

Impactos del cambio climático en la integridad funcional del Bosque nublado de la Sierra Maestra, Cuba

Impacts of climate change on the functional integrity of the Sierra Maestra cloud forest, Cuba

Euclides Fornaris Gómez^{1} (<https://orcid.org/0000-0001-6061-0765>), Orlando Joel Reyes*

Domínguez¹ (<https://orcid.org/0000-0001-7486-5508>), Luz Margarita Figueredo

Cardona² (<https://orcid.org/0000-0002-0834-6327>)

¹*Centro Oriental de Ecosistemas y Biodiversidad (Bioeco)/ Santiago de Cuba /Cuba);*

euclides.fg42@gmail.com

²*Agencia de Medio Ambiente (AMA); e-mail@e-mail.com*

**Correspondence: euclides.fg42@gmail.com; Tel.: +53 53213276*

DOI: 10.70373/RB/2024.09.03.7

Resumen

La alta diversidad florística y notable endemismo del Bosque nublado de la Sierra Maestra le confieren elevada importancia como sitio clave para la conservación. Su distribución espacial, las condiciones edafoclimáticas y su propio funcionamiento ecológico, lo convierte en un ecosistema muy frágil. El cambio climático contribuye a exacerbar su vulnerabilidad, pudiendo ocasionar migraciones de las principales especies y las afectaciones en su estructura y composición. En este trabajo se evalúan las posibles afectaciones del cambio climático sobre las áreas de idoneidad ecológica de este bosque y la incidencia sobre su funcionamiento ecológico. Se emplean dos modelos de circulación global: MIROC-ES2L y CanESM5-CanOE, dos escenarios climáticos: de mitigación ($2,6 \text{ W m}^{-2}$) y de alta emisión ($8,5 \text{ W m}^{-2}$), en dos horizontes temporales: 2060 y 2100. Según los análisis podría esperarse una notable reducción del área de idoneidad ecológica del Bosque nublado, estimándose las peores consecuencias ante un escenario de alta emisión para el 2100. El aumento de la temperatura tendrá un impacto negativo en su funcionamiento ecológico, afectando particularmente la estera radical embebida en matriz de humus presente en estos ecosistemas, siendo este uno de sus principales mecanismos adaptativos frente al déficit de materia orgánica que caracterizan los suelos que los sustentan.

Palabras clave: escenarios climáticos, funcionamiento ecológico, estera radical, matriz de humus, escenario de mitigación, escenario de alta emisión

Abstract

The high floristic diversity and remarkable endemism of the Sierra Maestra cloud forest make it a key site for conservation. Its spatial distribution, the edaphoclimatic conditions, and its own ecological functioning make it a very fragile ecosystem. Climate change contributes to exacerbating its vulnerability, which could cause migrations of the main species and affect its structure and composition. This study evaluates the possible effects of climate change on the areas of ecological suitability of this forest and the impact on its ecological functioning. Two global circulation models are used: MIROC-ES2L and CanESM5-CanOE, two climate scenarios: mitigation (2.6 W m^{-2}) and high emission (8.5 W m^{-2}), in two time horizons: 2060 and 2100. According to the analyses, a notable reduction in the area of ecological suitability of the Cloud Forest could be expected, with the worst consequences being estimated for a high emission scenario by 2100. The increase in temperature will have a negative impact on its ecological functioning, particularly affecting the root mat embedded in the humus matrix present in these ecosystems, this being one of its main adaptive mechanisms to the organic matter deficit that characterizes the soils that support them.

Key words: climate scenarios, ecological functioning, ecological suitability areas, root mat, humus matrix, mitigation scenario, high-emission scenario

Introducción

Las actividades humanas, intensificadas en el último siglo, han impulsado un aumento sin precedentes de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, lo que ha derivado en un notable ascenso de la temperatura media global. Diversas instituciones internacionales especializadas en la modelización climática¹ han desarrollado proyecciones para las próximas décadas que contemplan diferentes escenarios en función del esfuerzo de mitigación de las emisiones por parte de los gobiernos. El escenario más favorable se caracterizaría por un compromiso global para reducir la concentración de GEI, mientras que el escenario más crítico se vería condicionado por la inacción de los principales emisores, perpetuando la tendencia actual de calentamiento².

El aumento de la temperatura media anual y la alteración de los patrones de precipitación a diferentes latitudes se encuentran entre las principales preocupaciones de los expertos en el ámbito del cambio climático³. Se pronostica un aumento en las precipitaciones en latitudes altas, mientras que se espera una disminución en las regiones tropicales, lo que intensificará las precipitaciones e inundaciones en algunas zonas y provocará sequías severas en otras. Las temperaturas experimentarán un aumento progresivo, con estimaciones que podrían superar los 5°C para finales del siglo actual^{4,5}. Entre los ecosistemas terrestres más vulnerables se ubican los bosques húmedos de alta altitud, como los del macizo Sierra Maestra en Cuba.

La variedad de condiciones ecológicas presentes en el macizo, producto de sus características geológicas, geomorfológicas, edáficas y climatológicas⁶, genera la existencia de ecotopos únicos⁷ y lo convierte en uno de los mayores centros de endemismo y diversidad biótica de todo el archipiélago cubano⁸. Entre sus ecosistemas, destacan las diversas comunidades vegetales que han evolucionado hasta constituir expresiones únicas. La complejidad estructural de sus bosques, en su mayoría, y los procesos ecológicos que rigen su funcionamiento los hacen altamente sensibles a las condiciones naturales presentes. Los cambios de uso del suelo, las prácticas agrícolas y silviculturales inadecuadas, la pobreza de los suelos y las fuertes pendientes han favorecido procesos de degradación con repercusiones negativas en todos los ecosistemas. El cambio climático, a su vez, exacerba esta degradación.

Las investigaciones sobre los impactos del cambio climático en los ecosistemas terrestres son de gran relevancia, considerando que la mayoría de estos ya se encuentran alterados y solo un pequeño porcentaje conserva sus condiciones originales^{9,10,11}. Los cambios climáticos previstos, tanto graduales (aumento de la temperatura, elevación del nivel medio del mar), como extremos (tormentas, huracanes, sequías), suponen un desafío para silvicultores y ecólogos^{12,13,14}. En el contexto cubano, a pesar de la necesidad imperante de profundizar en esta temática, los estudios que abordan el impacto del cambio climático sobre las formaciones vegetales, especies o grupos de especies aún son escasos^{15,16}.

El presente estudio evalúa el impacto del cambio climático sobre el Bosque nublado (Bn), un ecosistema singular que se extiende por encima de los 1 400 m s.n.m. hasta la cima del macizo Sierra Maestra (1972 m s.n.m.). A partir de los requerimientos ecológicos del sitio donde se distribuye (áreas de idoneidad ecológica), su estado actual de conservación y su funcionamiento ecológico, se analizan los posibles cambios en su distribución espacial, frente al aumento de la temperatura media anual y las variaciones en los regímenes de precipitación. Para ello, se utilizarán dos modelos de circulación global¹⁷ para proyectar dos escenarios futuros del cambio climático, en dos horizontes temporales: 2060 y 2100. La información generada permitirá comprender mejor las posibles consecuencias del cambio climático sobre este ecosistema vulnerable y contribuir a la toma de decisiones para su manejo y conservación.

