

*Cartografía Climática Integrada Para La Adaptación Y Conservación Del Gran Humedal Del Norte De Ciego De Ávila**Integrated Climate Mapping For The Adaptation And Conservation Of The Gran Humedal Del Norte De Ciego De Ávila***Autores**

Yaneth Coromoto Azuaje de Rodríguez

Geógrafa, Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila

yaneth.gal1984@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-2040-6891>

Lázaro Osvaldo Rodríguez Montes de Oca

Lic. Farmacia, Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila

lazaro1980.ga@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-8456-627>

Daylon Fundora Caballero

M.Sc., Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila

daylonfc22@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0386-3453>

Artículo de Investigación

Cartografía Climática Integrada Para La Adaptación Y Conservación Del Gran Humedal Del Norte De Ciego De Ávila

RESUMEN

Este estudio desarrolló una cartografía climática integrada para diagnosticar la vulnerabilidad del Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA) ante el cambio climático. Mediante el uso de QGIS, se procesaron datos de precipitación de 50 estaciones meteorológicas (períodos 1961-2000 y 2001-2020) aplicando el método de interpolación geoestadística de Kriging Ordinario para generar mapas de isoyetas. Este análisis reveló una significativa reconfiguración espacial de las lluvias, caracterizada por una contracción de las isoyetas y una marcada reducción de los acumulados pluviométricos en el período reciente, especialmente en la franja costera norte. Los resultados demuestran que esta disminución de la precipitación actúa en sinergia con el ascenso del nivel medio del mar, amplificando amenazas críticas como la intrusión salina en acuíferos y suelos, y el retroceso de la línea de costa. La cartografía generada identifica espacialmente las zonas de máxima vulnerabilidad, constituyendo una herramienta fundamental para priorizar acciones de adaptación multisectoriales. Se concluye que la metodología aplicada es replicable y ofrece una base sólida para la planificación de estrategias de conservación y adaptación en humedales costeros tropicales del Caribe.

Palabras clave: adaptación, cambio climático, cartografía climática, humedal, resiliencia

ABSTRACT

This study developed integrated climate mapping to diagnose the vulnerability of the Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA) to climate change. Using QGIS, precipitation data from 50 meteorological stations (periods 1961-2000 and 2001-2020) were processed by applying the Ordinary Kriging geostatistical interpolation method to generate isohyet maps. This analysis revealed a significant spatial reconfiguration of rainfall, characterized by a contraction of the isohyets and a marked reduction in rainfall accumulation in the recent period, especially in the northern coastal strip. The results demonstrate that this decrease in precipitation acts in synergy with mean sea-level rise, amplifying critical threats such as saltwater intrusion into aquifers and soils, and coastal retreat. The generated mapping spatially identifies the areas of maximum vulnerability, constituting a fundamental tool for prioritizing multisectoral adaptation actions. It is concluded that the applied methodology is replicable and provides a solid basis for planning conservation and adaptation strategies in tropical coastal wetlands of the Caribbean.

Keywords: adaptation, climate change, climate mapping, wetland, resilience

Nota Editorial: Recibido: 16 de Septiembre 2025 Aceptado: 16 de diciembre 2025

1. INTRODUCCIÓN

El Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA), fue declarado sitio Ramsar de importancia Internacional (Nº1235) el 18 de Noviembre del 2002 [1]. Ubicado en la región septentrional de la provincia cubana de Ciego de Ávila, abarca 2,268.75 km². Como humedal costero desempeña funciones ecológicas vitales reconocidas, como la regulación de inundaciones, la recarga de acuíferos, sostiene biodiversidad endémica (incluyendo aves migratorias y manglares), y provisión de recursos pesqueros [2].

Los sistemas de humedales son vulnerables y particularmente susceptibles a cambios en la cantidad y calidad del suministro de agua. Parece que el cambio climático puede tener su efecto más pronunciado en los humedales a través de alteraciones en los regímenes hidrológicos: específicamente, la naturaleza y variabilidad del hidropérido y el número y severidad de eventos extremos [3]. Estas amenazas comprometen tanto su integridad ecológica como los medios de vida de comunidades locales dependientes de sus servicios ecosistémico para actividades agrícolas, pesqueras y turísticas.

Ante este escenario, la cartografía climática integrada constituye una herramienta multidisciplinaria fundamental. Combina datos satelitales, estaciones meteorológicas, modelos predictivos y conocimientos tradicionales para generar análisis espaciotemporales de algunas variables clave (precipitación, intrusión salina e intrusión de costa). Su aplicación permite diagnosticar vulnerabilidades y diseñar respuestas adaptativas basadas en evidencia. Además de garantizar la sostenibilidad del patrimonio natural, traduciendo los hallazgos cartográficos en planes de adaptación que aseguren la conservación del humedal y la viabilidad socioeconómica de las poblaciones vinculadas a él.

Los estudios hidroquímicos realizados hasta el momento en el GHNCA relacionan los cambios de salinidad, que se basan en las precipitaciones para la zona, en las temporadas de seca y lluvia, con lo que se demuestra la influencia que tienen las precipitaciones sobre los niveles de salinidad entre bahía interior -zona inundable – acuífero [4].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque metodológico de análisis espacial integrado, combinando la recopilación, procesamiento y modelado de datos climáticos e hidrológicos con técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología se estructuró en cuatro componentes principales: (1) recopilación de datos, (2) procesamiento de datos de precipitación e interpolación, (3) integración de modelos de amenazas costeras, y (4) análisis de vulnerabilidad integrada.

