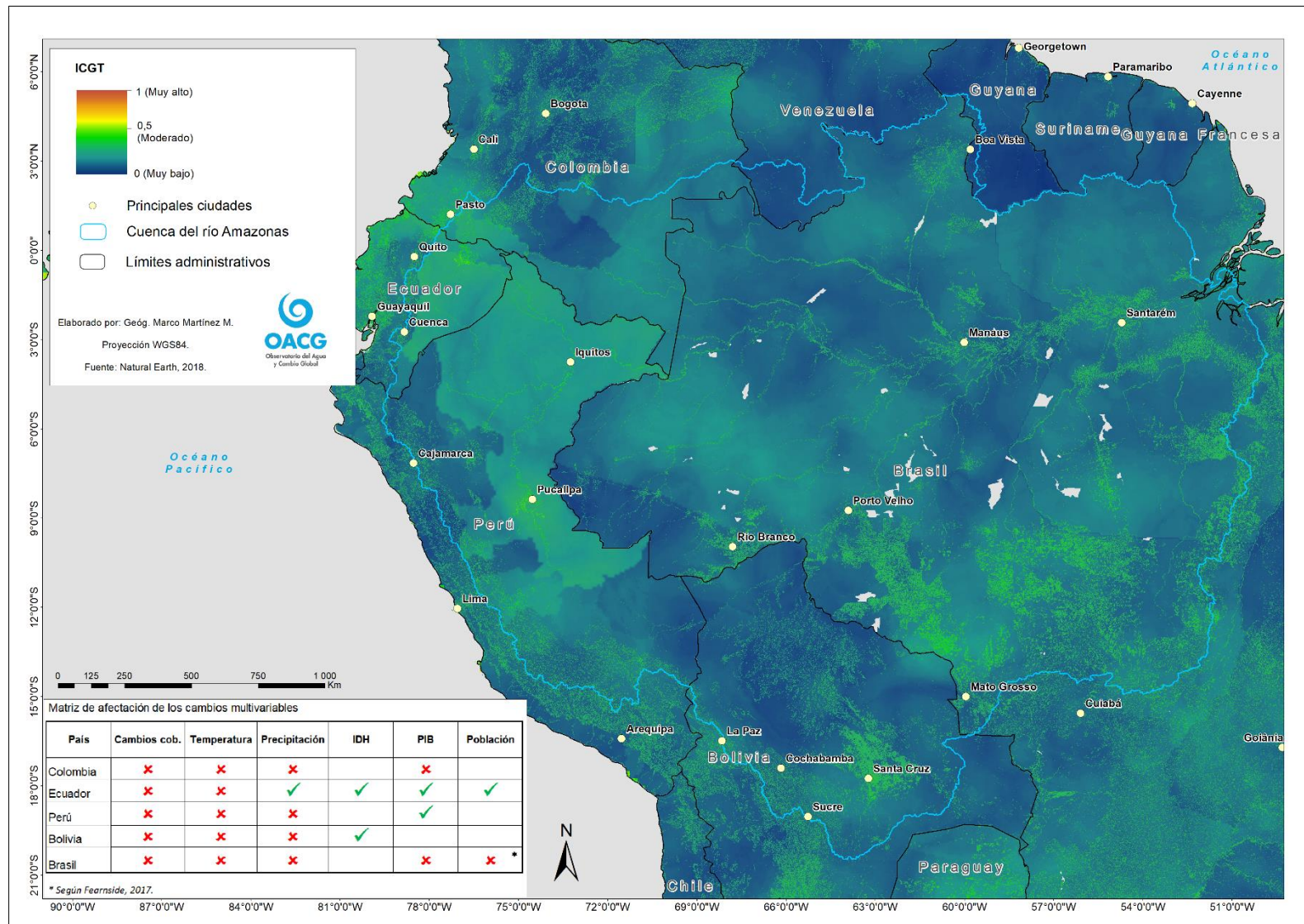


Figura 21. Índice de Cambio Global para la cuenca del río Amazonas y matriz de cambios multivariados.

Pacheco *et al.* (2021) describe que los frentes más importantes de deforestación en la cuenca se manifiestan en el norte (el parche más grande) y sur de R.D. del Congo, el otro entre Gabón y Congo, y por último en Zambia. La pérdida de bosque en el Congo, entre los años 2000-2005 fue mucho menor entre las otras regiones del trópico, presentando una disminución de 5,4%, comparado con Indonesia con 12,8% y Amazonas con 47,8% (Hansen *et al.*, 2008). A pesar de ello, el cambio de uso de la tierra y la deforestación son causas que generan un nivel de problemática ambiental y social en la cuenca africana.

El principal impulsor de la deforestación es la agricultura a pequeña escala y de subsistencia con modalidades tecnológicas poco modernas, no obstante, abren paso entre el bosque húmedo para también extraer material maderero y convertirlo en carbón leña para las actividades domésticas y económicas (Tchatchou *et al.*, 2015; Pacheco *et al.*, 2021). Con lo anterior, existe el aumento en la presión forestal por la extracción de minerales, el desarrollo de carreteras, la agroindustria y los biocombustibles (Hansen *et al.*, 2008).

Climáticamente, se observan algunos focos de mayor tendencia de disminución de la precipitación, puntualmente en Congo y en otro entre la frontera noreste de Zambia con R.D. del Congo, y con mayores áreas de tendencia al moderado aumento de la precipitación, ubicándose entre casi todo el límite norte de la cuenca hasta unirse con la sección baja y la desembocadura. La temperatura por su parte, coincide, prácticamente, las zonas de tendencia al aumento con los focos de disminución de la precipitación, y sólo en la parte noroeste de la cuenca se observa una moderada tendencia al aumento pluvial.

Con estas leves tendencias de cambio, a nivel general de la cuenca, pueden llegar a cumplir lo planteado por Ludwig *et al.* (2013) que los cambios en los patrones de temperatura y lluvia tienen el potencial hacer que el bosque húmedo se expanda más hacia el norte y el sur, motivando que la captura de carbono del ecosistema puede aumentar, lo que en sí mismo es un efecto potencialmente positivo del cambio climático. Del mismo modo, van Garderen & Ludwig (2013) acotan que el flujo del agua de la cuenca del Congo no disminuirá, y que se volverán más dinámicos los causes entre los periodos de sequía y precipitaciones irregulares.

Los buenos términos ambientales de la cuenca no van en el mismo sentido con el sistema económico y político de los países que la conforman. Según datos del Banco Mundial

(2021), el promedio del PIB entre los territorios es de US\$ 1.787.602 para el 2015, con una gran desigualdad relativa entre los mismos países, ya que Angola presentó US\$ 4.166.98 y República Democrática del Congo US\$ 497.137 para el mismo año. No obstante, República Democrática del Congo fue el único país del trópico en presentar la tendencia más alta de aumento del PIB entre 1992-2015. Respecto al IDH, todos los países, excepto República Centroafricana y Camerún, contaron con un valor moderado en la tendencia de aumento, sin embargo, a nivel mundial, la República Centroafricana es el segundo país peor calificado en el IDH del 2015. Todos los países que conforman la cuenca están clasificados dentro del Desarrollo Humano bajo.

La concentración de población de la cuenca se ubica, en su mayoría, en las principales ciudades de los países que la conforman, siendo República Democrática del Congo el territorio donde se observa que ha aumentado más la población, cerca de 40 millones de personas entre 1992 y 2015 (Banco Mundial, 2021), y el 34% de total es población rural. Las poblaciones están distribuidas de manera desigual entre las ciudades y el campo (Tchatchou *et al.*, 2015). No obstante, la mayor presión por acceso a recursos productivos es ejercido por agricultores rurales y pequeños productores.

