



SECCIÓN CIENCIAS NATURALES

Artículo original de investigación

Cambio climático y estabilidad ecológica de la Pluvilsilva montana en la Sierra Maestra, Cuba

Euclides Fornaris Gómez ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-6061-0765>

Orlando Joel Reyes Domínguez ¹ <https://orcid.org/0000-0001-7486-5508>

Luz Margarita Figueredo Cardona ² <https://orcid.org/0000-0002-0834-6327>

¹ Centro Oriental de Ecosistemas y Biodiversidad. Santiago de Cuba, Cuba

² Agencia de Medio Ambiente. La Habana, Cuba

* Autor para correspondencia: euclides.fg42@gmail.com

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

RESUMEN

Introducción: La Pluvilsilva montana de la Sierra Maestra es un ecosistema de alta biodiversidad y sensibilidad climática; su estabilidad depende de condiciones térmicas e hídricas específicas, por lo que el cambio climático representa un riesgo crítico para su persistencia.

Objetivos: Evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución y la funcionalidad ecológica de la Pluvilsilva montana, estimando la pérdida de superficie idónea bajo escenarios contrastantes. **Métodos:** Se delimitaron las áreas de idoneidad ecológica mediante imágenes Sentinel-2, variables bioclimáticas 1970-2000 (WorldClim v2.1) y análisis altitudinal. Se emplearon los modelos CanESM5-CanOE y MIROC-ES2L y los escenarios SSP2-6 (mitigación) y SSP5-8.5 (alta emisión) para 2060 y 2100; se aplicaron estadísticas zonales y modelación espacial para cuantificar cambios en distribución y funcionalidad. **Resultados:** Para 2060, MIROC-ES2L proyecta pérdidas de superficie de 32,6 % (SSP2-6) y 49,9 % (SSP5-8.5), mientras que CanESM5-CanOE indica reducciones de 53,1 % y 76,2 %. Para 2100 las contracciones oscilan entre 28,8 % y 91,7 % (MIROC-ES2L), y de 53,1 % a 99,1 % (CanESM5-CanOE). Las pérdidas más severas de hábitat se asocian a incrementos térmicos 3,6 °C y 5,4 °C (MIROC-ES2L y CanESM5-CanOE, respectivamente) y reducciones pluviométricas de -301,2 mm y -515,8 mm bajo el escenario de alta emisión para 2100. Esta contracción altitudinal compromete la conectividad, los ciclos fenológicos y la funcionalidad ecosistémica. **Conclusiones:** El cambio climático compromete gravemente la estabilidad y funcionalidad de la Pluvilsilva montana; se requieren medidas de conservación y manejo adaptativo, restauración dirigida y monitoreo climático para preservar su resiliencia ante escenarios extremos.

Palabras clave: funcionamiento ecológico; idoneidad ecológica; resiliencia ecosistémica; conectividad ecológica; pérdida de hábitat

Climate change and ecological stability of the montane rainforest in the Sierra Maestra, Cuba

ABSTRACT

Introduction: The montane rainforest of the Sierra Maestra is an ecosystem of high biodiversity and marked climatic sensitivity; its stability depends on specific thermal and hydric conditions, making climate change a critical threat to its persistence. **Objectives:** To assess the impact of climate change on the distribution and ecological functionality of the montane rainforest, estimating the loss of suitable area under contrasting emission scenarios. **Methods:** Ecological suitability areas were delineated using Sentinel-2 imagery, 1970–2000 bioclimatic variables (WorldClim v2.1), and altitudinal analyses. The CanESM5-CanOE and MIROC-ES2L models were applied under SSP2-6 (mitigation) and SSP5-8.5 (high emission) scenarios for 2060 and 2100. Zonal statistics and spatial modeling were used to quantify changes in distribution and ecological functionality. **Results:** For 2060, MIROC-ES2L projects habitat losses of 32.6 % (SSP2-6) and 49.9 % (SSP5-8.5), while CanESM5-CanOE estimates reductions of 53.1 % and 76.2 %. By 2100, contractions range from 28.8 % to 91.7 % (MIROC-ES2L) and from 53.1 % to 99.1 % (CanESM5-CanOE). The most severe losses are associated with temperature increases of 3.6°C and 5.4°C and precipitation declines of –301.2 mm and –515.8 mm under the high-emission scenario for 2100. This altitudinal contraction compromises ecological connectivity, phenological cycles, and overall ecosystem functionality. **Conclusions:** Climate change severely threatens the stability and ecological functioning of the montane rainforest; urgent adaptive conservation measures, ecological restoration, and climate monitoring are required to preserve its resilience under extreme scenarios.

Keywords: ecological functioning; ecological suitability; ecosystem resilience; ecological connectivity; habitat loss

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales peligros para la estabilidad de los ecosistemas terrestres. Las emisiones de gases de efecto invernadero han provocado un aumento sostenido de la temperatura global y alteraciones en los patrones de precipitación, afectando la distribución y funcionalidad de numerosas comunidades vegetales. ⁽¹⁾ Los modelos climáticos proyectan escenarios donde estas modificaciones pueden comprometer la viabilidad de ecosistemas sensibles, como los bosques montanos húmedos, cuya capacidad adaptativa es limitada y depende de procesos ecológicos altamente especializados. ^(2,3)

Las Pluvisilvas montanas se caracterizan por su zonación altitudinal, elevada biodiversidad y funciones ecológicas críticas. ^(4,5) Sostienen especies endémicas y proveen servicios esenciales como regulación hídrica, captura de carbono y protección del suelo. ^(6,7,8) Sin embargo, su equilibrio depende de la interacción entre factores climáticos, edáficos y ecológicos, lo que las hace especialmente vulnerables a las alteraciones ambientales. ^(9,10) La pérdida de

resiliencia compromete la conservación de especies clave y la persistencia de procesos ecológicos esenciales. ⁽¹¹⁾