2.1. RECOPIACIÓN DE DATOS

Se recopilaron datos de precipitación media anual y mensual correspondientes a un período histórico de 60 años, dividido en dos intervalos para el análisis comparativo: 1961-2000 y 2001-2020. El conjunto de datos, proporcionado por el Centro Meteorológico Provincial (CMP) y la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciego de Ávila (EAHCA), incluyó información de 50 estaciones meteorológicas (Figura 1), garantizando una cobertura espacial adecuada para el área de estudio. Adicionalmente, se utilizaron los siguientes insumos:

Modelos de intrusión salina: Se emplearon mapas de intrusión salina actual y proyectada para el año 2100, desarrollados a partir de estudios hidrogeológicos previos en la región, relación con la precipitación y la posición de la cuña salina [4]. Esta información fue procesada y adaptada espacialmente para el ámbito específico del GHNCA mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica.

Proyecciones de Ascenso del Nivel Medio del Mar (NMM): Se utilizaron los escenarios de ascenso del NMM de 27 cm para 2050 y 85 cm para 2100, basados en los reportes del IPCC [5] y contextualizados para la región del Caribe.

Modelos de retroceso de la línea de costa: Las proyecciones de intrusión costera para los escenarios 2050 y 2100 se obtuvieron a partir de modelos batimétricos y topográficos, aplicando el método Bruun ampliamente utilizado para estimar la erosión costera inducida por el ascenso del nivel del mar.

El procesamiento de los datos y la generación de la cartografía se realizó utilizando el software QGIS (versión 3.28 o superior), un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto. Para la creación de los mapas de isoyetas (líneas de igual precipitación) para los períodos 1961-2000 y 2001-2020, los datos puntuales de las estaciones meteorológicas fueron interpolados utilizando el método geoestadístico de "Kriging Ordinario".

La elección de esta técnica sobre otros métodos de interpolación deterministas (como el Inverse Distance Weighting - IDW) se basó en su capacidad como estimador óptimo que minimiza la varianza del error de predicción (Best Linear Unbiased Predictor - BLUP) y su manejo de la autocorrelación espacial a través del semivariograma, lo que permite capturar patrones direccionales (anisotropía) cruciales para variables climáticas.

Se reconoce que el método de Kriging requiere una distribución espacial representativa de los puntos de datos. Para garantizar la robustez del modelo, se realizó un análisis exploratorio de datos que incluyó la evaluación de valores atípicos. Posteriormente, se construyó y modeló el semivariograma experimental para definir la estructura de dependencia espacial de la precipitación. La calidad de la interpolación fue validada mediante validación cruzada, obteniéndose valores satisfactorios de error cuadrático medio normalizado. Finalmente, se ejecutó la interpolación para generar superficies continuas de precipitación con una resolución de celda de 100 m, a partir de las cuales se derivaron las curvas de nivel de isoyetas.

Es importante destacar que en los procesos de interpolación geoestadística mediante Kriging Ordinario, pueden ocurrir discrepancias menores entre valores puntuales de estaciones específicas y su representación en mapas continuos. Esto se debe a que el método optimiza la estimación espacial considerando la autocorrelación entre estaciones, lo que puede resultar en un suavizado de valores extremos. Estas variaciones, típicamente menores al 15%, no comprometen la validez de los patrones espaciales identificados ni de las tendencias temporales analizadas.

Los datos de precipitación del periodo 1961-2000 fueron sometidos a un proceso de validación mediante la comparación con las estaciones referente al periodo 2001-2020. Se identificó discrepancia en la escala de valores y estaciones con coordenadas idénticas. La corrección se realizó mediante el método de homogeneización por estaciones de referencia [6]. Se calculó un factor de corrección como promedio de las relaciones entre valores de estaciones comunes entre periodos. Los valores resultantes fueron validados con la climatología regional documentada (INMET, datos históricos), mostrando coherencia con los rangos de precipitación anual esperados para la región norte de Cuba (1,000-1,800 mm).

Para evaluar las amenazas climáticas sobre el GHNCA se integraron tres componentes metodológicos interrelacionados:

1. Proyecciones de Ascenso del Nivel Medio del Mar (NMM) y Retroceso Costero: Los escenarios de +27 cm (2050) y +85 cm (2100) se basaron en las proyecciones regionales para Cuba del IPCC [5]. El retroceso de la línea de costa se modeló aplicando la regla geomorfológica de [7], ampliamente utilizada para estimar la erosión costera inducida por el ascenso del nivel del mar en perfiles de playa arenosa. Este modelo considera el balance sedimentario y la pendiente del perfil submarino, proyectando la traslación tierra adentro del perfil de equilibrio. Los mapas resultantes (Figuras 5 y 6) identifican las zonas de mayor riesgo de inundación permanente y pérdida de territorio.
1. Modelado de la Intrusión Salina: La vulnerabilidad de los acuíferos costeros a la intrusión salina se evaluó mediante un modelo conceptual hidrogeológico que integra las proyecciones de NMM con la reducción observada en la recarga de agua dulce (derivada del análisis de isoyetas). Este modelo, adaptado de estudios previos en la región [4], simula el avance de la cuña salina en función de la presión hidrostática marina y la disminución del flujo de agua dulce continental.
1. Validación con Sondeos Eléctricos Verticales (SEV): ejecutado en el año 2017 por la brigada de geofísica de la Empresa de Proyectos e Investigaciones de Camagüey. Este estudio se realizó durante el período de sequía más intensa, con el objetivo de captar las condiciones hidrogeológicas críticas que favorecen la penetración del agua marina en el acuífero asociado al Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA).