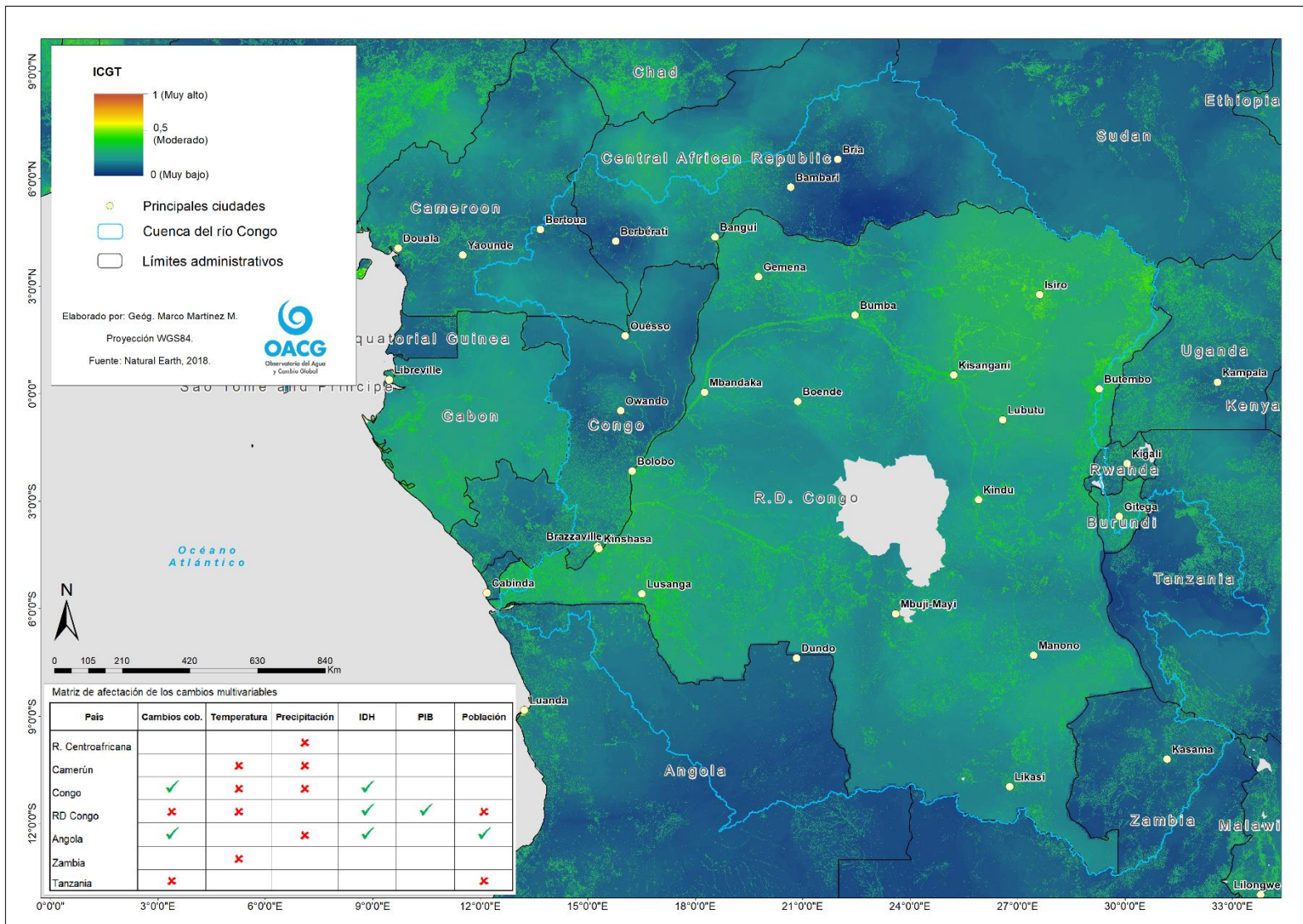


Figura 22. Índice de Cambio Global para la cuenca del río Congo y matriz de cambios multivariables.

5.1.4. Indonesia

En este territorio insular se presentan los valores más altos en varias de sus islas, siendo el máximo valor de 0,85 el más común en las Islas Rau, Bangka-Belitung, Pulau Muna, Pulau Buton, Pulau Obi, y las del archipiélago del Mar de Banda, por ejemplo. Una pequeña sección al oeste de Borneo es donde se encuentran los valores cercanos a 0. De la región asiática tropical, Indonesia es donde se encuentran los valores de cambio global más altos.

Esta es una de las regiones donde existe una alta deforestación de los bosques tropicales, azotando principalmente las islas de Sumatra y Borneo. En 2012, el bosque total perdido en Indonesia fue de 0,84 millones de ha, superando a Brasil, que ha perdido 0,46 millones de ha para ese año (Margono, *et al.*, 2012). Con base a los datos obtenidos, se concuerda con Margono, *et al.* (2012) en los frentes de deforestación en la región oeste de Sumatra, y el este de Borneo, donde se eliminaron áreas de humedales y bosques húmedos de tierras bajas, principalmente, ocasionando un enorme daño ambiental local y regional.

Como en los otros territorios tropicales, en Indonesia convergen diversos factores que motivan la alta deforestación, donde Austin *et al.* (2018) describen los principales:

- Aumento de las plantaciones de palma aceitera ante una demanda internacional por parte de las empresas industriales. A medida que aumenta el precio del aceite de palma crudo, hay más incentivos estatales para deforestar más tierras en Indonesia (Eldeeb *et al.*, 2015)
- Las plantaciones de madera y cultivos variados a gran escala.
- Conversión de bosques a pastizales o matorrales, mediados en algunos casos por incendios forestales ocasionados por los locales o agricultores de pequeña escala.
- Agricultura de pequeña escala con cultivos mixtos.
- Apertura de caminos para instaurar la tala o áreas cultivables.
- En menor medida, la minería y establecimientos de estanques peseros.

Eldeeb *et al.* (2015) mencionan que actos de corrupción por parte de funcionarios públicos de ejercicio ambiental para contribuir con enriquecimientos ilícitos, favorecen el aumento de la deforestación entre el 2000 y 2015, asociándose con la silvicultura, las plantaciones y la minería, potenciando miles de millones de dólares en pérdidas presupuestarias cada año en Indonesia. Por otra parte, existe una política de nacional de migración para repoblar las

diversas islas de indonesias, con el fin de desatorar la alta densidad poblacional en Java y aprovechar áreas rurales y otras áreas aprovechables para la producción, motivando a los nuevos pobladores con incentivos y paquetes de asentamientos (Darmawan *et al.*, 2016).

Los resultados muestran una deforestación diferenciada cada una de las islas, así como en la variación de sus factores impulsores. Austin *et al.* (2018) puntualizan que en las islas Sulawesi, Java y Nusa Tenggara, el mayor contribuyente fue la agricultura a pequeña escala; en Papúa encabeza la apertura de caminos para tala y asentamientos, seguido de áreas con palma aceitera y cultivos de gran escala; en Borneo destaca el cultivo de la palma y pastizales/matorrales; para Sumatra, con un perfil más variado respecto a las demás islas, aportan casi de la misma forma los cultivos de palma aceitera y plantaciones madereras, seguido de pastizales/matorrales y agricultura de pequeña escala.