En Cuba la Pluvisilva montana de la Sierra Maestra constituye un ecosistema relictivo de alto valor ecológico y funcional. ⁽¹²⁾ Su distribución altitudinal y estructura florística están condicionadas por gradientes térmicos e hídricos, y su funcionamiento depende de microclimas que regulan la regeneración y la fenología. Las variaciones en temperatura y precipitación pueden provocar desplazamientos altitudinales, pérdida de conectividad ecológica y alteraciones en los ciclos biogeoquímicos. ^(5,13,14)

Las proyecciones climáticas indican un incremento sostenido de la temperatura y cambios en los regímenes de precipitación, lo que podría reducir drásticamente la superficie ecológicamente idónea de la Pluvisilva montana. ^(15,16) La disminución de la disponibilidad hídrica y el aumento térmico comprometerían la regeneración de especies clave y la capacidad de adaptación del ecosistema ante condiciones extremas. Evaluar estos efectos requiere integrar escenarios contrastantes de mitigación y alta emisión, considerando su impacto sobre la estabilidad funcional. ⁽¹⁷⁾

El objetivo de este estudio fue evaluar cómo el cambio climático afecta la distribución altitudinal y la estabilidad ecológica de la Pluvilsilva montana en la Sierra Maestra, estimando la pérdida de superficie idónea bajo escenarios contrastantes de emisión para 2060 y 2100. Este enfoque espacialmente explícito permite identificar zonas de persistencia, desplazamiento y contracción potencial, contribuyendo al diseño de estrategias de conservación y manejo adaptativo basadas en evidencia científica. ^(18,19)

MÉTODOS

El estudio siguió un diseño mixto que integró un componente descriptivo para la generación y validación de la cartografía de cobertura y un componente analítico-predictivo basado en modelación espacial de idoneidad ecológica. La fase descriptiva incluyó la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales y datos geoespaciales para caracterizar la estructura y distribución del bosque; la fase predictiva empleó proyecciones climáticas para evaluar cambios futuros en el ecosistema. La cartografía de la Pluvilsilva montana se elaboró y revisó entre 2022 y 2023, y el procesamiento de capas espaciales y climáticas se realizó en 2025.

El área de estudio corresponde a la pluvisilva montana distribuida entre (800 y 1500) m s. n. m. (metros sobre el nivel del mar) en la Sierra Maestra. ⁽¹²⁾ Esta formación vegetal se desarrolla en un contexto de topografía abrupta y fuertes gradientes ambientales. ^(20,21) La región constituye un sistema ecológico representativo del Caribe insular, adecuado para analizar respuestas ecosistémicas ante variaciones climáticas. ⁽²²⁾

La delimitación espacial del bosque se realizó mediante imágenes Sentinel-2 (2018) con resolución de 10 m, validadas con estudios de campo en 2021 y 2023. Se emplearon índices de vegetación y técnicas de clasificación supervisada y no supervisada. Se integraron variables geoespaciales como precipitación, temperatura, altitud, geología, orientación de pendientes y uso del suelo, junto con cartografía a escala 1:25 000 y datos altimétricos.

Las áreas de idoneidad ecológica (AIE) se definieron a partir de variables bioclimáticas del período 1970-2000 (WorldClim v2.1). ^(23,24) Se consideraron variables de precipitación (total anual, variabilidad intraanual y trimestres más y menos lluviosos) y de temperatura (media anual, intervalo térmico y trimestres más cálido y frío). La caracterización climática, edáfica y geomorfológica se realizó mediante estadística zonal con sistemas de información geográfica (SIG), utilizando ArcGIS v10.8.2. La altitud, pendiente y exposición se obtuvieron del modelo digital de terreno de GEOCUBA ⁽²⁵⁾

Los escenarios climáticos futuros se construyeron con proyecciones del CMIP6 (Proyecto de intercomparación de modelos acoplados). ⁽²⁴⁾ Se seleccionaron los modelos

CanESM5-CanOE y MIROC-ES2L por su representación de procesos acoplados y su rango térmico contrastante en el Caribe. ^(26,27) Según el atlas interactivo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), CanESM5-CanOE proyecta valores superiores al promedio multimodelo en SSP5-8.5 para 2100, mientras MIROC-ES2L se ubica por debajo, permitiendo analizar extremos térmicos divergentes. ^(28,29) Se consideraron 2 trayectorias socioeconómicas: mitigación (SSP1-2.6) y alta emisión (SSP5-8.5) para 2060 y 2100.

La modelación espacial integró capas ráster de temperatura y precipitación proyectadas con la cobertura vegetal en formato vectorial. Se aplicó estadística zonal para extraer parámetros descriptivos dentro del AIE (media, mínimo, máximo, moda y desviación estándar). La herramienta Raster calculator (ArcGIS v10.8.2) permitió estimar variaciones entre condiciones actuales y proyectadas, identificando cambios en la distribución potencial del ecosistema y su vulnerabilidad en ambos horizontes temporales.

RESULTADOS

Variaciones en la precipitación

Para el horizonte temporal 2060 (2041-2060) se prevén variaciones en la precipitación. En el escenario de mitigación (SSP2-6), el modelo MIROC-ES2L proyecta valores anuales entre 1516 mm y 1986 mm (media: 1726 mm), con una reducción máxima de 124 mm respecto al período de referencia; el trimestre más lluvioso registra entre 581 mm y 753 mm, y el menos lluvioso entre 114 mm y 208 mm. Por su parte, el modelo CanESM5-CanOE estima rangos de 1607 mm a 2106 mm (media: 1830 mm), con un incremento máximo de 104 mm; el trimestre más lluvioso alcanza entre 602 mm y 778 mm, y el menos lluvioso entre 129 mm y 235 mm.

En el mismo horizonte temporal (2041-2060), bajo el escenario de alta emisión (SSP5-8.5), el modelo MIROC-ES2L proyecta precipitaciones anuales entre 1465 mm y 1918 mm (media: 1667 mm), con una reducción máxima de 192 mm; el trimestre más lluvioso registra entre 545 mm y 708 mm, y el menos lluvioso entre 109 mm y 199 mm. Por su parte, el modelo CanESM5-CanOE estima rangos de 1484 mm a 1956 mm (media: 1693 mm), con una reducción máxima de 154 mm; el trimestre más lluvioso presenta entre 574 mm y 745 mm, y el menos lluvioso entre 130 mm y 236 mm.