La técnica SEV se basa en la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo mediante un arreglo de cuatro electrodos dispuestos en línea recta, utilizando la configuración Schlumberger. Dos electrodos externos inyectan corriente eléctrica, mientras que los dos electrodos internos miden la diferencia de potencial resultante. A medida que se incrementa progresivamente la separación entre los electrodos de corriente, la profundidad de investigación aumenta, permitiendo obtener un perfil vertical de resistividad aparente en función de la profundidad. Este método geofísico no invasivo permite determinar la variación vertical de la resistividad eléctrica del subsuelo parámetro estrechamente relacionado con la salinidad del agua subterránea.

La interpretación de los perfiles se fundamenta en el contraste eléctrico entre los materiales del subsuelo. El agua dulce presenta alta resistividad (valores típicos $> 20 \Omega \cdot m$), mientras que el agua salina es altamente conductiva, con resistividades generalmente inferiores a $5 \Omega \cdot m$. La identificación de capas con valores de resistividad bajos ($< 5 \Omega \cdot m$) en zonas costeras se interpretó como evidencia de intrusión salina, permitiendo delimitar la interfaz agua dulce-agua salada y estimar el espesor del acuífero vulnerable.

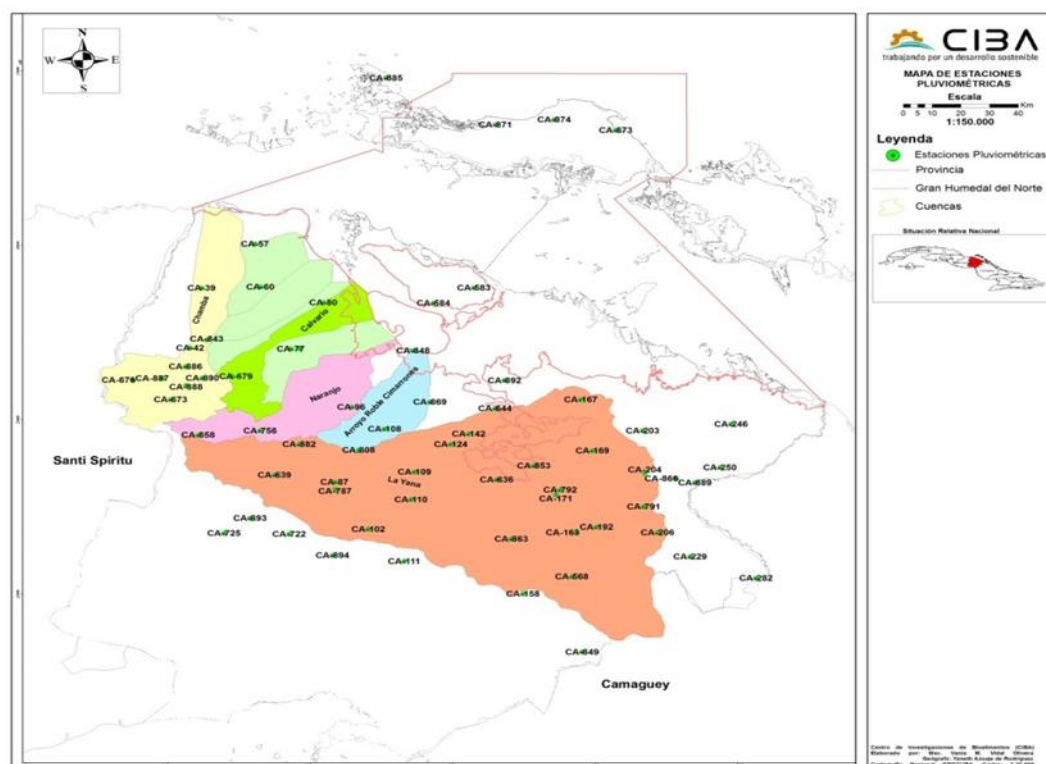


Fig. 1- representación espacial de las estaciones meteorológicas en Ciego de Ávila y el área que ocupan las cuencas del GHNCA.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre los períodos 1961-2000 (con datos corregidos) y 2001-2020 (Figuras 2 y 3) revela una transformación significativa en el régimen pluviométrico del GHNCA. El período histórico corregido (1,022-2,084 mm) presenta en sus mapas de isoyetas una configuración expansiva, con núcleos máximos superiores a 1,800 mm en las cuencas altas de los ríos Chambas y Calvario que se extendían gradualmente hacia la costa norte. En contraste, el período reciente (718-1,542 mm) muestra en su cartografía una contracción notoria de las isoyetas hacia el sur, con la desaparición completa de los valores superiores a 1,500 mm y una marcada reducción en la franja costera norte. Esta coherencia entre los valores tabulados y la representación espacial valida tanto la corrección aplicada como la severidad de la reconfiguración pluviométrica, esta reconfiguración espacial evidencia no solo una disminución cuantitativa sino una redistribución geográfica de la precipitación que tiene implicaciones críticas para la recarga de acuíferos y la sostenibilidad de los ecosistemas del humedal.