La conversión de los bosques, la explotación de las tierras y la degradación ambiental en Indonesia impulsa el aumento de emisión de gases de efecto invernadero. Según las tendencias de cambio para el clima, las islas más pequeñas son las que muestran un aumento más intenso de la temperatura, así como de forma moderada, la sección sureste de Sumatra, el oeste de Borneo y a franja central de Papúa. Sólo en la sección noroeste de Sumatra se presenta un foco de disminución más intenso de la temperatura. Para la precipitación, es en las islas más pequeñas donde existe una tendencia de mayor aumento de cambio, disminuyendo en gran parte de Borneo, Papúa y el centro de Sumatra.

Measey (2010) afirma que los incendios forestales y la alta deforestación son los principales factores que vulnerabiliza a Indonesia ante el cambio climático, siendo para el año 2010 el tercer país con mayores emisiones a nivel global, y el más emisor en el trópico. A su vez detalla que, la deforestación y la conversión de bosques es el agente que más gases de efecto invernadero emite, aportando en 75% del total de emisiones, seguido en menor medida la agricultura y extracción energética. Aproximadamente 24 mil millones de toneladas de existencias de carbono (BtC) se almacenan en la vegetación y el suelo, y el 80% se almacena en los bosques (Banco Mundial, 2010).

Económicamente, indonesia ha mostrado ser un país con un crecimiento importante en las últimas décadas, convirtiéndose en la cuarta economía más poderosa de este Asia y la décimo quinta del mundo (Elias & Noone, 2011). La tendencia de cambio indica que, en

cuanto al PIB, ha crecido de forma moderada en todo su territorio, al igual que en el IDH. En su estructura económica, para el año 2015 la agricultura representó el 15% del PIB, por debajo de la industria energética con 30,6% y sector servicios con 55% (Maqin & Sidharta, 2017). Elias & Noone (2011) argumentan que el aporte de la actividad agrícola es diferencias por isla, y que donde se concentran las urbes más importantes, como Yakarta, es donde sopesa la mayor actividad de servicios y la de mayor efecto en el PIB. Añaden, además, que para el 200 Indonesia era el según país en Asia del este que más empleo generó en el sector agrícola, por debajo de Tailandia.

Finalmente, el crecimiento poblacional se ve reflejado con gran notoriedad en casi toda la isla Java, con mayor aumento en las cercanías de Yakarta. Indonesia es el cuarto país más poblado del mundo con, que tan solo en 23 años, aumentó en poco más de 70 millones de personas (Banco Mundial, 2021). Java es la isla con mayor población del mundo, albergando cerca del 50% del total de población (Darmawan *et al.*, 2016) y con relación a los resultados obtenidos, se afirma que es Java donde se presentó el mayor aumento de la cobertura urbana con un 39% respecto a 1992.

A pesar de que el aumento poblacional no es un factor directo que impulsa la deforestación y cambio de cobertura, Lambin & Geist (2002) y Austin *et al.* (2010) indican que funciona como un factor subyacente al cambio, así como el nivel de ingresos, demanda del mercado internacional y la aplicación de la ley, y que el crecimiento de la población ha ejercido presión sobre el medio ambiente, sobre todo con las migraciones hacia otras islas (Darmawan *et al.*, 2016).

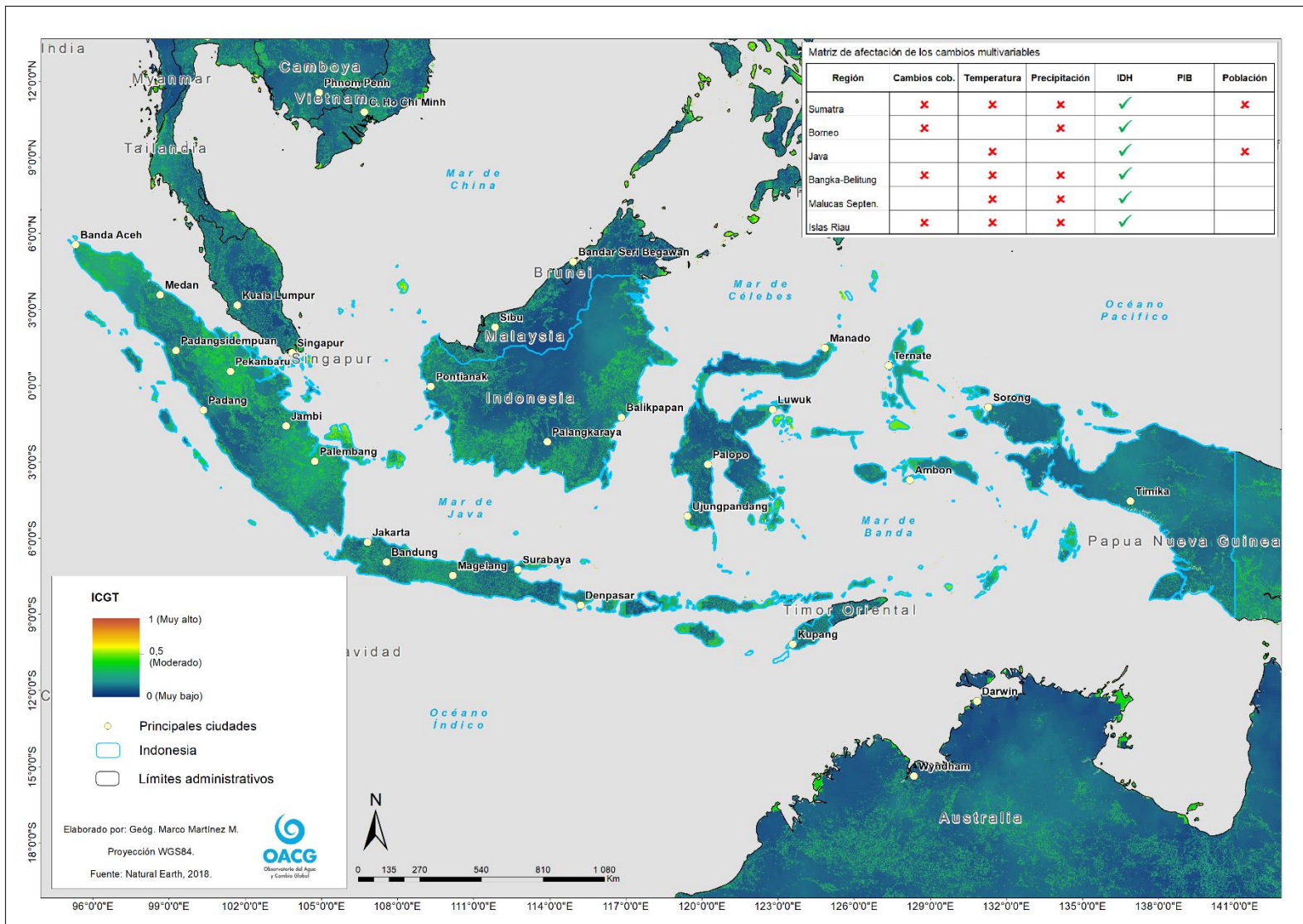


Figura 23. Índice de Cambio Global para Indonesia y matriz de cambios multivariables.

6. Conclusiones

Realizar estudios y análisis multivariables, con herramientas geoespaciales y fundamentación de aportes científicos, permiten recrear un escenario complejo y dinámico que sucede en el territorio, con cambios espaciales notables y materializados, como la deforestación y cambio de cobertura, pero también reconoce el aporte que despliegan los sistemas sociales y climáticos. Al ser el área de estudio de escala global, con diversas sinergias ambientales, sociales y políticas, caracterizar el cambio global con base a datos de repositorios científicos y académicos es una ventaja significativa que debe considerarse valiosa.