Materiales y Métodos

Distribución del Bosque nublado en la Sierra Maestra

La distribución del Bn en la Sierra Maestra se determina a partir de imágenes Sentinel-2 del año 2018, con una resolución espacial de 10 m en el espectro visible. Se implementan técnicas de teledetección

para generar índices de vegetación y compararlos con clasificaciones supervisadas y no supervisadas. Se consideran variables adicionales a partir de mapas base, como precipitación, temperatura, altitud, litología, exposición de la ladera y uso del suelo. La integración de estos datos, junto con la información cartográfica a escala 1:25 000 (altimetría, litología, hojas cartográficas, ordenación forestal), permite la elaboración de un mapa a esta misma escala con la distribución espacial de este bosque en la Sierra Maestra.

Áreas de idoneidad ecológica del Bosque nublado

Para determinar las áreas de idoneidad ecológica (AIE) se utilizan como variables predictoras las bioclimáticas disponibles en la serie climática de 1970-2000, del sitio WorldClim versión 2.1¹⁷, consideradas como clima de referencia^{17,18}. Entre las variables relacionadas con la precipitación se consideró la precipitación anual, el rango anual de precipitación, la precipitación del trimestre más lluvioso y la precipitación del trimestre menos lluvioso. De la temperatura se tuvo en cuenta la temperatura media anual, rango anual de temperatura, la temperatura media del trimestre más cálido y la temperatura media del trimestre más frío. Estas variables son, según criterio de expertos consultados, las de mayor influencia sobre el funcionamiento ecológico del ecosistema estudiado.

A través de la estadística zonal (herramienta de los SIG) se realiza el análisis de la distribución potencial de este ecotopo, basado en patrones climáticos y espaciales definidos previamente. Este procedimiento se fundamenta en el manejo integrado de datos estadísticos y cartográficos del área estudiada, considerando las características ecológicas idóneas para la presencia de un tipo de formación vegetal. De esta manera, se puede predecir con un alto grado de certeza su presencia, generando mapas de idoneidad de hábitats que resultan herramientas valiosas para la gestión y conservación de la biodiversidad. Adicionalmente se tomó en cuenta la altitud media sobre el nivel del mar, obtenida del Modelo Digital del Terreno¹⁹ con una resolución espacial de 25 m.

Escenarios futuros del cambio climático

Los escenarios futuros del cambio climático se definen a partir de los resultados de Modelos de Circulación General (MCG) disponibles en WorldClim¹⁸. De ellos se emplean los datos de las proyecciones climáticas futuras reducidas de CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Projects Phase 6) de dos MCG: CanESM5-CanOE²¹ y MIROC-ES2L²², teniendo en cuenta dos horizontes temporales: 2060 y 2100, empleando dos de las cuatro vías socioeconómicas compartidas: 2,6 W m⁻² (mitigación) y 8,5 W m⁻² (alta emisión). Se procesan las mismas variables bioclimáticas empleadas para el clima de referencia (de temperatura y precipitación), esta vez de las proyecciones futuras.

La selección de los MCG se basa en su amplia aceptación y uso en la comunidad científica para proyectar cambios climáticos futuros. Los modelos CMIP6 representan el estado del arte en

modelización climática, incorporando avances significativos en la representación de procesos físicos y biogeoquímicos²⁹. La elección de los MCG CanESM5-CanOE²¹ y MIROC-ES2L²² permite explorar una gama de posibles respuestas climáticas, dado que muestran proyecciones de temperatura que se encuentran por encima y por debajo del promedio de los modelos CMIP6. Esta diversidad en las proyecciones es importante para evaluar la incertidumbre asociada a las predicciones climáticas futuras.

Las Figuras 1 y 2 muestran los resultados de las modelaciones de la temperatura media anual para un escenario de máxima emisión (2100), según el Atlas interactivo del IPCC^{20,23}. Como se observa, los valores se sitúan por encima y por debajo de la media de todos los modelos. Esta disparidad permite realizar un análisis de escenarios futuros donde se contemplan variables climáticas por encima y por debajo de los valores promedios esperados según los reportes del IPCC¹⁸.

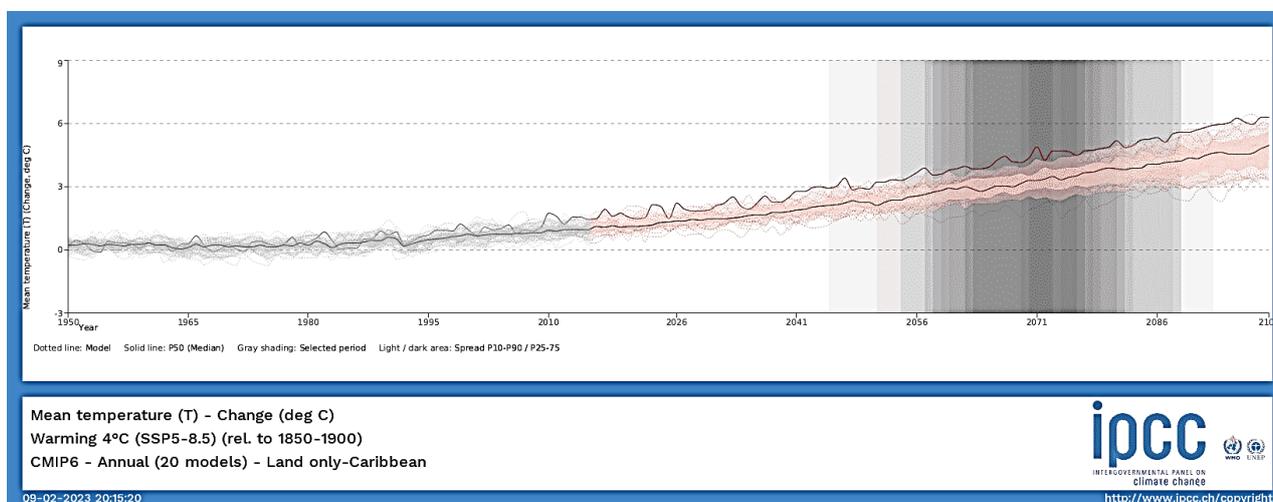


Figura 1. Atlas interactivo. La curva superior muestra la proyección de la temperatura media anual para el 2100 (escenario de alta emisión), según el modelo CanESM5-CanOE. Curva central: promedio de todos los modelos.