Para el horizonte temporal 2100 (2081-2100), en el escenario de mitigación (SSP2-6), el modelo MIROC-ES2L proyecta precipitaciones anuales entre 1494 mm y 1955 mm (media: 1701 mm), con una reducción máxima de 155 mm; el trimestre más lluvioso registra entre 578 mm y 749 mm, y el me-

nos lluvioso entre 112 mm y 203 mm. En el mismo escenario, el modelo CanESM5-CanOE estima rangos de 1626 mm a 2130 mm (media: 1853 mm), con un incremento máximo de 123 mm; el trimestre más lluvioso alcanza entre 607 mm y 785 mm, y el menos lluvioso entre 126 mm y 231 mm.

En el horizonte temporal 2100 (2081-2100), bajo el escenario de alta emisión (SSP5-8.5), el modelo MIROC-ES2L proyecta precipitaciones anuales entre 1279 mm y 1694 mm (media: 1460 mm), con una reducción máxima de 416 mm; el trimestre más lluvioso registra entre 515 mm y 676 mm, y el menos lluvioso entre 99 mm y 181 mm. Por su parte, el modelo CanESM5-CanOE estima rangos de 1073 mm a 1458 mm (media: 1245 mm), con una reducción máxima de 652 mm; el trimestre más lluvioso presenta entre 416 mm y 575 mm, y el menos lluvioso entre 132 mm y 239 mm.

Para el horizonte temporal 2060 (2041-2060), en el escenario de mitigación (SSP2-6), el modelo MIROC-ES2L proyecta temperaturas medias anuales entre 17,4 °C y 22,6 °C (media: 20,5 °C), con incrementos de hasta 2,0 °C; mientras que CanESM5-CanOE estima rangos de 17,9 °C a 23,2 °C (media: 21,1 °C), con aumentos de hasta 2,6 °C. En el escenario de alta emisión (SSP5-8.5), MIROC-ES2L proyecta valores entre 17,9 °C y 23,2 °C (media: 21,0 °C), con incrementos de hasta 2,5 °C, y CanESM5-CanOE entre 18,8 °C y 24,1 °C (media: 22,0 °C), con aumentos de hasta +3,4 °C.

Para el horizonte temporal 2100 (2081-2100), en el escenario de mitigación (SSP2-6), MIROC-ES2L proyecta temperaturas entre 17,3 °C y 22,6 °C (media: 20,4 °C), con incrementos de hasta 1,9 °C; mientras que CanESM5-CanOE estima rangos de 17,9 °C a 23,2 °C (media: 21,1 °C), con aumentos de hasta +2,5 °C. En el escenario de alta emisión (SSP5-8.5), MIROC-ES2L proyecta valores entre 19,8 °C y 25,1 °C (media: 22,9 °C), con incrementos de hasta 4,4 °C, y CanESM5-CanOE entre 21,5 °C y 26,8 °C (media: 24,7 °C), con aumentos de hasta 6,2 °C.

Pérdida de superficie de la Pluvilsilva montana

La reducción de la superficie ecológicamente idónea de la Pluvilsilva montana bajo distintos escenarios de emisión y horizontes temporales se resume en la tabla 1, donde se presentan las estimaciones de pérdida en km² y el porcentaje que representa, para los modelos MIROC-ES2L y CanESM5-CanOE.

Los resultados evidencian que la pérdida de superficie se intensifica hacia el horizonte temporal 2100, especialmente bajo el escenario de alta emisión. En este caso el modelo MIROC-ES2L proyecta reducciones superiores al 90 %, mientras que CanESM5-CanOE alcanza hasta el 99 %. En escenarios de mitigación las pérdidas superan el 28 % en MIROC-ES2L y el 53 % en CanESM5-CanOE.

DISCUSIÓN

Efectos del cambio climático sobre el área de idoneidad ecológica de la Pluvilsilva montana

La temperatura ambiental disminuye con la altitud a razón de 0,62 °C en la vertiente norte y 0,64 °C en la vertiente sur, con un promedio de 0,63 °C por cada 100 m de ascenso.⁽³⁰⁾ Considerando las proyecciones de los modelos de circulación global (MCG) que anticipan un incremento de esta variable climática en las próximas décadas, se analizan los posibles cambios en la distribución espacial de la Pluvilsilva montana.^(31,32) La incorporación de estos gradientes altitudinales resulta esencial para evaluar los efectos del cambio climático sobre la dinámica del ecosistema.⁽³³⁾

El aumento progresivo de la temperatura reducirá el espacio altitudinal donde se mantienen las condiciones óptimas para la pluvilsilva montana. A medida que los valores térmicos superen los umbrales fisiológicos de la vegetación, se producirá una contracción del área de idoneidad ecológica y un desplazamiento hacia cotas superiores.^(34,16,35) Este proceso limitará la continuidad espacial del bosque y afec-

Tabla 1. Pérdida proyectada de superficie de la Pluvilsilva montana en la Sierra Maestra bajo diferentes modelos climáticos, escenarios de emisión y horizontes temporales

Horizonte temporal	Modelo	Escenario	Pérdida	
			(km ²)	(%)
2060 (2041–2060)	MIROC ES2L	Mitigación (SSP2.6)	122,0	32,6
		Alta emisión (SSP5 8.5)	187,0	49,9
	CanESM5 CanOE	Mitigación (SSP2 6)	198,7	53,1
		Alta emisión (SSP5 8.5)	285,2	76,2
2100 (2081–2100)	MIROC ES2L	Mitigación (SSP2 6)	108,0	28,8
		Alta emisión (SSP5 8.5)	343,3	91,7
	CanESM5 CanOE	Mitigación (SSP2 6)	198,7	53,1
		Alta emisión (SSP5 8.5)	371,0	99,1