Con base a las observaciones e investigación realizada, así como los resultados obtenidos, es plausible reafirmar que el cambio global en el trópico es complejo y multi-causal, donde actores externos a la región ejercen presiones sociales, políticas y económicas que causan cambios en territorios distintos del origen de la energía. Por lo tanto, se concluye que:

- Las áreas de conversión de bosque hacia pastos fueron las más dominantes en el trópico, correspondiendo el 73% del total de los bosques deforestados, mientras que el 24% en áreas de cultivo. La cuenca del río Congo presentó un 4% menos de área boscosa entre los años 1993 y 2015, presentando la menor deforestación entre las regiones analizadas, mientras que Centroamérica tiene el valor más alto con un 13%.
- La caracterización y análisis del cambio global basado desde un enfoque de causa-efecto, permitió detallar con mayor profundidad sobre la injerencia de los actores sociales y económicos sobre el sistema ambiental.
- El principal impulsor o fuerza motriz en el cambio de bosques hacia áreas de cultivo y pastos en el trópico, generalmente, es el comercio internacional y la creciente demanda de productos cárnicos y derivados, así como de granos, aceite industrial, azúcar, entre otros.
- La deforestación en el trópico es causada primariamente por la ganadería extensiva, y específicamente de manera ilícita en Centroamérica y Amazonas, así como por la

migración e instauración de pequeños y medianos agroproductores en los bordes de los bosques húmedos, y por la expansión de monocultivos de soja, palma, caña de azúcar y plantaciones madereras.

- Subyacen causas con mayor notoriedad para el cambio de uso de la tierra y deforestación tropical, tal como la poca voluntad política para generar óptimas políticas para la conservación del ambiente y bosques protegidos, como actualmente sucede en Amazonas. Además, el crecimiento y el repunte global de nuevas tecnologías aplicadas a lo agropecuario, así como el uso exponencial de agroquímicos favorecen la expansión de áreas deforestadas convertidas en ganadería y cultivos. Por otra parte, la apertura de caminos entre áreas boscosas es un determinante espacial en todas las regiones analizadas que contribuye a la deforestación.
- El ICGT muestra la vulnerabilidad que presentan los principales bosques húmedos del trópico, ya que, en las cuencas de Amazonas y Congo, así como la región insular asiática, demuestran una relación espacial con valores moderados del índice donde además se visualiza la presión del cambio de uso de la tierra y la deforestación.
- El ICGT cumple con el objetivo de mostrar espacialmente la intensidad y magnitud del cambio, ya que muestra efectivamente las zonas donde las diversas variables sociales y ambientales han materializado cambios durante 23 años.
- El análisis del cambio global refirma mediante el índice, la vulnerabilidad social y ambiental en Centroamérica, donde los factores que más efecto negativo causaron dentro del cambio global fueron el cambio de cobertura de la tierra y la deforestación para conversión hacia cultivos y pasturas ganaderas, el aumento de la temperatura y el crecimiento poblacional. Específicamente, los países con los cambios más altos y perjudiciales entre sus sistemas fueron, en primer lugar, Guatemala, seguido de Honduras, El Salvador y Nicaragua.
- Los territorios insulares son los que presentan los valores más altos del ICGT, imponiendo más peso en el modelo los datos de clima con tendencia de cambio altos. Las Antillas Menores son los territorios Nación más con valor ICGT más alto

en todo el trópico, el 55% de ellos tienen un rango promedio de 0,5 – 0,85, no obstante, todas islas tienen al menos en una zona de su territorio el valor de 0,85.

- En Amazonas la evidente deforestación fue el mayor efecto causado por la presión de la demanda internacional de productos alimenticios, corrupción y políticas públicas debilitadas para el favorecimiento de la tala y conversión de la cobertura. Además, los cambios en la temperatura y la precipitación son factores que indican efectos negativos entre los rangos de 0,30 – 0,45. Brasil es el país en el que convergen más los factores de cambio global, sumando a los antes mencionados, el crecimiento poblacional y las migraciones hacia zonas fronterizas del bosque húmedo del Amazonas. Por su parte, en Colombia y Bolivia los efectos de cobertura y clima son perjudiciales para la cuenca.
- La República Democrática del Congo es el país dentro de la cuenca del Congo, que más afectación por tendencias de cambio en el clima presenta, siendo por su parte la tendencia del aumento de la temperatura y los cambios irregulares en el patrón lluvioso, las variables que más connotación negativa aporta a la dinámica de cambio global.
- En Indonesia, a nivel general, el factor más determinante en el análisis de cambio global y su injerencia en el índice es la deforestación y el aumento de áreas para cultivos de palma aceitera, así como la disminución de la precipitación en gran parte de las islas y la tendencia de cambio con patrones diferenciados en la temperatura. Las islas de menor tamaño son las que presentan valores climáticos negativos (tendencia de cambio cercano a 1) y un ICGT más alto en todo el territorio, con un rango promedio de 0,60 – 0,85. En Java particularmente se concentra el 50% del total de población, siendo la isla más poblada de Indonesia, lo que se afirma que el crecimiento poblacional tan alto ejerce un peso diferenciado respecto a las otras islas, excepto Sumatra que también presenta un aumento poblacional importante.
- Se comprende que en promedio la región tropical tiene un IDH bajo (0,58), no obstante, con base a las regiones analizadas, el 64% tienen un aporte positivo del IDH, y el 36% restante no tuvo un aporte significativo en el índice, siendo entonces

una variable que no representa nivel de afectación dentro del cambio global, al menos para este estudio.

- Los factores que más aportes negativos han mostrado en el ICGT para las regiones analizadas son la tendencia del aumento de la temperatura, la variación diferenciada en los patrones de la tendencia de cambio de la precipitación y el cambio de cobertura, específicamente con la deforestación y el avance de la frontera agrícola.
- Se vislumbra como desafío el análisis multivariable para una escala global y la disponibilidad espacio-temporal de los datos geoespaciales para caracterizar y analizar el cambio global en el trópico. Es decir, se debe trabajar con datos que ayuden a reflejar las dinámicas socioeconómicas y ambientales de un territorio, no obstante, no es viable obtener datos de carácter político o de flujos económicos globales, por ejemplo, que fundamenten de una mejor forma el cambio global y la interacción multiescalar.
- Para sustentar un estudio sobre cambio global, deben obtenerse series de tiempo anualmente continuas, que permitan sustentar con solidez los modelos para el análisis de cambios. Con ello, se reveló como limitante, según los datos disponibles de los repositorios globales, series de datos poco continuas y con un rango temporal anual amplio, tal es el caso de la variable de población, que motivó a cuantificarla mediante la variación poblacional entre el año 1992 y 2015, y no obtener el valor tau como las otras variables (excepto uso de la tierra por su naturaleza del dato).
- Según la metodología empleada, basada en herramientas geoespaciales, análisis estadístico-matemático y fundamentación en fuentes bibliográficas, se logró solventar la heterogeneidad de los datos disponibles, sus formatos de archivo, así como la resolución espacial y temporal. Fue diseñada para lograr compaginar de la mejor manera, diversos datos con distintas unidades de medida, que, a la hora del modelado y cuantificación, estos tuvieran la misma resolución espacial y métrica comparativa.