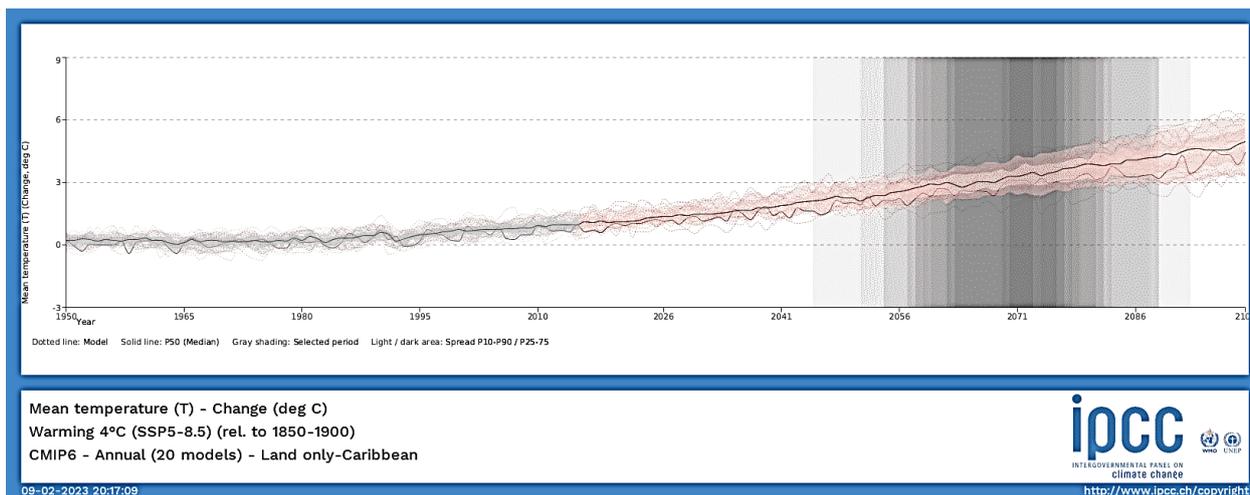


Figura 2. Atlas interactivo. La curva inferior muestra la proyección de la temperatura media anual para el 2100, ante un escenario de alta emisión según el modelo MIROC-ES2L. Curva central: promedio de todos los modelos.

Modelación de la distribución espacial del Bosque nublado frente a los escenarios climáticos futuros

Para modelar la distribución actual del bosque estudiado frente al cambio climático, se utiliza la cobertura vegetal (capa vectorial) del Bn y las capas ráster de WorldClim (precipitación y temperatura) para los escenarios futuros. Posteriormente, a través de la estadística zonal (herramienta SIG), se obtienen los estadísticos (promedio, mínimo, máximo, moda y desviación estándar) de los valores proyectados para el área del Bn (AIE). Posteriormente, con la herramienta Raster calculator (herramienta SIG), se calcula la diferencia entre los valores de las variables (actual y futuro), permitiendo evaluar los cambios entre el clima de referencia y clima futuro dentro del AIE.

Efectos del cambio climático sobre el funcionamiento ecológico del Bosque nublado

Para ello se examinan los impactos potenciales del cambio climático sobre las características del funcionamiento ecológico del Bn descrito por Reyes *et al.*, (2011). Se analizan las proyecciones de precipitación y temperatura para el área de estudio bajo diferentes escenarios climáticos, tanto para el año 2060 como para 2100. A partir de ello, se evalúa cómo estas modificaciones ambientales podrían afectar las estrategias adaptativas que configuran su funcionamiento ecológico. El análisis se centra en comprender cómo los cambios en los patrones climáticos pueden influir en la dinámica del bosque estudiado, así como la estructura y composición del ecosistema.

Resultados

Distribución del Bosque nublado de la Sierra Maestra

El mapa con la cobertura del Bn en el macizo montañoso Sierra Maestra permite una precisa delimitación espacial y caracterización de sus hábitats (Figura 3). Este bosque se extiende desde una altitud de 1 455 m s.n.m. hasta la cima del Pico Real del Turquino (1972 m s.n.m.), ocupando una superficie de 13,48 km², equivalente al 0,23 % del área total del macizo. Si bien representa una pequeña porción del mismo, alberga una notable diversidad de especies, constituyendo un ecosistema clave dentro de los ecosistemas de montaña⁸.

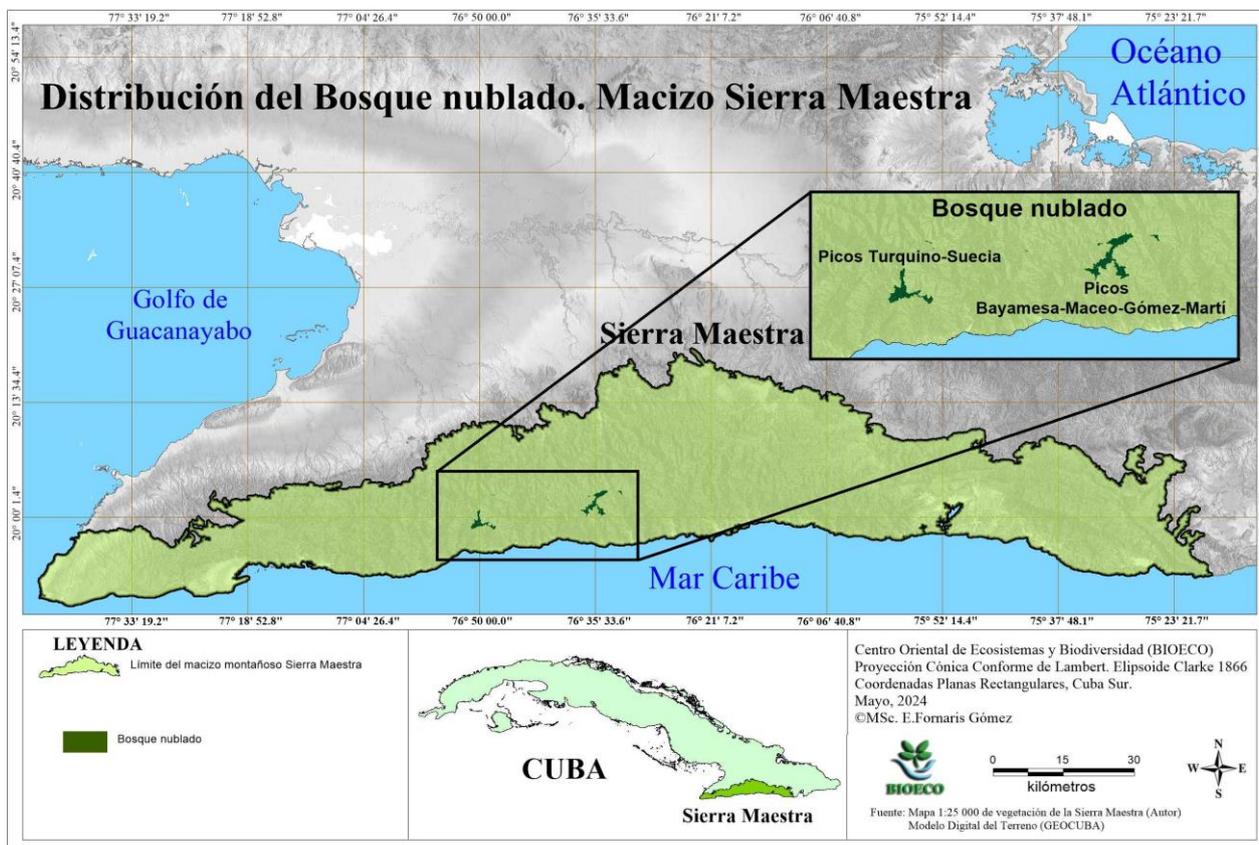


Figura 3. Distribución espacial del Bosque nublado dentro del macizo montañoso Sierra Maestra

Áreas de Idoneidad Ecológica (AIE) del Bosque nublado

Mediante la estadística zonal se obtuvieron los valores de las variables bioclimáticas (predictoras) del hábitat del Bn (Tabla 1 y 2) y los valores altimétricos obtenidos del modelo digital del terreno (Tabla 3).