Nota: SSP- Shared Socioeconomic Pathways (trayectorias socioeconómicas compartidas)

tará interacciones ecológicas esenciales, como la regeneración natural y la estabilidad funcional del ecosistema. ⁽³⁶⁾

Para el horizonte temporal 2060 el modelo MIROC-ES2L proyecta una pérdida significativa de superficie de la Pluvilsilva montana. Como se muestra en la figura 1 bajo el escenario de mitigación el incremento de la temperatura media anual provocaría un desplazamiento altitudinal del límite inferior de aproximadamente 190 m s. n. m., reduciendo la superficie en 121,0 km², equivalente al 32,6 %. En el escenario de alta emisión el aumento térmico obligaría a una migración de 270 m s. n. m., con una reducción de 187,0 km², lo que representa una pérdida del 49,9 %. Esta disminución en la extensión del ecosistema compromete su estabilidad ecológica, afectando la biodiversidad y servicios esenciales como la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono.

El análisis del comportamiento de la precipitación en este modelo indica una disminución de los valores medios anuales, lo que refuerza la tendencia a la reducción del área de distribución del bosque. En el escenario de mitigación, la reducción anual sería de 35,5 mm, mientras que en el de alta emisión alcanzaría 94,3 mm. Las disminuciones en los trimestres más y menos lluviosos reducen la recarga hídrica y aumentan el estrés en especies sensibles, afectando procesos edáficos y biogeoquímicos fundamentales.

La combinación de calentamiento y reducción de precipitación limita la capacidad de adaptación del ecosistema y promueve desplazamientos altitudinales hasta donde lo permita la topografía del macizo. La altitud máxima constituye una barrera física que restringe la migración ascendente, aumentando la vulnerabilidad del bosque. Este escenario subraya la necesidad de estrategias de conservación y restauración ecológica que fortalezcan la resiliencia del ecosistema. ⁽³⁷⁾

Pérdida de superficie para el año 2100, según MIROC-ES2L

En el escenario de mitigación un incremento de 1,1 °C desplazaría el límite inferior en 175 m s. n. m., reduciendo la superficie en 108,0 km² (28,8 %). En el escenario de alta emisión, un aumento de 3,6 °C provocaría un desplazamiento de 571 m s.n.m. y una pérdida de 343,3 km² (91,7 %), como muestra la figura 2. Esta reducción de la superficie afectaría la biodiversidad y los servicios ecosistémicos esenciales, aumentando la vulnerabilidad de especies adaptadas a condiciones específicas de humedad y temperatura.

Las reducciones de precipitación proyectadas para 2100 son más pronunciadas que las de 2060. En el escenario de mitigación, la disminución anual sería de 60,3 mm, mientras que en el de alta emisión alcanzaría 301,2 mm. Estas reducciones afectan la disponibilidad de agua en el suelo, la productividad primaria y la regeneración, incrementando la susceptibilidad del ecosistema a la degradación.

El calentamiento y la disminución de precipitación alteran la estructura y funcionalidad del bosque, mientras que la topografía limita la migración altitudinal. Esto incrementa la fragmentación poblacional y reduce la capacidad de persistencia del ecosistema.

Pérdida de superficie de la Pluvilsilva montana para el año 2060, según CanESM5-CanOE

La figura 3 muestra que, bajo un escenario de mitigación, un incremento de 1,8 °C desplazaría el límite inferior en 286 m s.n.m., reduciendo la superficie en 198,7 km² (53,1 %). En el escenario de alta emisión, un aumento de 2,7 °C provocaría un desplazamiento de 429 m s. n. m. y una pérdida de 285,2 km² (76,2 %).

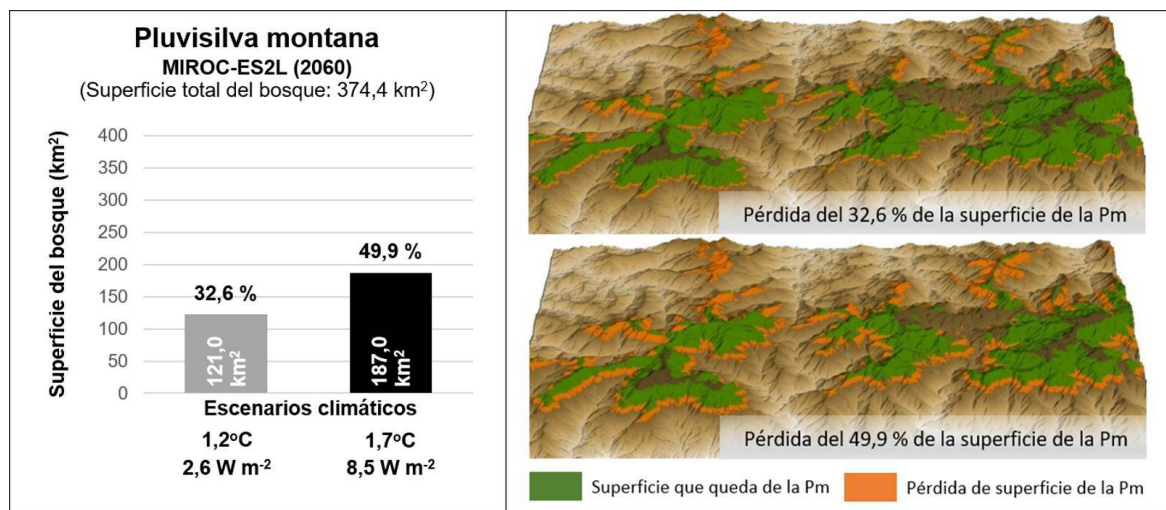


Fig. 1. Pérdida de superficie de la Pluvilsilva montana según MIROC-ES2L (2060). Fuente: Autor 2025.