7. Referencias bibliográficas

1. Alves, D et al. 2009. *The Changing Rates and Patterns of Deforestation and Land Use in Brazilian Amazonia*. Keller, M; Bustamante, M; Gash, J; Silva Dias, P. *Amazonia and Global Change*. American Geophysical Union. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/245263327_The_Changing_Rates_and_Patterns_of_Deforestation_and_Land_Use_in_Brazilian_Amazonia.
2. Andrés, N et al. (2010). Distribución del permafrost e intensidad de los procesos periglaciares en el estratovolcán Iztaccíhuatl (México). *Ería*, 83: 291-310. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3427681.pdf>
3. Ardila, J, et al. (2021). *Latin American and Caribbean Forests in the 2020s: Trends, Challenges, and Opportunities*. Inter-American Development Bank. Disponible en: <https://publications.iadb.org/en/latin-american-and-caribbean-forests-2020s-trends-challenges-and-opportunities>
4. Asner, G et al. (2009). *A Contemporary Assessment of Change in Humid Tropical Forests*. *Conservation Biology*, 23(6): 1386–1395. Disponible en: https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/18690/stri_Asner_et_al_Debate_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y
5. Austin, K et al. (2019). *What causes deforestation in Indonesia?* *Environ. Res. Lett.* 14 (2), 024007. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329461637_What_causes_deforestation_in_Indonesia
6. Badger, A.M; Dirmayer, P.A. (2015). *Climate response to Amazon forest replacement by heterogeneous crop cover*. *Hidrology and Earth System Sciences*, 19: 4547–4557. Disponible en: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/4547/2015/hess-19-4547-2015.pdf>

7. Balasubramanian, A. (2013). *Desert ecology*. Centre for Advanced Studies in Earth Science, University of Mysore, Mysore. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/314933544_DESERT_ECOLOGY

8. Banco Mundial. (2010). Indonesia: Climate Change. Banco Mundial, Washinton DC. Disponible en: <http://go.worldbank.org/HQQFW5MV70>

9. Banco Mundial. (2021). World Bank Open Data. Disponible en: <https://data.worldbank.org/>

10. Brown, S et al. (2007). *Baselines for land-use change in the tropics: application to avoided deforestation projects*. Mitig Adapt Strat Glob Change 12: 1001–1026. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-006-9062-5>

11. Boeglin, N. (2010). Nivel de cumplimiento de decisiones judiciales en materia ambiental relativas a la protección del recurso hídrico. Decimosexto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Programa Estado de la Nación. San José, Costa Rica. Disponible en: <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/463>

12. Broxton, P.D et al. (2014). *A Global Land Cover Climatology Using MODIS Data*. American Meteorological Society, Volumen 53. Disponible en: https://landcover.usgs.gov/global_climatology.php

13. Caballero, M et al. (2007). Efecto invernadero calentamiento global y cambio climático. Revista Digital Universitaria, 8(10). Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>

14. Cardoso, JM; Bates, JM. (2002). *Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A tropical Savanna hotspot*. BioScience 52(3): 225-233. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/289527700_Biogeographic_patterns_and_conservation_in_the_South_American_Cerrado_A_tropical_Savanna_hotspot

15. Carlson, A, et al. (2018). *Toward Rigorous Telecoupling Causal Attribution: A Systematic Review and Typology*. Sustainability, 10(12), 4426. <https://doi.org/10.3390/su10124426>

16. Carr, D. (2004). Factores demográficos proximales y deforestación en las fronteras agrícolas tropicales. Population and Environment, 25(6). Disponible en: https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1516/Anexo%20I_Traducci%C3%B3n.pdf?sequence=1

17. Carr, D; Suter, L; Barbieri, A. (2005). *Population Dynamics and Tropical Deforestation: State of the Debate and Conceptual Challenges*. Population and Environment, 27(1). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2723823/>

18. Carter, R.W. (2014). *Global Change and Human Impact Challenges in Managing Iconic National Parks*. The George Wright Forum, 31(3): 245–255. Disponible en: <http://www.georgewright.org/313carter.pdf>

19. Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. 2017. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Count, Revision 10. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Disponible en: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-count-rev10>

20. Cerri, C. (2007). *Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options*. Scientia Agricola 64(1): 83-99. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/216810545_Tropical_agriculture_and_global_warming_Impacts_and_mitigation_options

21. Cifuentes, M. (2010). ABC del cambio climático en Mesoamérica. Serie técnica, Informe técnico No. 383. 1era ed. Turrialba, C.R: CATIE. Disponible en: <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8371?show=ful>

22. Chuvieco, E. (2002) Teledetección Ambiental. Editorial Ariel. Barcelona, España.

23. Chuvieco, E, (s/f). Teledetección, SIG y Cambio Global. Universidad de Alcalá de Henares, España. Disponible en: <http://ifc.dpz.es/recursos/publicaciones/15/48/05chuvieco.pdf>.

24. Corlett, R; Primack, R. (2008). *Tropical Rainforest Conservation: A Global Perspective*. Tropical Forest Community Ecology, cap. 26. Blackwell Science. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265158410_Tropical_Rainforest_Conservation_A_Global_Perspective

25. Corlett R; Primack R (2011) Tropical rain forests: an ecological and biogeographical comparison, 2nd edn. Wiley, Chichester.

26. Crutzen, P; Stoermer, E. (2000). *The "Anthropocene"*. Global Change News Letter, No. 41. Disponible en: <http://www.igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/1376383088452/NL41.pdf>

27. Dalal-Clayton, B; Bass, J. (Comp). (2002). Sustainable Development Strategies: A Resource Book. The International Institute for Environment and Development.

28. Darmawan, R et al. (2016). *Migration and deforestation in Indonesia*. Report. EFForTS Discussion Paper Series No. 19. Disponible en: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/130249/1/848529499.pdf>

29. De la Peña, R; Hughes, J. (2014). *The Impact of Climate Change on Tropical Agriculture*. SAT eJournal, 4(1). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/239528240_The_Impact_of_Climate_Change_on_Tropical_Agriculture

30. De la Torre, J. (2016). La Huella Ecológica: un indicador de sostenibilidad para las actividades humanas. Indes, 2(1): 9-18. Disponible en: <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDES/article/view/58/174>

31. Deb, J *et al.* (2018). *Climate change impacts on tropical forests: Identifying risks for tropical Asia*. Journal of Tropical Forest Science 30(2): 182-194. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/324758232_Climate_change_impacts_on_tropical_forests_Identifying_risks_for_tropical_Asia

32. DeFries, R *et al.* (2010). *Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century*. Nature Geoscience, 3, 178–181. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/ngeo756>

33. Department of Economic and Social Affairs. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision*. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Disponible en: <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>

34. Dietz, T *et al.* (2007). *Driving the human ecological footprint*. Front Ecol Environ; 5(1): 13–18. Disponible en: <http://sciences.ucf.edu/biology/king/wp-content/uploads/sites/106/2011/08/Dietz-et-al-2007.pdf>

35. Di Gregorio, A., Jansen, L.J.M. (2000). *Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia. Disponible en: http://www.fao.org/3/x0596e/X0596e00.htm#P-1_0

36. Duarte, C *et al.* (2006). *Cambio global: Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España. Disponible en: <http://www.lincg.uc-csic.es/wp-content/uploads/2012/12/Cambio-Global-Carlos-Duarte.pdf>.

37. Edelman, A *et al.* (2014). *State of the Tropics: 2014 Report*. James Cook University, Australia. Disponible en: <https://www.jcu.edu.au/state-of-the-tropics/publications/2014>.