Tabla 1. Valores de precipitación (mm) para el Bosque nublado, período 1970-2000

Variables	Mín	Máx	Rango	Media	STD
Precipitación anual	1 911	2 035	124	1 985	35,12359
Rango anual de precipitación	234	256	22	245	5,50561

Precipitación del trimestre más lluvioso	705	754	49	733	13,49131
Precipitación del trimestre menos lluvioso	177	206	29	193	8,73053

Donde: Mín- Valores mínimos, Máx- Valores máximos, STD- Desviación estándar

Fuente: Procesados por el autor a partir del WorldClim

En la siguiente tabla se muestran los valores de las variables bioclimáticas relacionadas con las temperaturas (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de temperaturas (0C) para el Bosque nublado, período 1970-2000

Variables	Min	Máx	Rango	Media	STD
Temperatura media anual	16,0	17,4	1,5	16,6	0,42881
Rango anual de temperatura	12,8	12,9	0,1	12,9	0,04875
Temperatura media del trimestre más cálido	17,7	19,1	1,4	18,3	0,42651
Temperatura media del trimestre más frío	13,9	15,4	1,5	14,6	0,44002

Donde: Mín- Valores mínimos, Máx- Valores máximos, STD- Desviación estándar

Fuente: Información procesada por el autor, 2024

Tabla 3. Valores altimétricos de la Pluvilsilva montana de la Sierra Maestra

Variable altitudinal	Bosque nublado
Altitud máxima	1 972
Altitud mínima	1 455
Rango	517
Media	1 592

Fuente: Información procesada por el autor, 2024

El Bn se distribuye desde los 1 455 m s.n.m., hasta la cima del Pico Real del Turquino, la parte más elevada de la Sierra Maestra y de todo el archipiélago cubano, con un rango de distribución de poco más de 500 m. Ello le confiere características particulares al funcionamiento ecológico de este ecosistema montañoso. Las nubes bajas aportan humedad al interior del bosque, la que es absorbida por el mantillo y las epífitas. Es frecuente un déficit de saturación convirtiéndose en un factor de estrés a la vegetación, lo cual explica la alta microfilia y esclerofilia de esta vegetación²⁴. Otro factor tensionante es el viento, principalmente sobre el estrato arbóreo, actuando con más fuerza en las partes expuestas al Norte.

Comportamiento de la precipitación y la temperatura en dos escenarios climáticos futuros, según los modelos MIROC-ES2L y CanESM5-CanOE, para los horizontes temporales 2060 y 2100

A continuación, se presenta una síntesis del comportamiento de las variables bioclimáticas relacionadas con la precipitación y la temperatura para el ecotopo del Bn, para los años 2060 y 2100, en los dos escenarios climáticos analizados.

Análisis del comportamiento de la precipitación:

a). Horizonte temporal 2060

Escenario de mitigación:

Mientras que el modelo MIROC-ES2L estima una disminución de la precipitación anual en 10,6 mm en comparación con el período de referencia y aumentos discretos en los trimestres lluviosos y menos lluviosos (10,1 y 4,9 mm respectivamente), el modelo CanESM5-CanOE predice un aumento de 110,0 mm en la lluvia total anual y aumentos en los trimestres lluviosos y menos lluviosos (35,5 y 30,7 mm respectivamente).

Escenario de alta emisión:

En este escenario el modelo MIROC-ES2L pronostica una reducción de 79,2 mm en la precipitación anual y 35,2 mm el trimestre más lluvioso, sin embargo, el modelo CanESM5-CanOE estima una reducción de 41,6 mm anuales, con un aumento de 31,5 mm en el trimestre menos lluvioso. El resto de las variables no tendrán cambios importantes.

b). Horizonte temporal 2100

Escenario de mitigación:

En este escenario el modelo MIROC-ES2L estima una reducción de la precipitación anual en 40,7 mm, con un comportamiento discreto del resto de las variables. Por el contrario, el modelo CanESM5-CanOE predice un aumento de la precipitación anual de 133,6 mm, con aumentos también del trimestre más lluvioso y menos lluvioso, de 42,2 y 26,3 mm respectivamente.

Escenario de alta emisión:

En este escenario, ambos modelos pronostican notables reducciones de la precipitación anual. El modelo MIROC-ES2L estima una reducción de 307,2 mm de lluvia en el año, mientras que, el modelo CanESM5-CanOE estima 542,1 mm, lo que representa una disminución del 27,3 % en comparación con el período actual. Estos son los mayores valores de reducción de las precipitaciones de todos los escenarios analizados. Respecto a las precipitaciones del trimestre más lluvioso, que ocurre desde agosto a octubre, el primer modelo predice una disminución de 70,9 mm y el modelo CanESM5-CanOE, estima una reducción 169,9 mm. Respecto a las cantidades de lluvias en el trimestre menos

lluvioso, MIROC-ES2L predice reducciones de 20,3 mm, sin embargo, el segundo modelo estima un aumento de 34,8 mm de lluvia total anual.

Análisis del comportamiento de la temperatura:

a). Horizonte temporal 2060

Escenario de mitigación:

Según el modelo MIROC-ES2L para un escenario de mitigación podría esperarse un incremento de la temperatura media anual de 0,9°C; de igual manera se incrementa la temperatura del trimestre más cálido en 1,1°C y del trimestre más frío en 0,7°C. Por su parte el modelo CanESM5-CanOE estima un aumento de la temperatura media anual en 1,5°C y del trimestre más cálido en 5,7°C, sin embargo, este modelo estima una disminución de 2,8°C para el trimestre más frío.

Escenario de alta emisión:

Según MIROC-ES2L, para un escenario de alta emisión podría esperarse un aumento de la temperatura media anual en 1,4°C; para el trimestre más cálido disminuiría en 2,4°C y para el más frío tendría un aumento de 3,4°C. El modelo CanESM5-CanOE estima un aumento de la temperatura media anual de 2,4°C, mientras que, la temperatura del trimestre más cálido y más frío, los aumentos serían de 2,7 y 2,3°C respectivamente.

b). Horizonte temporal 2100

Escenario de mitigación:

El modelo MIROC-ES2L proyecta un aumento de la temperatura media anual de 0,9°C para finales de siglo XXI y similares aumentos podrían registrarse para el trimestre más cálido y más frío, siendo de 1,1°C y 0,7°C, respectivamente. El modelo CanESM5-CanOE, por su parte, estima un aumento de la temperatura media anual de 1,5°C y de 5,6°C para el trimestre más cálido, sin embargo, una disminución de 2,8°C para el trimestre más frío.

Escenario de alta emisión:

Frente a un escenario de alta emisión, según el modelo MIROC-ES2L, la temperatura media anual se incrementa considerablemente hasta alcanzar 3,3°C. Aunque el modelo estima una disminución de la temperatura media del trimestre más frío de 1,2°C, el aumento en el trimestre más cálido podría ser de 7,9°C. En este escenario, el modelo CanESM5-CanOE estima para el 2100 un aumento de 5,1°C para la temperatura media anual, a su vez, la temperatura media del trimestre más cálido podría aumentar a 9,8°C, aunque el aumento del trimestre más frío podría ser de solamente 0,5°C. Estos aumentos son consistentes con las tendencias actuales de las políticas climáticas de los principales emisores de GEI, coincidiendo además con las predicciones publicadas por el IPCC¹.