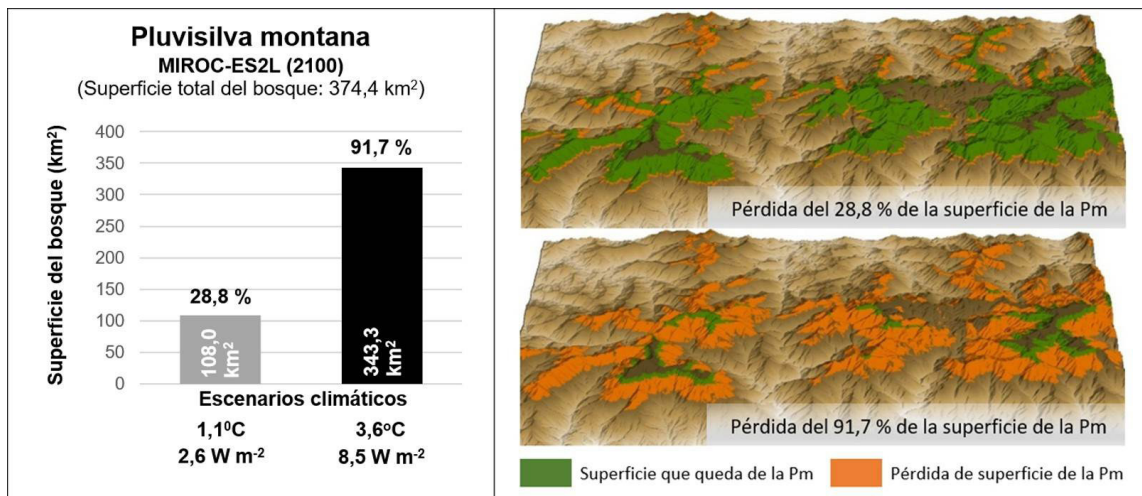


Fig. 2. Pérdida de superficie de la Pluvilsilva montana según MIROC-ES2L (2100). Fuente: Autor, 2025.

Las variaciones de precipitación proyectadas por este modelo muestran un ligero aumento anual en el escenario de mitigación (69,3 mm) y una reducción en el de alta emisión (-67,9 mm). Aunque los incrementos en el trimestre menos lluvioso podrían amortiguar parcialmente el estrés hídrico, no compensan la pérdida de superficie derivada del calentamiento. Las alteraciones en la precipitación afectan la disponibilidad de agua, la productividad primaria y la estabilidad de los ciclos biogeoquímicos.⁽³⁷⁾ La combinación de cambios térmicos e hídricos conduce a una reducción significativa del área óptima del bosque, con implicaciones para la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y la biodiversidad.

Pérdida de superficie de la Pluvilsilva montana para el año 2100

Según CanESM5-CanOE en el escenario de mitigación, un incremento de 1,8 °C desplazaría el límite inferior en 286 m s. n. m., reduciendo la superficie en 198,7 km² (53,1 %). En el escenario de alta emisión, un aumento de 5,4 °C provocaría un desplazamiento de 857 m s. n. m. y una pérdida de 370,9 km² (99,1 %), como se observa en la figura 4.

Las proyecciones de precipitación muestran un aumento anual de 92,1 mm en el escenario de mitigación, mientras que en el de alta emisión la reducción sería de 515,8 mm. Esta disminución extrema generaría un déficit hídrico severo, afectando la regeneración y acelerando procesos de degradación.

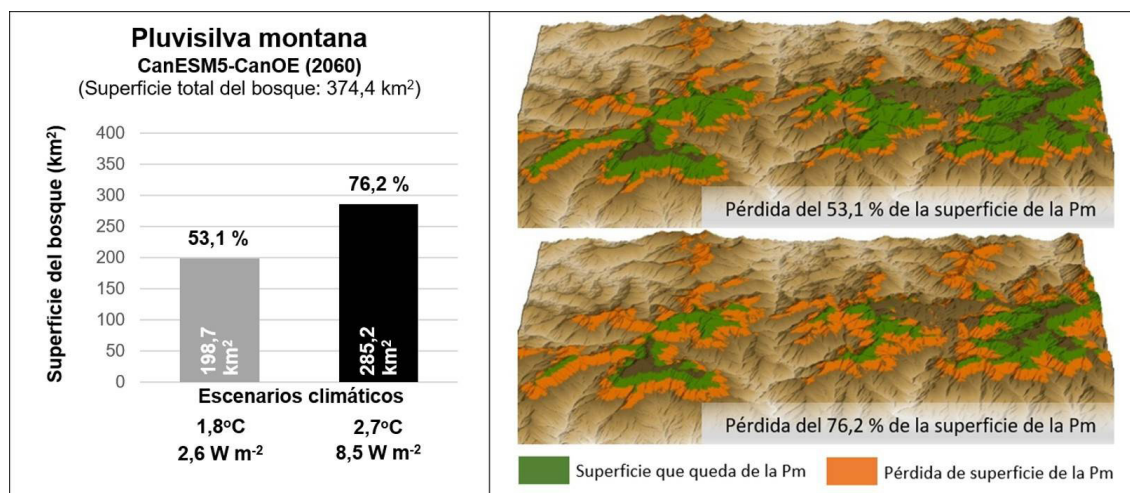


Fig. 3. Pérdida de superficie de la Pluvilsilva montana según CanESM5-CanOE (2060). Fuente: Autor, 2025.