38. Eldeeb, O et al. (2015). *Causes for deforestation in Indonesia: Corruption and palm tree plantation*. Asian Soc. Sci, 11, 120. Disponible en: <https://www.ccsenet.org/journal/index.php/ass/article/view/51344>

39. Elias, S; Noone, C (2011). *The Growth and Development of the Indonesian Economy*, RBA Bulletin, p 33-43. Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/rba/rbabul/dec2011-04.html>

40. Ellis, E et al. (2010). *Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000*. Global Ecology and Biogeography, 19, 589–606. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/227604905_Anthropogenic_Transformation_of_the_Biomes_1700_to_2000

41. Elmhagen, B et al. (2015). Implications of climate and land-use change for landscape processes, biodiversity, ecosystem services, and governance. *Ambio*, 44(1), 1–5. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4288998/>

42. Ehrlich, P. R. (1968). *The Population Bomb* (1.a ed.). Ballantine Book, 223 p. New York. Disponible en: <https://staff.washington.edu/jhannah/geog270aut07/readings/population/Ehrlich%20-%20Population%20Bomb%20Ch1.pdf>

43. Equihua-Zamora, M et al. (2015). Cambio global: el Antropoceno. *CIENCIA ergo-sum*, 23(1), 67-75. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/104/10444319008.pdf>

44. Falcón, O. (2014). Dinámica de cambio de uso/cobertura del suelo, en una región del Estado de Quintana Roo, México: El impacto de las políticas gubernamentales sobre el Manejo Forestal Comunitario. Tesis de grado. Universidad Autónoma de México. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2014/enero/0707773/0707773.pdf>.

45. Fearnside, P. (2017). Deforestation of the Brazilian Amazon. En: Shugart, H. (ed.) *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press, New York, USA. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/320407359_Deforestation_of_the_Brazilian_Amazonia

46. Fisher, P.F; Comber, A.J; Wadsworth, R. (2005). *Land use and land cover: contradiction or complement*. Re-presenting GIS, 85-98. Disponible en: https://www.academia.edu/14493546/Land_use_and_Land_cover_Contradiction_or_Complement

47. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2012). Global ecological zones for FAO forest reporting: 2010 Update. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/017/ap861e/ap861e00.pdf>

48. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales: términos y definiciones 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/I8661ES/i8661es.pdf>

49. Galvin, J. (2009). *Climate, flora and fauna*. In: J. Galvin, ed., The weather and climate of the tropics, Vol. 64, No. 4. Disponible en: http://www.metlink.org/wp-content/uploads/2013/11/articles/weather_tropics_9.pdf

50. Galli, A et al. (2014). *Ecological Footprint: implications for biodiversity*. Biological Conservation, 173, 121-132. Disponible en: https://www.academia.edu/20177817/Ecological_Footprint_Implications_for_biodiversity

51. Geist, H; Lambin, E. (2001). *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. LUCC Report Series; 4. Universidad de Louvain, Bélgica.

52. Geist, H; Lambin, E. (2002). *Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation*. BioScience, 52(2), pp.143–150.

53. Giam, X. (2017). *Global biodiversity loss from tropical deforestation*. PNAS 114 (23). Disponible en: <https://www.pnas.org/content/114/23/5775>

54. Giorgi, F. (2006). *Climate change hot-spots*. Geophysical Research Letters 33(L08707): 4 p. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2006GL025734>

55. Goldewijk, K; Ramankutty, N. (2014). *Land use changes during the past 300 years*. Land Use, Land Cover and Soil Sciences, Vol. I. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/242217587_Land_use_changes_during_the_past_300_years

56. Gottsberger, G; Silberbauer, I. (2009). *Tropical savannas: Introduction*. Tropical Biology and Conservation Management. Vol. X. Disponible en: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c20/e6-142-se-18.pdf>

57. Granados, J. (2006). *Tropical forest response to climate change*. Disponible en: http://www.dumac.org/dumac/habitat/esp/notas/notas_julio/Cambio_Climatico_Ingles.pdf

58. Grau, H; Aide, M. (2008). *Globalization and land-use transitions in Latin America*. Ecology and Society 13(2): 16. Disponible en: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art16/>

59. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Disponible en: https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WGI_TAR_full_report.pdf

60. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies, Japon. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf

61. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2004). *Appendix I: Glossary*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-app.pdf>
62. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
63. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Cambridge University Press. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>
64. Haines-Young, R. (2009). *Land use and biodiversity relationships*. Land Use Policy 26(178-186). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222517023_Haines-Young_R_Land_use_and_biodiversity_relationships_Land_Use_Policy
65. Hansen, M *et al.* (2008). Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 105(27): 9439–9444. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2453739/>
66. Hidalgo, H. (2021). *Climate Variability and Change in Central America: What Does It Mean for Water Managers?* *Frontiers in Water*, 2:632739. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348682675_Climate_Variability_and_Change_in_Central_America_What_Does_It_Mean_for_Water_Managers
67. Karmeshu, N. (2012). *Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test – A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States* (tesis de maestría). Department of Earth & Environmental Science, University of Pennsylvania.

68. Kashyap, A. (2007). *International Politics of Environment: Role and Responses of Amazon Countries*. India Quarterly 60.1/2: 250-274. Disponible en: https://www.academia.edu/3267214/International_Politics_of_Environment_Role_and_Responses_of_Amazonian_Countries
69. Klarin, T. (2018). The Concept of Sustainable Development: From its Beginning to the Contemporary Issues. Zagreb International Review of Economics & Business, 21(1): 67-94. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326164068_The_Concept_of_Sustainable_Development_From_its_Beginning_to_the_Contemporary_Issues
70. Lambin, E et al. (2003). *Dynamics of land use and land cover change in tropical regions*. Annual Review of Environment & Resources. 28: 205-41.
71. Lambin, E; Geist, H. (Eds.). (2006). *Land-use and Land-cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer, 222pp. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-32202-7>
72. Lambin, E; Meyfroidt, P. (2011). *Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity*. PNAS. 108(9): 3465–3472.
73. Lasco, R, (2008). *Tropical Forests and Climate Change Mitigation: The Global Potential and Cases from the Philippines*. Asian Journal of Agriculture and Development, 5(1). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/46536824_Tropical_Forests_and_Climate_Change_Mitigation_The_Global_Potential_and_Cases_from_the_Philippines
74. Leggett, T. (2007) Crimen y Desarrollo en Centroamérica. Atrapados en una encrucijada. Estudio de Mercados Ilícitos. Sección de Investigación y Análisis de la Oficina de las Naciones Unidas sobre Drogas y Crimen. Oficina contra la Droga y el Delito. Naciones Unidas. Disponible en: <http://www.unodc.org/documents/data-and-analysis/Central-america-study-es.pdf>