Discusión

Estrategias de conservación del Bosque nublado y su resiliencia

La efectividad de las estrategias de conservación del Bn no se limita solo a la preservación de las especies, también busca mantener sus roles ecológicos clave dentro del ecosistemas. El análisis de su función ecológica se centra en preservar su estructura, los procesos bioquímicos y la resiliencia. De este modo, las estrategias de conservación se enfocan en prevenir la extinción de especies, priorizando indicadores que permitan la interrelación intra e interespecífica, condicionando el mantenimiento de la estructura y su función dentro del ecosistema, lo cual es común para todas las comunidades vegetales²⁵.

El Bn alberga en su interior diversos microecosistemas que ocupan superficies variables. Su configuración depende principalmente de dos elementos: edáficos y microclimáticos. Al someterse a variaciones climáticas, su composición estructural y fisonomía podrían variar en el tiempo. Si, a pesar de estas variaciones, el ecosistema se mantiene dentro de parámetros naturales y es capaz de regresar a su estado original mediante su propio funcionamiento, se considera un ecosistema resiliente. Su resiliencia depende, por tanto, de su integridad ecológica.

Cuando el conjunto de elementos que la conforman sufre un desequilibrio, incluso solo algunos de ellos y es de tal magnitud que impacta en su funcionamiento y persiste en el tiempo, el ecosistema tiene tres posibilidades: adaptarse mediante un cambio rápido de su funcionamiento (estrategias adaptativas), migrar a otra zona con condiciones ecológicas similares (AIE) o degradarse hasta desaparecer. Si mantiene más o menos intacto sus grupos funcionales, compuesto por un conjunto de especies que juegan un rol clave dentro del ecosistema, este puede mantener eficientemente sus procesos funcionales.

Efectos del cambio climático sobre el área de idoneidad ecológica del Bosque nublado relacionado con el aumento de la temperatura

Los resultados obtenidos evidencian la vulnerabilidad del Bn ante los escenarios de cambio climático proyectados. Dada la estrecha relación entre la distribución altitudinal del bosque y la temperatura, el incremento térmico previsto podría ocasionar una contracción significativa de su área de distribución. El gradiente térmico promedio de 0,63°C por cada 100 m de ascenso, característico de la región, sugiere que el bosque nublado, al encontrarse en las cotas altitudinales superiores de la Sierra Maestra, posee un margen de maniobra limitado para migrar hacia zonas más frías. En este contexto, el aumento de la temperatura desplazaría el rango altitudinal óptimo para el desarrollo del bosque hacia mayores elevaciones, reduciendo drásticamente el área potencialmente apta para su establecimiento.

La limitada extensión actual del bosque nublado en la región, sumada a la restricción topográfica impuesta por la altitud, acentúa su vulnerabilidad ante estos cambios ambientales, incrementando el riesgo de pérdida de biodiversidad y de los servicios ecosistémicos asociados.

Se expone a continuación el análisis de las alteraciones superficiales del Bn en función de las variaciones de temperatura estimadas por los MCG en cada período temporal. Los resultados obtenidos se presentan mediante un gráfico bidimensional y un modelo digital de elevación tridimensional (MDT), generados con los software MapInfo Professional 12.01 y Vertical Mapper 3.1.1.

Las zonas cubiertas por el Bn en los extremos occidental y oriental de las figuras corresponden, respectivamente, a los picos Turquino (1 972 m s.n.m.) y Suecia (1 734 m s.n.m.) y a los picos Bayamesa (1 752 m s.n.m.), Maceo (1 739 m s.n.m.), Gómez (1 681 m s.n.m.) y Martí (1 727 m s.n.m.), donde se aprecian las modificaciones en el Bn representadas en tonalidad naranja.

a). Pérdida de superficie para el año 2060, según el modelo MIROC-ES2L, en los escenarios climáticos estudiados

En un escenario de mitigación, con un aumento de la temperatura media anual de 0,9°C, el límite inferior del ecosistema debería ascender 143 m, desde 1 455 m s.n.m. hasta 1 598 m s.n.m. Esto implicaría una reducción de su superficie actual de 13,48 km² a 8,47 km², con una pérdida del 62,8 %. En un escenario de alta emisión, las consecuencias serían aún más graves: un aumento de 1,4°C obligaría a una migración de 222 m hacia las zonas altas, con una reducción de 11,71 km² de la superficie actual, quedando solo 1,77 km² (una pérdida del 86,9 %). La Figura 4 ilustra estos cambios de forma más detallada.

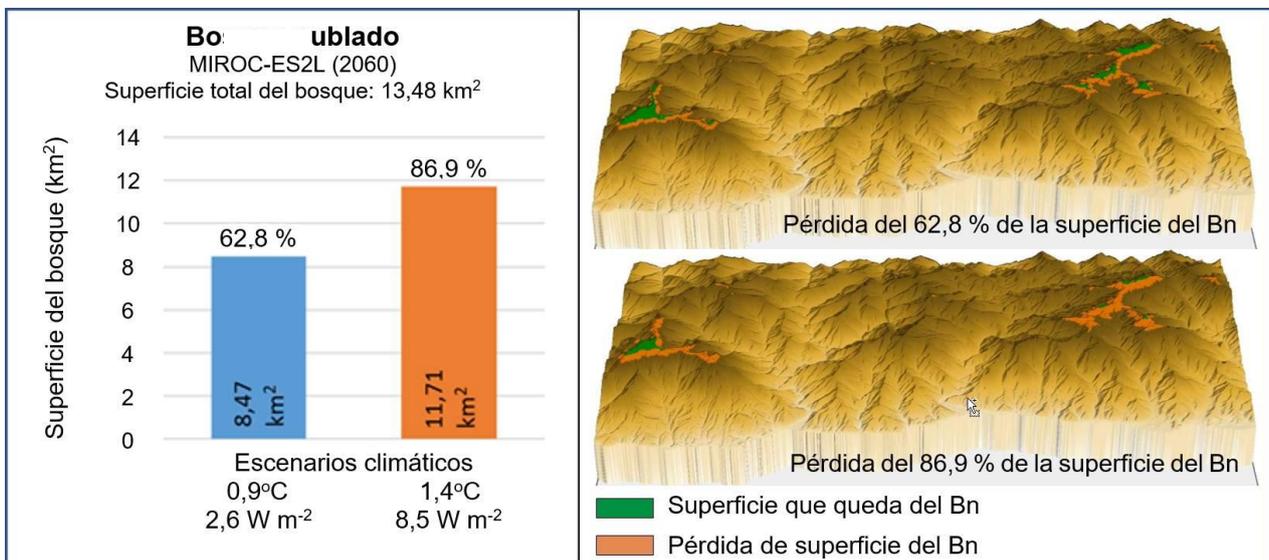


Figura 4. Pérdida de superficie del Bn según el MCG MIROC-ES2L (2060). Fuente: Autor, 2024

b). Pérdida de superficie del Bosque nublado para el año 2100, según el modelo MIROC-ES2L, en los escenarios climáticos estudiados

Bajo un escenario de mitigación, con un aumento de 0,9°C (similar al período anterior para este modelo), el Bn debería migrar 143 m altitudinales (hacia altitudes más altas), lo que implica una reducción de su extensión a 5,01 km² (una pérdida del 62,8 %). Sin embargo, en un escenario de altas emisiones, con un aumento de la temperatura media anual de 3,3°C, el bosque tendría que migrar 524 m, lo que conllevaría a su pérdida total y, por ende, a su potencial desaparición. Estos resultados se ilustran en la Figura 5.