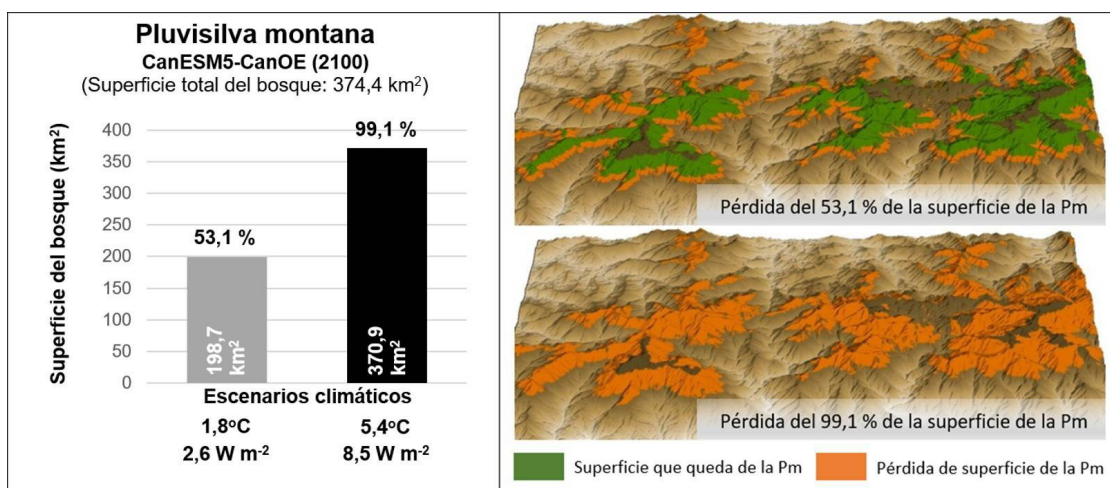


Fig. 4. Pérdida de superficie de la Pluvisilva montana según CanESM5-CanOE (2100). Fuente: Autor, 2025.

Las variaciones en los trimestres más y menos lluviosos reflejan patrones contrastantes entre escenarios, pero en conjunto no compensan la pérdida de superficie derivada del calentamiento extremo. La reducción de la precipitación y el aumento térmico comprometen la estructura y funcionalidad del ecosistema, incrementando el riesgo de colapso ecológico.

En el trimestre menos lluvioso, la precipitación proyectada difiere poco entre escenarios. En el de mitigación, el aumento sería de 17,9 mm, suficiente para atenuar el estrés hídrico en especies vulnerables. En el de alta emisión, el incremento alcanzaría 25,7 mm, insuficiente para compensar la reducción de 168,2 mm en el trimestre más lluvioso, lo que elevaría el riesgo de colapso ecológico.

Efectos del cambio climático sobre el funcionamiento ecológico de la Pluvisilva montana

Las proyecciones climáticas sugieren una variación en los niveles de precipitación que afectará la Pluvisilva montana según el escenario de emisiones previsto. La reducción de las lluvias, especialmente bajo escenarios de alta emisión, podría alterar los procesos ecológicos fundamentales del ecosistema. Modificaciones en los ciclos fenológicos, como floración, fructificación y dispersión de semillas, impactarían la regeneración y persistencia de la vegetación.⁽³⁷⁾ Estas alteraciones comprometerían la reproducción y supervivencia de las poblaciones, afectando su estabilidad ecológica. Asimismo, las variaciones en los patrones de precipitación podrían provocar cambios en la estructura y composición del bosque, afectando su dinámica funcional.

El incremento de la temperatura también influirá en la funcionalidad ecológica de la Pluvisilva montana, afectando la actividad de organismos descomponedores, la acumula-

ción de materia orgánica y la regeneración natural del ecosistema. Aumento de la evapotranspiración y variaciones fenológicas podrían inducir cambios significativos en la dinámica forestal. De acuerdo con el IPCC, los incrementos térmicos esperados podrían generar una mayor incidencia de incendios forestales, además de favorecer la proliferación de plagas y enfermedades.⁽³⁹⁾ Estos efectos en cascada podrían debilitar la capacidad del bosque para mantener su equilibrio ecológico, aumentando su vulnerabilidad a disturbios climáticos prolongados.⁽³⁷⁾

Las proyecciones para 2100, según el MCG MIROC-ES2L, bajo un escenario de alta emisión advierten sobre una combinación de aumento de la temperatura media anual en 3,6 °C y una reducción de la precipitación de 301,2 mm anuales, lo que generaría efectos adversos en la funcionalidad ecológica del ecosistema. La interacción de estos factores podría comprometer procesos esenciales como la fotosíntesis, la evapotranspiración y la estabilidad estructural del bosque. La disminución de la capacidad adaptativa de la pluvisilva montana podría resultar en una pérdida significativa de biodiversidad y alterar los servicios ecosistémicos que proporciona, reduciendo su capacidad para sostener interacciones ecológicas esenciales.

La combinación de estas alteraciones climáticas incrementará el riesgo de pérdida de la Pluvisilva montana como ecosistema funcional. La degradación progresiva podría resultar en la desaparición de numerosas especies asociadas y afectar profundamente los servicios ecosistémicos del bosque. Incluso en escenarios de mitigación los cambios previstos tendrían impactos negativos en la dinámica ecológica del ecosistema. Ante esta situación es imprescindible adoptar medidas urgentes para frenar los efectos del cambio climáti-

co y proteger los bosques montanos considerados altamente vulnerables. La preservación de estos sistemas es de vital importancia para garantizar su resiliencia y la continuidad de los procesos ecológicos que sostienen la biodiversidad.

El Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) constituye el marco institucional y territorial fundamental para la conservación de la Pluvisilva montana jugando un rol trascendental en su resiliencia ante escenarios extremos; sus categorías de manejo proveen instrumentos diferenciados para proteger la integridad ecológica y conservar especies endémicas.^(22,38) Frente a las proyecciones de este estudio la delimitación estática de unidades protegidas resulta insuficiente, por lo que las figuras del SNAP deben orientarse a identificar y priorizar refugios climáticos y corredores altitudinales que permitan la persistencia y el desplazamiento de especies ante el aumento térmico y el déficit hídrico proyectados.^(38,39)

Para fortalecer la resiliencia de la Pluvisilva montana el SNAP debe priorizar la ampliación de zonas núcleo, la conectividad entre fragmentos y la delimitación de corredores altitudinales y áreas de amortiguamiento que reduzcan la fragmentación del hábitat.^(21,22) De manera complementaria, resulta pertinente identificar refugios microclimáticos y establecer reservas genéticas para las especies endémicas más vulnerables, junto con una zonificación dinámica basada en modelos de idoneidad ecológica. Asimismo, se requiere un monitoreo climático, fenológico y de regeneración que articule la investigación científica, la gobernanza local y la restauración ecológica orientada a la adaptación funcional del ecosistema.⁽⁴⁰⁾

Conclusiones

Las proyecciones climáticas revelan una pérdida severa de hábitat para la Pluvisilva montana, con reducciones hasta el 99 % en escenarios de alta emisión. Este desplazamiento altitudinal fragmenta la conectividad ecológica y limita la persistencia de especies endémicas, comprometiendo la integridad funcional del ecosistema y aumentando su vulnerabilidad frente a perturbaciones climáticas y antrópicas.