75. Lenzen, M et al. (2006). *On the bioproductivity and land-disturbance metrics of the Ecological Footprint*. Ecological Economics, 61(2007):6-10. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/On-the-bioproductivity-and-land-disturbance-metrics-Lenzen-Hansson/475ec49a33bca1c35575147a80fb74829d98a05e>
76. Liu, J., et al. (2013). *Framing Sustainability in a Telecoupled World*. Ecology and Society, 18(2). Disponible en: https://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss2/art26/#author_address
77. Liu, X et al. (2021). *Effect of economic growth on environmental quality: Evidence from tropical countries with different income levels*. Science of The Total Environment, 774 (145180). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33609847/>
78. López, P et al. (2007) Análisis de Tendencia en Series Autocorrelacionadas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266592331_ANALISIS_DE_TENDENCIA_EN_SERIES_AUTOCORRELACIONADAS/stats
79. López-Carr, D, et al. (2006). Agricultural change and limits to deforestation in Central America. En: Agriculture and climate beyond 2015, pp 91–107. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/226290667_Agricultural_change_and_limits_to_deforestation_in_Central_America/citations
80. López-Carr, D; Lopez, A. Bilsborrow (2009). *The population, agriculture, and environment nexus in Latin America: Country-level evidence from the latter half of the twentieth century*. Popul. Environ., 30, 222–246. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/225173248_The_population_agriculture_and_environment_nexus_in_Latin_America_Country-level_evidence_from_the_latter_half_of_the_twentieth_century/citations
81. López-Carr, D.; Burgdorfer, J. (2013) *Deforestation Drivers: Population, Migration, and Tropical Land Use, Environment*. Science and Policy for Sustainable Development, 55:1, 3-11. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00139157.2013.748385>

82. Ludwig, F et al. (2013). *Climate change impacts on the Congo Basin region*. En: Climate Change Scenarios for the Congo Basin. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Alemania. Disponible en: https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/csc-report11_optimized.pdf
83. Lugo, A. (2013). *Novel tropical forests: Nature's response to global change*. Tropical Conservation Science. Special Issue Vol. 6(3):325-337. Disponible en: www.tropicalconservationscience.org
84. Lugo, A et al. (1974). *Tropical Ecosystem Structure and Function*. Fragile Ecosystems pp 67-111. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-86763-7_3
85. Magrin, G, et al. (2014). *Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap27_FINAL.pdf
86. Malthus, T. (1798). *An Essay on the Principle of Population*. Londres. Disponible en: <http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf>
87. Manrique, F; Martínez, A; Ospina, J.M. (2007). Crecimiento poblacional y políticas públicas. Apuntes de Cenés. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=479548751009>
88. Marengo J et al. (2011) *Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems*. En: Bush M., Flenley J.,

Gosling W. (eds) Tropical Rainforest Responses to Climatic Change. Springer Praxis Books. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-05383-2_9#citeas

89. Marengo, J.; Souza, C. (2018). *Climate Change: Impacts and Scenarios for the Amazon*. University of São Paulo: São Paulo, Brasil. Disponible en: http://oamanhae hoje.com.br/assets/pdf/Report_Climate_Change_impacts_and_scenarios_for_the_Amazon.pdf

90. Margono B et al., (2014). Primary forest cover loss in Indonesia over 2000–2012. *Nature Climate Change*, 4(8), 730–735. Disponible en: <https://glad.umd.edu/dataset/primary-forest-cover-loss-indonesia-2000-2012>

91. Martínez, J. (2005). Percepción Remota: Fundamentos de Teledetección espacial. Comisión Nacional de Agua. México. Disponible en: <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>.

92. Martínez, M. (2018). Evaluación espacio-temporal del cambio global, del año 1973 hasta el año 2017, en el Departamento Sur de Haití (tesis de grado). Universidad de Costa Rica.

93. Mas, J et al. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/ uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*, 1, 23-39. Disponible en: http://www.ccmss.org.mx/descargas/La_evaluacion_de_los_cambios_de_cobertura-uso_de_suelo_en_la_Republica_Mexicana.pdf.

94. Maqin, R.A; Sidharta, I. (2017). *The Relationship of Economic Growth with Human Development and Electricity Consumption in Indonesia*. *International Journal of Energy Economics and Policy* 7(3):201-207. Disponible en: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/4720>

95. Mayaux, P et al. (2005). *Tropical Forest Cover Change in the 1990s and Options for Future Monitoring*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 360(1454): 373–384.

Disponibile en:
https://www.unboundmedicine.com/medline/citation/15814351/Tropical_forest_cover_change_in_the_1990s_and_options_for_future_monitoring_

96. Measey, M. (2010). Indonesia: A Vulnerable Country in the Face of Climate Change. *Global Majority E-Journal*, 1(1), pp. 31-45. Disponible en:
https://www.american.edu/cas/economics/ejournal/upload/measey_accessible.pdf

97. Megevand, C. (2013). *Deforestation Trends in the Congo Basin: Reconciling Economic Growth and Forest Protection*. World Bank. Disponible en:
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/175211468257358269/pdf/Deforestation-trends-in-the-Congo-Basin-reconciling-economic-growth-and-forest-protection.pdf>

98. Meyer, W; Turner, B. (2002). The Earth transformed: trends, trajectories and patterns. En: Johnston R; Taylor, P; Watts, M (eds). *Geographies of global change: Remapping the world*, 2nd ed. Blackwell, Oxford, pp 364-376.

99. Meyfroidt, P. (2015). *Approaches and terminology for causal analysis in land systems science*. *Journal of Land Use Science*. Disponible en:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1747423X.2015.1117530>

100. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books, 205 p. New York.

101. Meadows, M. (2006). *Global Change and Southern Africa*. *Geographical Research*. 44(2):135–145. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1745-5871.2006.00375.x>

102. Montiel, M. (2015). Uso de agroquímicos en la producción intensiva de piña en Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*. 15(25).

103. Muccione, V; Schaepman, M. (2014). Global Change: Terminology Brief Series. University Research Priority Program Global Change and Biodiversity, University of Zurich. Disponible en: https://www.gcb.uzh.ch/dam/jcr:ffffff-8f53-4fa0-0000-00002189557f/Terminology_Brief_Global_Change.pdf

104. Müller, M. (2004). *Generalized Linear Models*. Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics, Alemania. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228396785_Generalized_Linear_Models

105. Müller, R et al. (2012). *Proximate causes of deforestation in the Bolivian lowlands: an analysis of spatial dynamics*. Regional Environmental Change 12(3):445-459. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-011-0259-0>

106. Müller R et al. (2014). El contexto de la deforestación y degradación de los bosques en Bolivia: Causas, actores e instituciones. Documentos Ocasionales 100. CIFOR. Disponible en: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-100.pdf

107. Munroe, D et al. (2019). Governing flows in telecoupled land systems. Current Opinion in Environmental Sustainability, 38, 53-59. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333532519_Governing_flows_in_telecoupled_land_systems

108. National Research Council. (1999). *Human Dimensions of Global Environmental Change: Research Pathways for the Next Decade*. National Research Council (NRC). National Academy Press, Washington, DC.