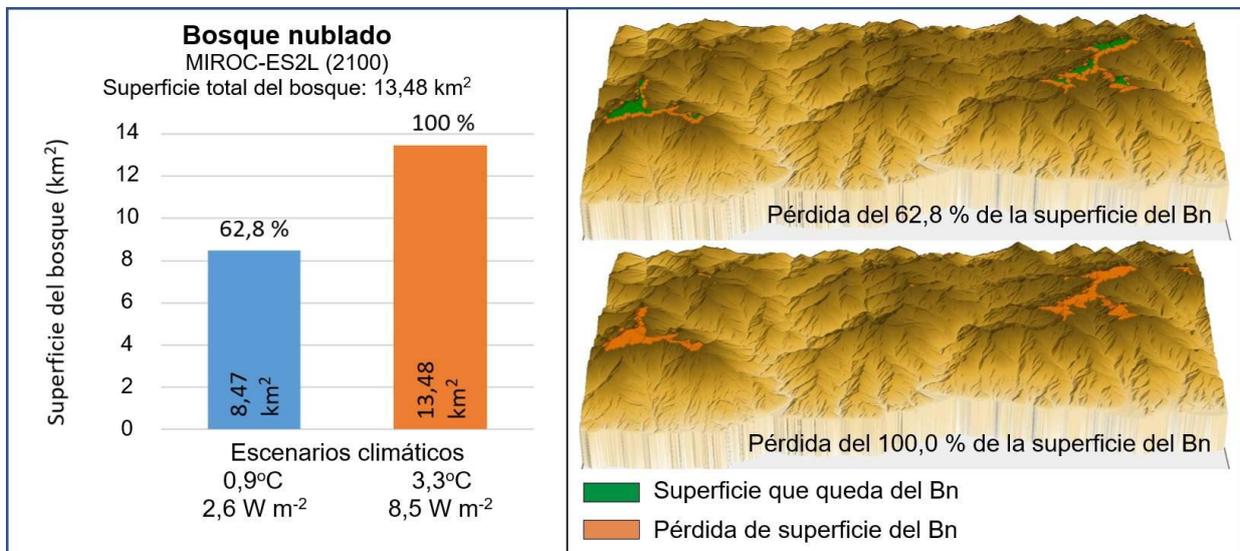


Figura 5. Pérdida de superficie del Bn según el MCG MIROC-ES2L (2100). Fuente: Autor, 2024

c). Pérdida de superficie del Bosque nublado para el año 2060, según el modelo CanESM5-CanOE, en los escenarios climáticos estudiados

Un escenario de mitigación, con un aumento de 1,5°C en la temperatura media anual, obligaría al Bn a migrar 238 m s.n.m. como mecanismo de adaptación. Esto significaría una reducción del 89,4 % de su superficie actual (12,06 km²), quedando solo 1,42 km². En un escenario de alta emisión, con un aumento de 2,4°C, la migración necesaria sería de 381 m s.n.m., lo que conllevaría a una pérdida del 98,1 % de su superficie, reduciéndose a solo 0,25 km². La Figura 6 ilustra estos resultados de manera gráfica.

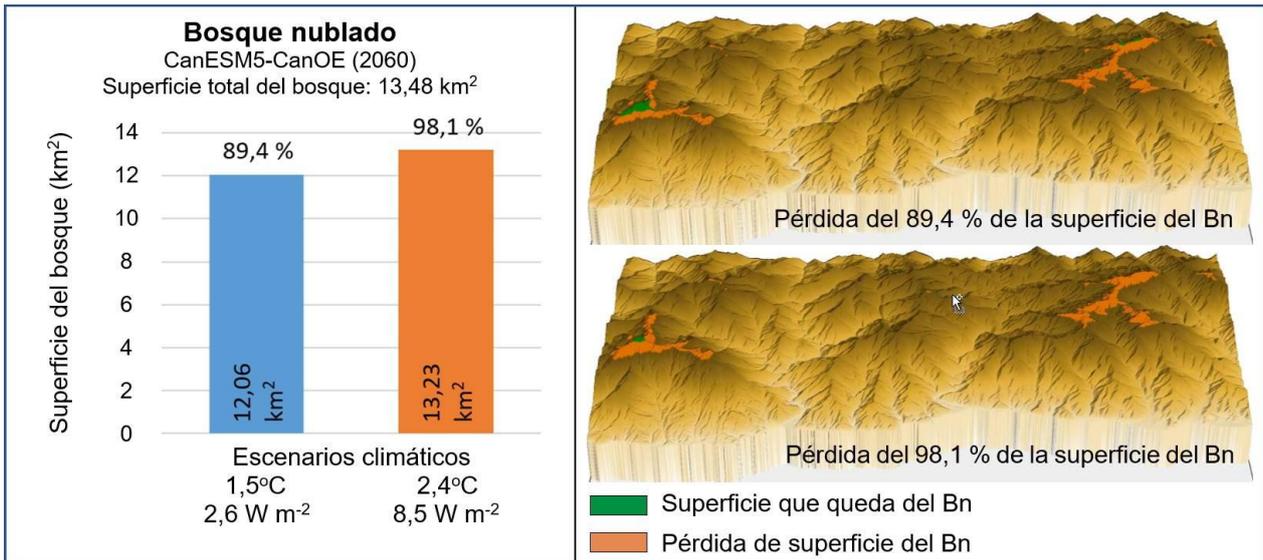


Figura 6. Pérdida de superficie del Bn según el MCG CanESM5-CanOE (2060). Fuente: Autor, 2024

d). Pérdida de superficie del Bosque nublado para el año 2100, según el modelo CanESM5-CanOE, en los escenarios climáticos estudiados

El modelo predice un aumento de la temperatura media anual para el Bn de 1,5°C en un escenario de mitigación, lo que requeriría una migración altitudinal de 238 m para mantener su AIE. Esto conllevaría a una pérdida de 12,06 km² (88,4 %) de este bosque, quedando solo 1,42 km². En un escenario de alta emisión, el aumento de la temperatura media anual se estima en 5,1°C para el período 2081-2100. Para compensar este aumento, el Bn necesitaría migrar 809 m hacia la cima del macizo, lo que resultaría en la pérdida total de su AIE (Figura 7).