El cambio climático inducirá una reorganización de los ensamblajes funcionales, favoreciendo especies generalistas y reduciendo la diversidad filogenética. Esta transformación afectará funciones ecosistémicas esenciales como la regulación hídrica, la captura de carbono y la resiliencia postperturbación, lo que podría convertir al ecosistema en una fuente neta de emisiones de carbono, exacerbando los efectos del calentamiento global.

Recomendaciones

Frente a este escenario, resulta urgente implementar estrategias de conservación adaptativa y restauración eco-

lógica, priorizando la protección de refugios climáticos y el diseño de corredores altitudinales. La planificación territorial debe basarse en evidencia científica, integrando indicadores ecológicos en políticas públicas para mitigar impactos, fortalecer la gobernanza ambiental y garantizar la sostenibilidad a largo plazo del ecosistema montano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Harrison S, Franklin J, Hernandez RR, Ikegami M, Safford HD, Thorne JH. Climate change and California's terrestrial biodiversity. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2024;121(32):e2310074121. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.2310074121>
- He X, Ziegler AD, Elsen PR, Feng Y, Baker JCA, Liang S, *et al*. Accelerating global mountain forest loss threatens biodiversity hotspots. *One Earth* [Internet]. 2023;6(3):303-15. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oneear.2023.02.005>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, *et al.*, editors. *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; [Internet] 2021 [citado 15 ago 2025]:1-38. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf
- Kad P, Ha KJ, Lee SS, Chu JE. Projected Changes in Mountain Precipitation Under CO₂-Induced Warmer Climate. *Earths Future* [Internet]. 2023;11(10). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1029/2023ef003886>
- Urbach D, Körner C, Hilpold A. Mountain biodiversity under change. Amsterdam: Elsevier; [Internet] 2024:11-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822095-5.00002-4>
- Fuentes I, González-Oliva L, Baró I, González MT, Mancina CA. Efecto potencial del cambio climático sobre la distribución de plantas asociadas a bosques húmedos del oriente de Cuba. *Acta Bot Cubana*. 2019;218(2):160-70. Disponible en: <https://revistas-geotech.com/index.php/abc/article/view/295/240>
- Glushkova M, Zhiyanski M, Nedkov S, Yaneva R, Stoeva L. Ecosystem services from mountain forest ecosystems: conceptual framework, approach and challenges. *Silva Balcanica*. 2020 Jun 30;21(1):47-68. DOI: 10.3897/silvabalcanica.21.e54628 Disponible en: <https://silvabalcanica.pensoft.net/article/54628/list/8/>
- Pereira HM, Martins IS, Rosa IMD, Kim H, Leadley P, Popp A, *et al*. Global trends and scenarios for terrestrial biodiversity and ecosystem services from 1900 to 2050. *Science* [Internet]. 2024;384(6694):458-65. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1126/science.adn3441>
- Mori AS, Lertzman KP, Gustafsson L. Forest biodiversity and ecosystem services: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*. 2017;54(1):12-27. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- Zhang L, Wang J. Mountain biodiversity, species distribution and ecosystem functioning in a changing world. *Diversity (Basilea)* [Internet]. 2023;15(7):799. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/d15070799>
- Pant S, Bhat JA, Wani ZA, Satish KV, Negi VS. Editorial: mountainous forest ecosystems: challenges and management impli-