109. Nobre, C et al. (2016). *Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm*. PNAS, 113 (39) 10759-10768. Disponible en: <https://www.pnas.org/content/113/39/10759>

110. Organización de las Naciones Unidas. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/139811>

111. Organización de las Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
112. Organización de las Naciones Unidas. (2020). The Sustainable Development Goals Report. Organización de las Naciones Unidas (ONU). Disponible en: <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2020-09/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020.pdf>
113. Osborne, P. (2000). *Tropical ecosystems and ecological concepts*. University Press, Cambridge.
114. Ozcáriz, J. (2008). La crisis y el Cambio Global. Ecosostenible, N°. 45, 4-14. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2749169>
115. Pacheco, P. (2004). *What lies behind decentralization? Forest, powers and actors in Lowland Bolivia*. European Journal of Development Research, 16, 90-109. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228974757_What_lies_behind_decentralisation_Forest_powers_and_actors_in_Lowland_Bolivia
116. Pacheco, P, et al. (2021). Frentes de deforestación: Causas y respuestas en un mundo cambiante. WWF, Switzerland. Disponible en: https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/frentes_de_deforestacion.pdf
117. Peng, X et al. Global land change from 1982 to 2016, Nature (2018). Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0411-9>
118. Peñuelas, J et al. (2017). *Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services*. Forests, 8, 463. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/097d/643554391a59729f101a5388759eb1af012d.pdf>

119. Pérez, R. (2021). Deforestation of the Brazilian Amazon Under Jair Bolsonaro's Reign: A Growing Ecological Disaster and How It May Be Reduced. Miami Inter-Am. L. Rev. 193. Disponible en: <https://repository.law.miami.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2609&context=umialr>
120. Pohlert, T. (2017). *The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package*. Vienna, Austria: R package.
121. Rindfuss, R. (2008). *Land use change: complexity and comparisons*. Land use change: complexity and comparisons, Journal of Land Use Science, 3:1, 1-10. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2846795/>
122. Rodrigues, S; Campos, G. (2009). *Geomorphology and Biogeography of Tropical Deserts*. Tropical Biology and Conservation Management. Vol. IX. Disponible en: <https://www.eolss.net/sample-chapters/C20/E6-142-DE-01.pdf>
123. Rosete, F *et al.* (2009). Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. Investigación ambiental 2009 1(1): 70-82. Tomado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n67/n67a4.pdf>.
124. Rounsevell, M. (2006). Global Environmental Change. En Geist, H (Ed), *Our Earth's Changing Land: An Encyclopedia of Land-Use and Land-Cover Change*, 254-256.
125. Rudolph, A, Figge, L. (2017). *Determinants of Ecological Footprints: What is the role of globalization?*. Ecological Indicators, 81, 348-361. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X17303369>
126. Schellnhuber, H *et al.* (1997). *Syndromes of Global Change*. Gaia, 6(1):19-34. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257933430_Syndromes_of_Global_Change

127. Scholes, R.J; Van Breemen, N. (1997). *The effects of global change on tropical ecosystems*. Geoderma, 79, 04. pp 9-24. Disponible en: <https://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/1634>
128. Sellers, P. J et al. (1995). *Remote Sensing of the Land Surface for Studies of Global Change: Models Algorithms Experiments*. Remote Sensing Enviroment, Vol. 51:3-26. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579400061Q>
129. Shukla, P.R. et al. (eds.) (2019). Technical Summary, 2019. En: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srccl/>
130. Slik J et al. (2015). *An estimate of the number of tropical tree species*. Proc Natl Acad Sci U S A 112:7472–7477. Disponible en: <https://www.pnas.org/content/112/24/7472>
131. Smith, T; Smith, R. (2007). Ecología. 6.a edición. Pearson Educación. Madrid. Disponible en: <https://www.academia.edu/30913575/Ecolog%C3%ADa.6ed.Smith.PDF>
132. Song, X et al. (2018). *Global land change from 1982 to 2016*. Nature, 560, 639–643. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0411-9>
133. State of the Tropics. (2014). *State of the Tropics 2014 Report*. James Cook University, Cairns, Australia. Disponible en: <https://www.jcu.edu.au/state-of-the-tropics/publications/2014>
134. State of the Tropics. (2020). *State of the Tropics 2020 Report*. James Cook University, Cairns, Australia. Disponible en: <https://www.jcu.edu.au/state-of-the-tropics/publications/state-of-the-tropics-2020-report>

135. Stern, P *et al.* (1992). *Global Environmental Change: Understanding the Human Dimensions*. National Academy Press, Washington, D.C. Disponible en: <https://www.nap.edu/catalog/1792/global-environmental-change-understanding-the-human-dimensions>
136. Stibig, H.J *et al.* (2014). *Change in tropical forest cover of Southeast Asia from 1990 to 2010*. Biogeosciences, 11, 247–258. Disponible en: <https://www.biogeosciences.net/11/247/2014/bg-11-247-2014.pdf>
137. Suárez-Álvarez, M *et al.* (2012). *Statistical approach to normalization of feature vectors and clustering of mixed datasets*. Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 468(2145), 2630-265. Disponible en: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2011.0704>
138. Taubert, F *et al.* (2018). *Global patterns of tropical forest fragmentation*. Nature, 554, 519–522. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature25508>
139. Tchatchou, B *et al.* (2015). *Deforestation and forest degradation in the Congo Basin: State of knowledge, current causes and perspectives*. Occasional Paper 144. CIFOR. Disponible en: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-144.pdf
140. The International Tropical Timber Organization. (2008). *Tropical forests and climate change*. The International Tropical Timber Organization (ITTO). Yokohama, Japón. Disponible en: <http://www.itto.int/tfu/id=1877>
141. Trewin, B. (2014) *The climates of the Tropics and how they are changing*. State of the Tropics. James Cook University. Australia. Disponible en: <https://www.jcu.edu.au/state-of-the-tropics/publications/2014/2014-essay-pdfs/Essay-1-Trewin.pdf>
142. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (1980) *World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos

Naturales (UICN). Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/wcs-004.pdf>

143. Useros, J.L. (2012). El Cambio Climático: sus causas y efectos medioambientales. Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid, Volumen 50. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4817473>

144. Val, A *et al.* (2006). Tropical Environment. The Physiology of Tropical Fishes: Vol. 21 Fish Physiology, Capítulo. 1. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/309653551_Tropical_Environment

145. van Garderen, L; Ludwig, F. (2013). *Climate change adaptation options for the Congo Basin countries*. En: Climate Change Scenarios for the Congo Basin. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11. Alemania. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/29223078.pdf>

146. Vargas, G. (2002). La Tropicalidad y el Análisis Geográfico. Revista Reflexiones, Vol. 81, Núm. 1. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11296>

147. Wackernagel, M; Rees, W. (1996) *Our Ecological Footprint: reducing human impact on the Earth*. Philadelphia, PA: New Society Publishers, 160 pp.

148. Walker, B. (1985). *Determinants of Tropical Savannas*. IUBS Monograph Series, No. 3. París, Francia. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Ernesto_Medina/publication/289704634_Determinants_of_Tropical_Savannas/links/57483cdc08ae707fe21fb815/Determinants-of-Tropical-Savannas.pdf?origin=publication_list

149. Woodbridge, M. (2015). From MDGs to SDGs: What are the Sustainable Development Goals? Iclei Briefing Sheet - Urban Issues, 1. Disponible en: <https://www.local2030.org/library/251/From-MDGs-to-SDGs-What-are-the-Sustainable-Development-Goals.pdf>

150. WWF. (2018). *Living Planet Report - 2018: Aiming Higher*. Grooten, M. and Almond, R.E.A.(Eds). WWF, Gland, Switzerland. Disponible en: <https://www.footprintnetwork.org/content/uploads/2018/10/LPR-2018-full-report.pdf>
151. Zamora, R et al. (2015). La huella del cambio global en Sierra Nevada: Retos para la conservación. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. 208 pp. Disponible en: http://refbase.iecolab.es/files/zamora/2015/3095_Zamora_et al2015.pdf.
152. Zhou, X et al. (2013). *An imperative need for global change research in tropical forests*. Tree Physiology 33, 903–912. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24128847>
153. Zuidema, P et al. (2013). Tropical forests and global change: filling knowledge gaps. Trends Plant Sci. 18, 413–419. Disponible en: [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(13\)00107-6?code=cell-site](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(13)00107-6?code=cell-site)
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=a3cb207855b348a297ab85261743351d>