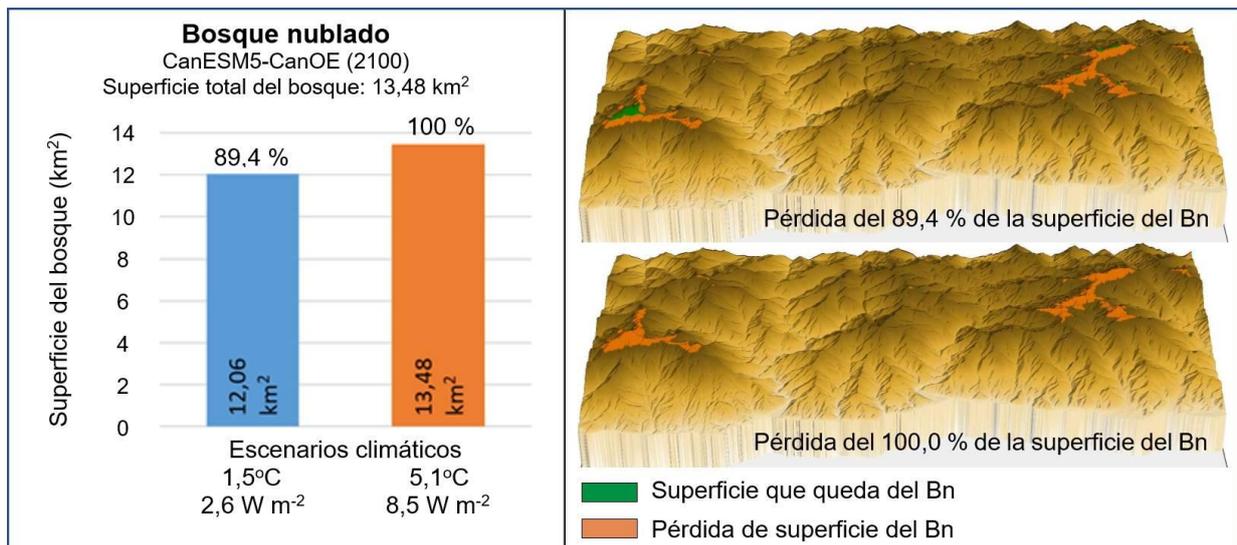


Figura 7. Pérdida de superficie según el MCG CanESM5-CanOE (2100). Fuente: Autor, 2024

Efectos del cambio climático sobre el funcionamiento ecológico del Bosque nublado

Precipitación y ciclos fenológicos:

Las proyecciones climáticas indican que la precipitación en el Bn se verá afectada con diferentes magnitudes según el escenario de emisiones. La disminución de la precipitación, especialmente en el escenario de alta emisión, podría tener repercusiones negativas sobre los procesos ecológicos del ecosistema. La alteración de los ciclos fenológicos, como la floración, la fructificación y la dispersión de semillas, afectaría la reproducción, la supervivencia de las poblaciones y la perpetuación del ecosistema. Los cambios en los patrones de lluvia impactarían directamente la estructura, composición y dinámica del Bn.

Precipitación, temperatura y funcionamiento ecológico:

El aumento de la temperatura también afectaría el funcionamiento ecológico del Bn. Se observaría una incidencia negativa en la actividad de los descomponedores, la acumulación de detritus, las respuestas fenológicas, la regeneración natural y las tasas de evapotranspiración. Las magnitudes de aumento de temperatura previstas para el Bn, coincidentes con las del IPCC²⁷, podrían desencadenar efectos en cascada como el aumento de la probabilidad de incendios forestales e incidencias de plagas y enfermedades.

El Bn ha desarrollado una estera radical como un eficiente mecanismo adaptativo para el ciclaje de nutrientes y la absorción y retención del agua. En este ecosistema, la mayor parte de los nutrientes se encuentran almacenados y circulando dentro de la biomasa²⁸. Su existencia depende de un contenido suficiente de humedad ambiental y actúa como un eficiente mecanismo de conservación y reciclaje de los nutrientes. Este bosque posee una gran cantidad de raicillas finas, concentrando la actividad nutricional en la descomposición del material orgánico en descomposición.

Este bosque depende de la estera radical y del mantillo para su supervivencia. Su ciclo de liberación de nutrientes es muy lento, lo que implica una baja productividad. La estera radical permite el desarrollo del Bn en condiciones ambientales altamente estresantes. Es importante destacar que los ecosistemas donde la estera radical es el principal mecanismo de supervivencia son altamente frágiles. Su formación toma mucho tiempo y su destrucción rompe la vía de alimentación, dejando a la vegetación sin posibilidades de subsistencia²⁸. Cualquier perturbación prolongada de las variables climáticas analizadas podría ocasionar un daño irreparable a este eficiente mecanismo adaptativo.

Escenario climático de alta emisión:

Se proyecta que para 2100, en un escenario de alta emisión, el aumento de la temperatura media anual y la disminución de la precipitación en más de 300 mm anuales podrían tener efectos sinérgicos y negativos sobre el funcionamiento ecológico del Bn. Esta interacción intensificaría el riesgo para este ecosistema, afectando negativamente los procesos de fotosíntesis, evapotranspiración y dinámica del Bn. La capacidad de adaptación del ecosistema se vería comprometida, con el consecuente riesgo de pérdida de biodiversidad y alteración de los servicios ecosistémicos que este proporciona.

Impactos:

La sinergia de los factores analizados anteriormente amenaza con destruir el Bn como ecosistema viable, ocasionando la pérdida de su biodiversidad asociada y un impacto negativo en sus servicios ecosistémicos. Los resultados sugieren que el cambio climático tendrá repercusiones significativas en su funcionamiento ecológico, incluso en un escenario de mitigación, el cual, si bien es menos drástico, también podría generar alteraciones importantes en el ecosistema. Este estudio resalta la urgente necesidad de implementar medidas para minimizar los efectos del cambio climático y proteger la integridad de estos ecosistemas, los cuales son altamente vulnerables a los potenciales cambios ambientales.

Conclusiones

- Los análisis de los escenarios climáticos pronostican una reducción significativa de las superficies de bosque nublado, principalmente debido al aumento de la temperatura y la alteración en la distribución y frecuencia de las precipitaciones. Para finales de siglo XXI, bajo escenarios de mitigación, se espera una drástica reducción del hábitat del bosque nublado. Sin embargo, en escenarios de alta emisión, donde estas dos variables experimentan cambios más severos, se proyecta la pérdida total del área de idoneidad ecológica del Bosque nublado, lo que conduciría a su desaparición.
- El cambio climático, caracterizado por el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones, podría tener un impacto significativo sobre el funcionamiento ecológico del Bosque nublado, según los resultados del presente estudio. Se anticipa una reducción en la productividad primaria, la diversidad de especies y la resiliencia del ecosistema. La alteración en la dinámica del agua y la temperatura afectaría negativamente la fenología, la composición florística y la estructura del bosque. La implementación de medidas para proteger estos ecosistemas frágiles es crucial.

Author Contributions: Las contribuciones realizadas por los autores se detallan a continuación en la siguiente declaración: la conceptualización de la investigación, la metodología, el manejo de software, la investigación, los recursos, escritura original, revisión de literatura de apoyo y la

dirección y administración del proyecto fueron realizados por el autor: Euclides Fornaris Gómez. La validación, análisis formal, revisión de datos, escritura revisión y edición y supervisión fueron sido realizadas por los autores; Orlando Joel Reyes Domínguez y Luz Margarita Figueredo Cardona. Ambos autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito

Funding: Esta investigación no recibió financiamiento externo. La misma fue financiada con recursos del propios.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: La investigación contenida en este manuscrito forma parte de una tesis doctoral del autor Euclides Fornaris Gómez, la cual ha sido revisada y aprobada por el Consejo Científico de la institución de origen.

Informed Consent Statement: No aplicable.

Data Availability Statement: Los datos originales necearios para la conformación del clima de referencia, así como los datos del clima futuro, están publicados en el sitio web de WorldClim (Historical climate data: <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#> y Future climate data: <https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6climate.html>).