Tabla 1- Ubicación geográfica de la Red Pluviométrica de Ciego de Ávila y sus valores de precipitación media entre en el período 1961-2000. (Coordenadas UTM, Zona 16 N, Datum WGS84).

Nº	Nombres	Coordenadas (X)	Coordenadas (Y)	Precipitación (mm)
1	La Troza	701532	224954	1702.6
2	Ramona	714700	272600	1163.6
3	Lola	714491	207717	2084.2
4	La Ignacia	717885	217853	1818.2
5	La Mariana	716500	211900	1929.8
6	Corrales No.3	722200	280200	1022.0
7	Dos Hermanas	722950	272800	1176.3
8	Batey Adelaida	727208	262127	1344.1
9	T. Venezuela	727788	214611	1745.1
10	Hanoi Heroico	731800	270100	1150.4
11	Ceballos	733340	239179	1465.8
12	La Esperanza	732100	212300	1719.0
13	El Barro	735700	252100	1239.7
14	Estación Isaca	738100	231100	1443.8
15	Bellamar	737300	216450	1643.4
16	Mijial	740400	248350	1281.6
17	Cacahuatl	744600	240950	1182.2
18	Los Angeles	744100	236200	1186.1
19	Jaqueyal	743150	225570	1652.7
20	Edden	749700	245700	1121.2
21	Colorado	746897	218409	1673.3
22	Batey Baraguá	745050	209150	1818.7
23	San Isidro	759850	219950	1085.8
24	La Victoria	767350	230500	1485.5
25	Fco. Roca	767950	253400	1201.1
26	San Antonio	769600	244600	1178.2
27	Estación Violeta	764452	237000	1070.4
28	Santa Mariana	776650	248050	1193.8
29	La Rea	776950	240700	1279.9
30	Caimito	778717	230512	1121.6
31	La Ofelia	783300	226350	1197.8
32	Tele-Yarual	789051	249189	1027.4
33	La 30 de Manga Larga	787500	241700	1190.4
34	Rev. Socialista	792550	222650	1104.4
35	Capellá	747382	202298	1088.5
36	Agrícola Pablo	766702	222919	1357.4
37	B. Comandancia	752937	272645	2040.1
38	El Salado	747253	270001	1436.2
39	Delia	756150	239600	1175.2
40	Campamento	724950	240400	1145.8
41	Cayo Guanál	755914	251869	1167.2
42	Guadalupe	710337	253400	1534.9
43	El Caobal	705050	256750	1124.0
44	Pozo Cabeza	718966	257395	1217.4
45	La Aguadita	727000	230250	1244.6
46	El Dátil	717850	230400	1147.5
47	Las Mercedes	711262	238002	1748.1
48	Santa Martha	759950	202600	1703.8
49	El Laurel	722900	248050	1509.2
50	Derramadero	704739	214722	1971.0