- cations. *Front For Glob Chang* [Internet]. 2023;6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3389/ffgc.2023.1300020>
12. Joel-Reyes O, Acosta-Cantillo F, Bergues-Garrido P. Maturity mountain rainforest syntaxa from Sierra Maestra, Eastern Cuba. *Rev politec* [Internet]. 2022;18(36):38-52. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.33571/rpolitec.v18n36a4>
 13. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press; 2023 [citado 22 may 2025]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1017/9781009325844>
 14. United Nations Environment Programme (UNEP). Adaptation Gap Report 2023: underfinanced. underprepared. inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed. Nairobi: UNEP; 2023 [citado 9 ago 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43796>
 15. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for policymakers. In: Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, *et al.*, editors. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge: Cambridge University Press; 2012 [citado 15 jun 2025]:1-19. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_FD_SPM_final.pdf
 16. Albrich K, Rammer W, Seidl R. Climate change causes critical transitions and irreversible alterations of mountain forests. *Glob Chang Biol*. 2020 [citado 26 jun 2025];26(7):4013-27. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/gcb.15118>
 17. Warren R, Price J, Jenkins R. Climate Change and Terrestrial Biodiversity. In: The impacts of climate change. Elsevier; 2021 [citado 3 sep 2025]:85-114. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822373-4.00025-2>
 18. Feeley KJ, Silman MR. Land-Use and Climate Change Effects on Population Size and Extinction Risk of Andean Plants. *Glob Chang Biol* [Internet]. 2010;16(12):3215-22. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02197.x>
 19. Elith J, Leathwick JR. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu Rev Ecol Evol Syst* [Internet]. 2009;40(1):677-97. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
 20. Reyes OJ, Fornaris E. Características funcionales de los principales bosques de Cuba Oriental. *Polibotánica*. 2011;(32):89-105. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n32/n32a5.pdf>
 21. Reyes OJ, Ramón-Puebla AM. Principios para la rehabilitación y restauración de los bosques en la Sierra Maestra. *Ciencia en su PC*. 2021;1(3):49-68. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181370275004/html>
 22. Puebla AR, Rodríguez Cueto Y, Álvarez-Amargos PM. Propuesta de rutas de conectividad para la conservación de la biodiversidad en la Sierra Maestra, Cuba. *Rev Cienc Ambient* [Internet]. 2020;54(2):51-67. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.54-2.3>
 23. Fick SE, Hijmans RJ. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas: NEW CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS. *Int J Climatol* [Internet]. 2017 [citado 10 may 2025];37(12):4302-15. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5086>
 24. Future climate, 30 seconds spatial resolution-WorldClim 1 documentation [Internet]. Worldclim.org. [citado 10 may 2025]. Disponible en: https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim30s.html
 25. GEOCUBA. Mapa topográfico de la República de Cuba [shapefiles de ArcGIS]. La Habana: GEOCUBA; 2014.
 26. Swart NC, Cole JNS, Kharin VV, Lazare M, Scinocca JF, Gillett NP, *et al.* CCCma CanESM5-CanOE model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Earth System Grid Federation; 2019 [citado 2 sep 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10276>
 27. Hajima T, Watanabe M, Yamamoto A, Tatebe H, Noguchi MA, Abe M, *et al.* Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geosci Model Dev* [Internet]. 2020;13(5):2197-244. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>
 28. IPCC AR6-WGI atlas [Internet]. Ipcc.ch. [citado 24 jul 2025]. Disponible en: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information>
 29. Iturbide M, Fernández J, Gutiérrez JM, Pirani A, Huard D, Al Khour-dajie A, *et al.* Implementation of FAIR principles in the IPCC: the WGI AR6 Atlas repository. *Sci Data* [Internet]. 2022 [citado 16 jun 2025];9(1):629. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-022-01739-y>
 30. Montenegro U. Temperatura media anual. En: Atlas de Santiago de Cuba. Santiago de Cuba: Academia de Ciencias de Cuba; 1991. Mapa 26.
 31. Castillo R, Montero R, Amador y Ana María Durán J. Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística [Internet]. *Rev Climatol*. 2018;18:1-12. [citado 21 jul 2025]. Disponible en: <https://www.climatol.eu/reclim/reclim18a.pdf>
 32. Firpo MÂF, Guimarães B dos S, Dantas LG, Silva MGB da, Alves LM, Chadwick R, *et al.* Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. *Front Clim* [Internet]. 2022 [citado 3 sep 2025];4(948499). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3389/fclim.2022.948499>
 33. Schöner W, Pepin N, Arnone E, Gobiet A, Haslinger K, Kotlarski S, *et al.* Elevational patterns of climate change-an assessment of temperature and precipitation for the mountain regions of the world [Internet]. 2022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11304>
 34. Gebeyehu MN. Review on effect of climate change on forest ecosystem. *Int J Environ Sci Nat Resour* [Internet]. 2019 [citado 25 ago 2025];17(4). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.19080/ijesnr.2019.17.555968>
 35. Ulises R-SH, Lucia F-MA. Impacts of climate change on forest resources in Mexico: Regional projections and vulnerabilities. *J Geogr Environ Earth Sci Int* [Internet]. 2024;28(12):67-93. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i12849>
 36. Hong J, Lu X, Ma X, Wang X. Five-year study on the effects of warming and plant litter quality on litter decomposition rate in a Tibetan alpine grassland. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;750(142306):142306. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142306>
 37. Brodie JF, Redford KH, Doak DF. Ecological function analysis: Incorporating species roles into conservation. *Trends Ecol Evol* [Internet]. 2018;33(11):840-50. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2018.08.013>

38. Centro Nacional de Áreas Protegidas y Dirección General de Medio Ambiente CITMA. Plan del Sistema Nacional de Áreas Protegidas 2023-2030, Ministerio de Ciencias Tecnología y Medio Ambiente, la Habana, Cuba. 2023. 47 pp.
39. Decreto-Ley 83/2024 "Del Sistema Nacional de Áreas Protegidas". Gaceta Oficial de la República de Cuba. 2024;23:139-57. Reyes OJ, Ramón-Puebla AM. Principios para la rehabilitación y restauración de los bosques en la Sierra Maestra. Ciencia en su PC. 2021;1(3):49-68.
40. Hernández Rodríguez M, Cruz Flores DD. Cobertura de vegetación natural en Parques Nacionales de Cuba: análisis multitemporal y variación futura de las condiciones bioclimáticas. Rev Jard Bot Nac. 2016;37:93-102.

Recibido: 4/09/2025

Aprobado: 5/05/2026

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. C. Liliana Gómez Luna del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) por su apoyo incondicional y acertadas recomendaciones.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos, ni con la investigación presentada, ni con la institución que representa.

Contribuciones de los autores

- Conceptualización: Euclides Fornaris Gómez
- Curación de datos: Euclides Fornaris Gómez
- Análisis formal: Euclides Fornaris Gómez, Orlando Joel Reyes Domínguez, Luz Margarita Figueredo Cardona

- Investigación: Euclides Fornaris Gómez, Orlando Joel Reyes Domínguez, Luz Margarita Figueredo Cardona
- Metodología: Euclides Fornaris Gómez
- Recursos: Euclides Fornaris Gómez
- **Software:** Euclides Fornaris Gómez
- Supervisión: Euclides Fornaris Gómez, Luz Margarita Figueredo Cardona, Orlando Joel Reyes Domínguez
- Validación: Euclides Fornaris Gómez, Luz Margarita Figueredo Cardona, Orlando Joel Reyes Domínguez
- Visualización: Euclides Fornaris Gómez
- Redacción-borrador original: Euclides Fornaris Gómez
- Redacción-revisión y edición: Euclides Fornaris Gómez, Orlando Joel Reyes Domínguez, Luz Margarita Figueredo Cardona

Financiamientos

No se utilizó financiamiento específico para realizar la investigación presentada.

Cómo citar este artículo

Fornaris Gómez E, Orlando Joel Reyes Domínguez OJ, Figueredo Cardona LM, Cambio climático y estabilidad ecológica de la pluvisilva montana en la Sierra Maestra, Cuba *et al.* An Acad Cienc Cuba [Internet] 2026 [citado en día, mes y año];16:e3160. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/3160>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2026.