Acknowledgments: Los autores agradecen al Consejo Científico del Centro Oriental de Ecosistemas y Biodiversidad (Bioeco) y a la Dra.C. Liliana Gómez Luna del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) por la revisión y acertadas recomendaciones.

Conflicts of Interest: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
2. United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed. Nairobi.
<https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43796>

3. Abdissa, T., T. Adugna, F. Saathoff & A. Gebissa. (2023). Evaluation of General Circulation Models CMIP6 Performance and Future Climate Change over the Omo River Basin, Ethiopia. *Sustainability*, 15(8), 6507.
<https://doi.org/10.3390/su15086507>
4. IPCC. (2021) Summary for Policymakers. In: *Climate Change. 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 3 949 pp.
5. Firpo, M. Â, BdS. Guimarães, L. G. Dantas, M. G. Barbosa da Silva, L. M. Alves, R. Chadwick, M. P. Llopart & GSd., Oliveira. (2022). Assessment of CMIP6 models performance in simulating present-day climate in Brazil. *Frontiers in Climate*. 4:948499. 27 pp.
<https://doi: 10.3389/fclim.2022.948499>
6. Viña, N. y colectivo de autores. (2000). *Diversidad biológica del macizo montañoso Sierra Maestra. Programa Científico-Técnico Nacional Desarrollo Sostenible de la Montaña. Tomo 1. Bioeco, Santiago de Cuba. (Inédito).*
7. Mateo, J. M., M. Celeiro, P. Acevedo & D. Hernández. (2019). *Regionalización del Paisaje. En Atlas Nacional de Cuba LX Aniversario, Sección 2 Naturaleza, Epígrafe 2.9 Paisaje. Instituto de Geografía Tropical, La Habana. Formato digital (multimedia).*
8. Borhidi, A. (1991). *Phytogeography and Vegetation Ecology of Cuba. Akadémiai Kiadó. Budapest. 857 pp.*
9. Castillo, R., R. Montero, J. Amador & A. M. Durán. (2018). Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística. *Revista de Climatología*. Vol. 18:1-12.
10. Plumptre, A., D. Baisero, R. Travis et al. (2021). *Where Might We Find Ecologically Intact Communities?.* Edited by Center for International Forestry Research (CIFOR), Indonesia. Vol 4. 13 pp.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.626635>
11. Rodríguez, H. (2021). ¿Quedan rincones vírgenes la Tierra? No más de un 3 % según un nuevo estudio. *National Geographic* (España).
12. IPCC. (2011). Summary for Policymakers, en: *Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate*

- Change Adaptation Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D., Ebi, K.L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Allen, S. K., Tignor, M., Midgale, P.M. (Eds).
13. Hong, J., X. Lu., X. Ma & X. Wang. (2021). Five-year study on the effects of warming and plant litter quality on litter decomposition rate in a Tibetan alpine grassland. *Science of The Total Environment*. 750. 142306.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142306>
 14. Tian, L., Y. Tao, W. Fu, F. Ren & M Li. (2022). Dynamic Simulation of Land Use/Cover Change and Assessment of Forest Ecosystem Carbon Storage under Climate Change Scenarios in Guangdong Province, China. *Remote Sens*. 2022, 14(10), 2330.
<https://doi.org/10.3390/rs14102330>
 15. Fuentes, I., L. González-Oliva, I. Baró, M. T. González & C. A. Mancina. (2019). Efecto potencial del cambio climático sobre la distribución de plantas asociadas a bosques húmedos del oriente de Cuba. *Acta Botánica Cubana*. ISSN 2519-7754 RNPS 2402. Vol. 218, No.2 (julio-diciembre): 160-170.
 16. Beyris, A., J. Reyes, J. Costa & A. González. (2020). Efectos del incremento de la temperatura debido al cambio climático en la Pluvisilva montana en la Reserva de la Biosfera Baconao, Cuba Suroriental. *Ciencia en su PC*, vol. 1(3). pp. 18-35.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181365138002>
 17. Fick, S. E. & R. J. Hijmans. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
 18. WorldClim. 2024. Future Climate Data.
https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim30s.ht
 19. GEOCUBA. 2014. Mapa topográfico de la República de Cuba. Shapefiles de ArcGIS. GEOCUBA.
 20. Iturbide, M., J. Fernández, J. M. Gutiérrez, J. Bedía, E. Cimadevilla, J. Díez-Sierra, R. Manzanás, A. Casanueva et al. (2021). Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas. Zenodo.
DOI: 10.5281/zenodo.3691645
Disponibile en: <https://github.com/IPCC-WG1/Atlas>
 21. Swart, N. C., J. Cole, N. S. Jason; V. V. Kharin, M. Lazare, J. F. Scinocca, N. P. Gillett, P. Nathan, J. Anstey, V. Arora, J. R. Christian, Y. Jiao, W. Lee, F. Majaess, O. A. Saenko, C. Seiler, C. Seinen, A. Shao, L. Solheim, K. von Salzen, D. Yang, B. Winter, M. Sigmond.

- (2019). CCCma CanESM5-CanOE model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Version 2022. Earth System Grid Federation.
<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10276>
22. Hajima, T., M. Watanabe, A. Yamamoto, H. Tatebe, M. A. Noguchi, M. Abe, R. Ohgaito, A. Ito, D. Yamazaki, H. Okajima, A. Ito, K. Takata, K. Ogochi, S. Watanabe and M. Kawamiya. (2020). Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks, *Geosci. Model Dev.*, 13. pp. 2197-2244.
doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020
23. Gutiérrez, J. M., R. G. Jones, G. T. Narisma, L. M. Alves, M. Amjad, I. V. Gorodetskaya *et al.* (2021). Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas.
Disponibile en: <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>
24. Reyes, O., E. Portuondo, V. Elena & E. Fornaris. (2011). Características fisonómicas y funcionales del bosque nublado de la Sierra Maestra. *Moscosa* 17. pp. 138-149.
25. Brodie, J., K. Redford & D. Doak. (2018). Ecological Function Analysis: Incorporating Species Roles into Conservation. *Trends in Ecology & Evolution*. 33.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.08.013>.
26. Montenegro, U. (1990). Temperatura media anual. En *Atlas de Santiago de Cuba*. p. 26.
27. IPCC. (2019). Resumen para responsables de políticas. En: *El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres* [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendía, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. 40 pp. ISBN 978-92-9169-354-2
28. Reyes, O. J. & E. Fornaris. (2011). Características funcionales de los principales bosques de Cuba Oriental. En *Polibotánica*. México. No. 32. pp. 89-105.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682011000200005&lng=es.

29. Meehl, G. A. (2023). The Role of the IPCC in Climate Science. National Center for Atmospheric Research. 35 pp.

<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.933>

30. Reyes, O., E. Portuondo, V. Elena & E. Fornaris. (2011). Características fisonómicas y funcionales del bosque nublado de la Sierra Maestra. En Moscosoa 17. pp. 138-149.

En: <https://www.redalyc.org/pdf/497/49719770002.pdf>

/ Received: 18 June 2024 | Accepted: 26 August 2024 | Published: 15 September 2024 |

Citation: *Fornaris-Gómez, E., Reyes-Domínguez, O., Figueredo-Cardona, L. Impactos del cambio climático en la integridad funcional del Bosque nublado de la Sierra Maestra, Cuba. Bionatura. 2024; Volume (9). No 3.*

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)