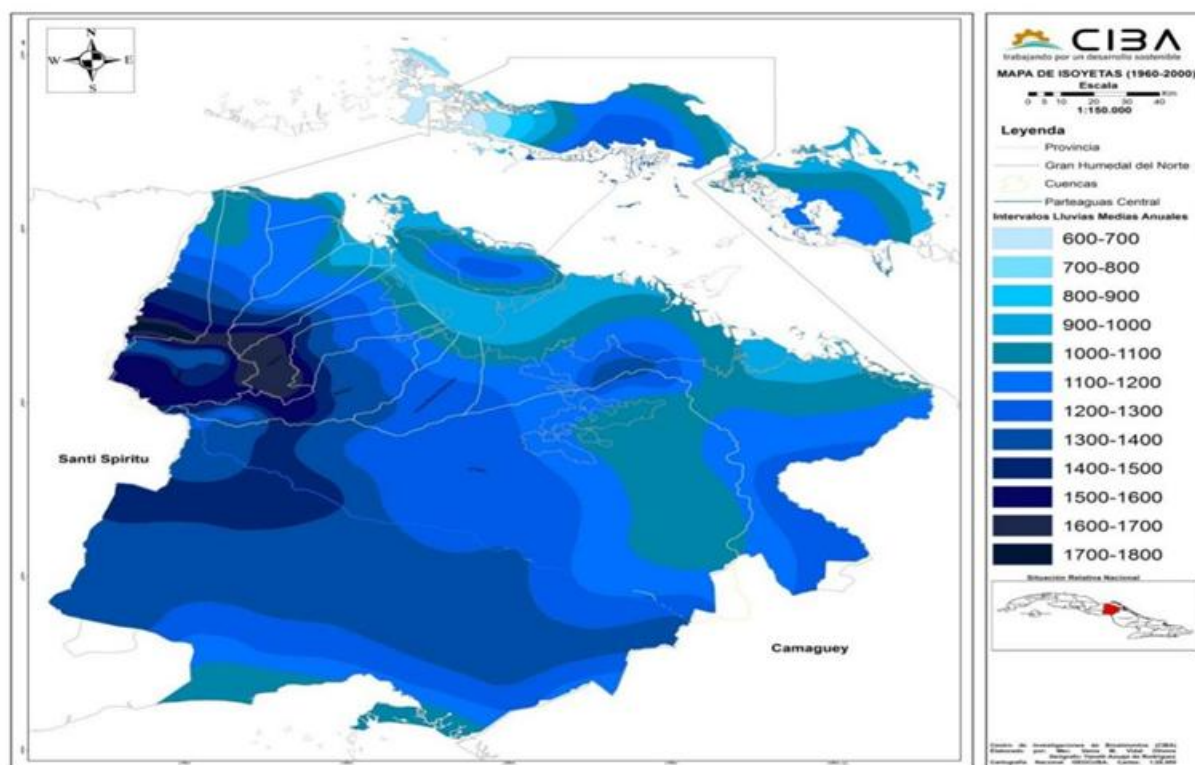


Fig. 2- Mapa Isoyético Provincial del comportamiento de las lluvias medias anuales período 1961-2000.
Fuente: Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciego de Ávila (EAHCA).

El nuevo mapa de isoyetas período 2001-2020 presenta un escenario pluviométrico radicalmente diferente, con un rango reducido de 718 a 1,542 mm que evidencia una contracción generalizada de los acumulados de lluvia. El mapa de isoyetas (Figura 3) muestra una alteración drástica del patrón espacial histórico, con la desaparición completa de las isoyetas superiores a 1,500 mm en las zonas que anteriormente registraban los máximos absolutos. La contracción hacia el sur es particularmente conspicua, dejando la franja costera norte con valores mínimos críticos, como se observa en estaciones CA-871 (718 mm) y CA-873 (723 mm) localizadas en el extremo noroccidental. Los núcleos máximos se han reducido y desplazado, con la estación CA-42 (1,542 mm) representando el nuevo techo pluviométrico, valor que queda muy por debajo de los máximos históricos.

Este fenómeno no es aislado y concuerda con las proyecciones de cambio climático para la región del Caribe, las cuales anticipan una mayor variabilidad e impredecibilidad en las lluvias, con tendencia a una generalizada reducción de la precipitación media, particularmente en las zonas costeras [5].

La marcada reducción pluviométrica en la franja costera (718-1,542 mm en 2001-2020 vs. 1,022-2,084 mm en 1961-2000), evidenciada por la contracción de las isoyetas hacia el sur (Figuras 2 y 3), establece la primera condición para un escenario de presión múltiple. Esta disminución en la recarga de agua dulce reduce la presión hidrostática en los acuíferos costeros, debilitando la barrera natural contra la intrusión salina.

La validación mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en transectos nororientales confirma esta vulnerabilidad. Los perfiles de resistividad obtenidos con configuración Schlumberger muestran valores consistentemente inferiores a $5 \Omega \cdot m$ a profundidades someras ($<15 m$), indicando la presencia de agua salina en el acuífero. Estos hallazgos geoelectrónicos correlacionan espacialmente con las áreas de mayor reducción pluviométrica y proporcionan evidencia empírica directa del avance de la cuña salina.

Este proceso se ve potenciado por el ascenso del nivel medio del mar (NMM), cuya proyección indica un retroceso significativo de la línea de costa para 2050 y 2100 (Figura 6). El modelo aplicado (regla de Bruun) proyecta una pérdida crítica de ecosistemas de manglar, los cuales actualmente constituyen la primera línea de defensa contra la erosión. La sinergia entre estos factores es evidente: la reducida recarga (documentada por los mapas de isoyetas) disminuye la presión de agua dulce, mientras que el NMM ascendente (Figura 5) incrementa la presión hidrostática marina, creando una "doble presión" que acelera la intrusión salina.

Los mapas integrados de vulnerabilidad (Figuras 4, 5 y 6) sintetizan estos resultados. El mapa de intrusión salina (Figura 4) muestra una expansión proyectada hacia el interior para 2100, coincidiendo espacialmente con: (1) las zonas de mínima precipitación actual (franja costera norte), (2) los sectores de mayor riesgo por ascenso del NMM, y (3) los transectos donde los SEV confirmaron bajas resistividades. Esta convergencia de evidencias cartográfica, modelada y geoelectrónica valida el modelo conceptual de intrusión salina y proporciona una base robusta para la identificación de zonas prioritarias de intervención.

La situación documentada para el GHNCA refleja patrones observados en otros humedales costeros tropicales, como el Delta del Mekong y los Everglades, donde la interacción entre cambios hidrológicos y ascenso del nivel del mar conduce a una salinización acelerada. Sin embargo, este estudio aporta un enfoque metodológico integrado que combina análisis histórico (isoyetas), proyecciones físicas (NMM, retroceso) y validación insitu (SEV), ofreciendo un diagnóstico más completo y espacialmente explícito de la vulnerabilidad.

La disminución pluviométrica, especialmente pronunciada en la franja costera, no solo implica un estrés hídrico directo para los ecosistemas del humedal, sino que actúa como un mecanismo amplificador de otras amenazas. La reducción en la recarga de acuíferos disminuye la presión hidrostática del agua dulce subterránea, facilitando la intrusión de la cuña salina, un proceso ya de por sí exacerbado por el ascenso del nivel del mar [8].

Tabla 2. Ubicación geográfica de la Red Pluviométrica por los sectores hidrogeológicos del GHNCA y sus valores de precipitación media entre en el período 2001-2020. (Coordenadas UTM, Zona 16 N, Datum WGS84).

Nº de estaciones	Coordenadas X	Coordenadas Y	Precipitación media (mm)
CA-39	714700	272600	1118.2
CA-42	713100	262300	1542.4
CA-57	722200	280200	1138.1
CA-60	722950	272800	937.1
CA-77	727208	262127	1378.3
CA-80	731800	270100	1235.2
CA-87	733340	239179	1328.3
CA-96	735700	252100	1378.6
CA-102	738100	231100	1302.8
CA-108	740400	248350	1403.5
CA-109	744600	240950	1224.2
CA-110	744100	236200	1407.1
CA-111	743150	225570	1360.1
CA-124	749700	245700	1131.6
CA-142	752200	247500	1147.1
CA-158	759850	219950	1170.1
CA-163	767350	230500	1221.5
CA-167	767950	253400	1197.8
CA-169	769600	244600	1219.3
CA-171	764452	237000	1170.0
CA-192	770150	231450	1177.7
CA-203	776650	248050	1183.1
CA-204	776950	240700	1308.2
CA-206	778717	230512	1187.6
CA-229	783300	226350	1248.9
CA-246	789051	249189	1020.4
CA-250	787500	241700	1168.7
CA-282	792550	222650	1236.9
CA-568	766702	222919	1237.3
CA-583	752937	272645	1184.5
CA-584	747253	270001	1153.5
CA-636	756150	239600	1265.1
CA-639	724950	240400	1436.7
CA-644	755914	251869	1166.0
CA-673	710337	253400	1423.5
CA-676	705050	256750	1406.6
CA-679	718966	257395	1270.6
CA-722	727000	230250	1196.7
CA-725	717850	230400	1414.0
CA-756	722900	248050	1418.9
CA-787	733445	237919	1292.3
CA-791	776801	234969	1081.0
CA-792	765040	237871	1121.2
CA-808	736756	244706	1252.1
CA-842	728468	262146	1304.6
CA-843	715400	263700	1342.4
CA-848	744403	261835	1231.8
CA-849	768150	209950	1335.6
CA-853	761350	242000	1229.3
CA-858	714233	247301	1312.0
CA-863	758200	229400	1061.4
CA-866	781363	239788	974.2
CA-869	746779	252982	1243.6
CA-871	755938	300719	718.1
CA-873	772847	299777	722.9
CA-874	764212	301596	936.4
CA-882	728400	245700	1305.6
CA-885	740580	308779	808.7
CA-886	712437	259088	1347.7
CA-887	709150	257050	1424.8
CA-888	712500	255850	1437.5
CA-889	784000	239100	1237.9
CA-890	714800	257100	1442.4
CA-892	757250	256700	1151.8
CA-893	721501	232991	1418.1
CA-894	733098	226594	1343.5

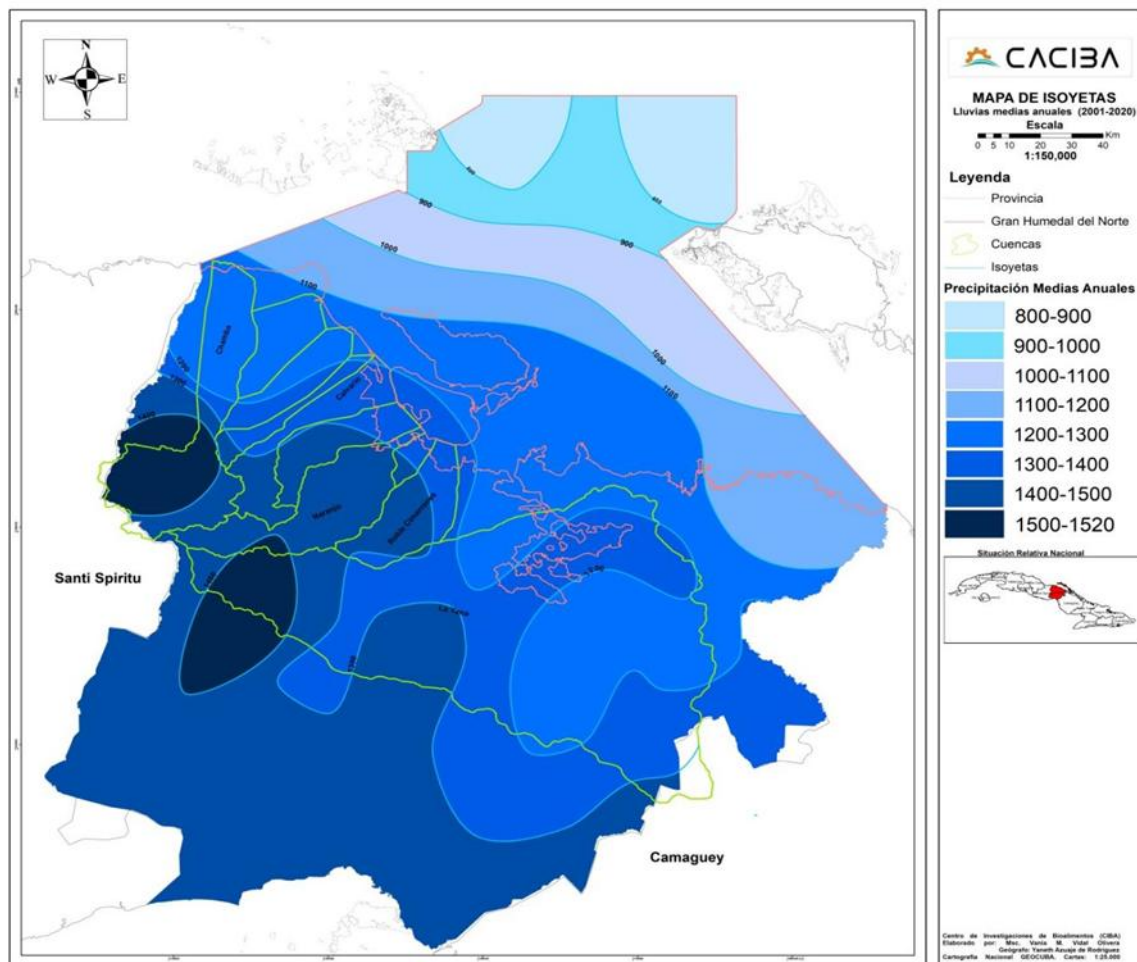


Fig. 3- Mapa Isoyético Provincial período 2001-2020.
Fuente: La Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Ávila (EAHCA)
 Intrusión salina y su conexión con el ascenso del nivel del mar.

El análisis integrado revela una conexión causal directa entre el ascenso del nivel medio del mar (NMM), la reducción de la precipitación y el avance de la intrusión salina en el GHNCA. Los mapas de intrusión salina (Figura 4), proyectados hasta el año 2100, muestran una expansión significativa de la cuña salina hacia los acuíferos costeros. Este avance no es aislado, sino el resultado de una sinergia de presiones climáticas.

Por un lado, el ascenso del NMM (27 cm para 2050, 85 cm para 2100; Figura 5) incrementa la presión hidrostática marina sobre los acuíferos, impulsando mecánicamente el agua salada hacia el interior [9]. Por otro lado, la drástica reducción de la precipitación en la franja costera (documentada en las Figuras 2 y 3) disminuye la recarga de agua dulce, debilitando la contrapresión hidráulica que la contrarresta. Esta situación de doble presión (mayor presión marina más menor presión continental) crea las condiciones ideales para una intrusión salina acelerada.

La evidencia empírica de este proceso se obtuvo mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con configuración Schlumberger. Los perfiles de resistividad en transectos costeros nororientales mostraron valores consistentemente inferiores a $5 \Omega \cdot m$ a profundidades someras (<15 m), lo que confirma la presencia de agua salina en el acuífero. Estos hallazgos geoelectrónicos validan espacialmente los modelos de intrusión salina y proporcionan una línea de base crítica para monitorear el avance futuro de la cuña salina. La coincidencia espacial entre las zonas de baja resistividad (SEV), mínima precipitación (isoyetas) y mayor riesgo por ascenso del NMM, consolida un diagnóstico robusto de vulnerabilidad hídrica para las comunidades y agricultura de la región (ej. municipios de Morón, Chambas).

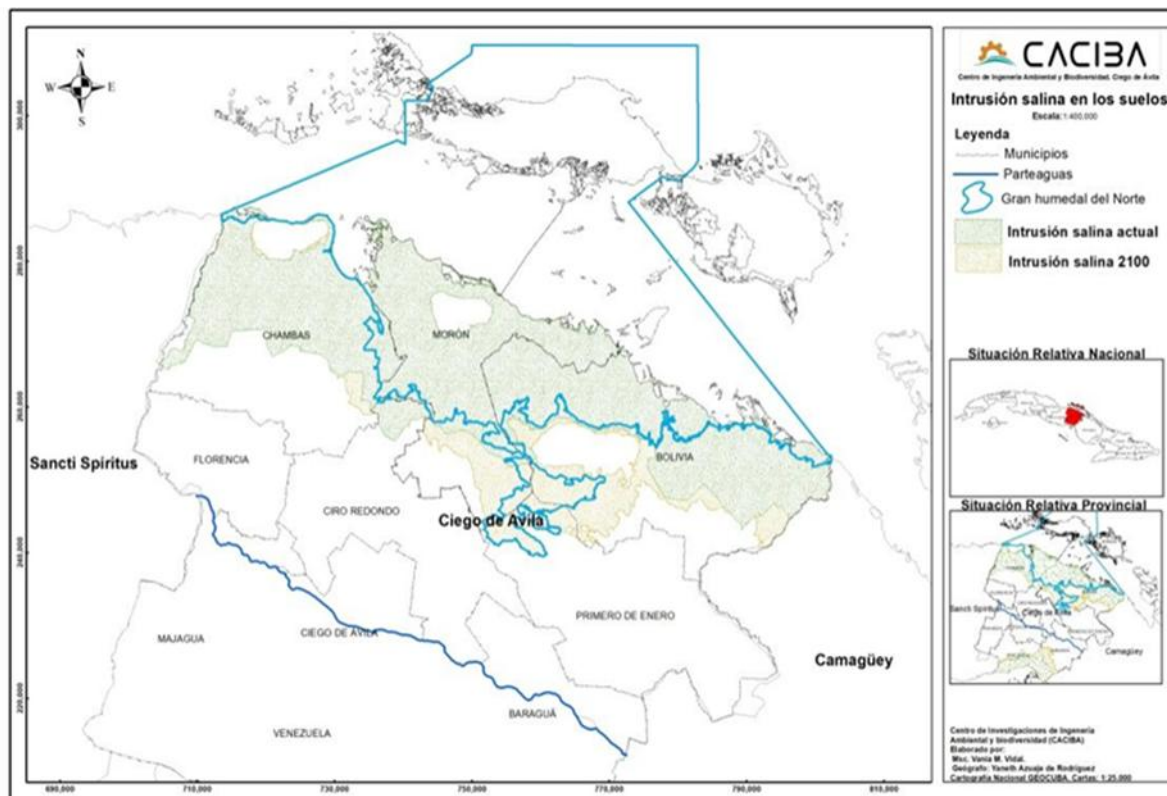


Fig. 4- Mapa de intrusión salina actual y para el 2100 en los suelos del GHNCA.

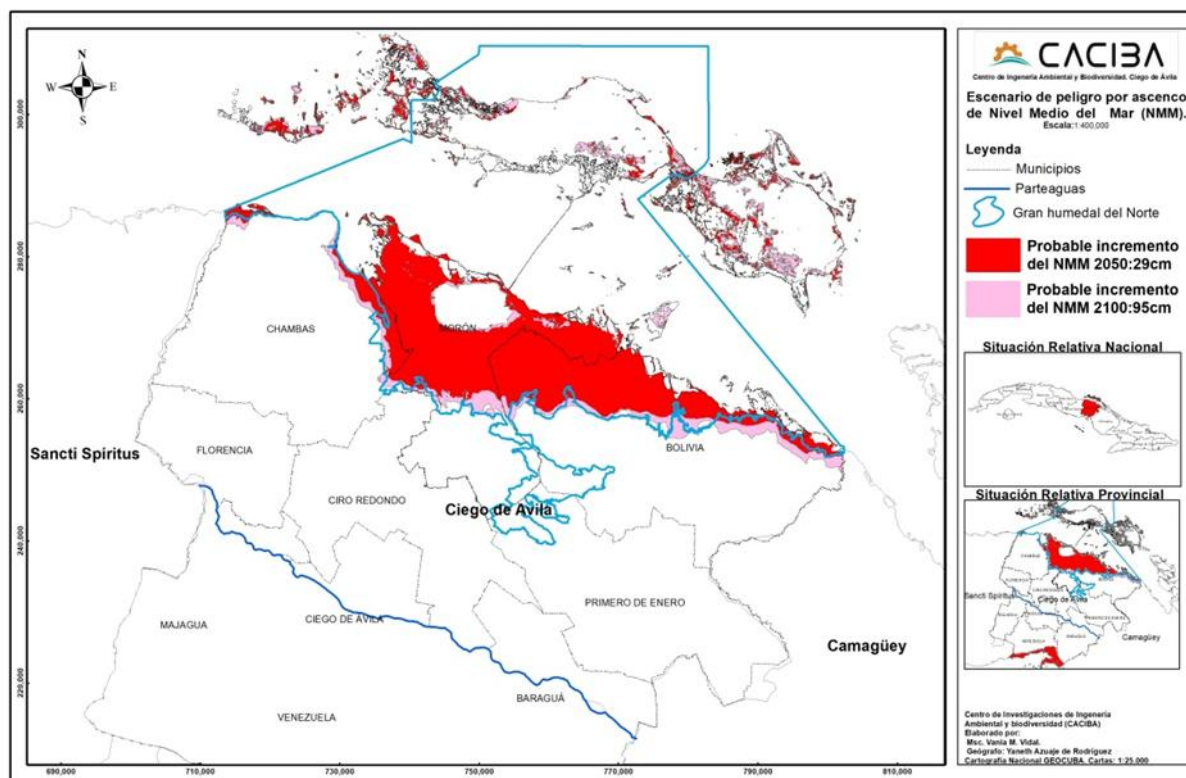


Figura 5: Mapa de peligro por ascenso del Nivel Medio del Mar para el GHNCA en escenarios 2050 y 2100.

Este escenario de "doble presión" (menos lluvia + mar más alto) ha sido observado en otros humedales costeros a nivel global. Por ejemplo, estudios en el Delta del Mekong en Vietnam [3]; [10], y en los Everglades de Florida, EE.UU [11]. Demuestran cómo la interacción entre la extracción de agua subterránea, la reducción del flujo de agua dulce continental y el ascenso del nivel del mar conduce a una salinización rápida y extensa de suelos y acuíferos, comprometiendo la viabilidad de los ecosistemas y las economías locales.

3.1. Intrusión de la línea de costa y pérdida de ecosistemas

La aplicación del modelo geomorfológico de Bruun para estimar el retroceso costero inducido por el ascenso del NMM proyecta una pérdida física crítica de territorio en el GHNCA (Figura 6). Este modelo, fundamentado en el equilibrio dinámico del perfil de playa, indica que el retroceso no es una simple inundación, sino una erosión activa donde el sedimento de la playa y duna se redistribuye para adaptar la pendiente costera al nuevo nivel del mar. Las proyecciones para 2050 y 2100 muestran un retroceso particularmente severo en sectores de baja pendiente topográfica.

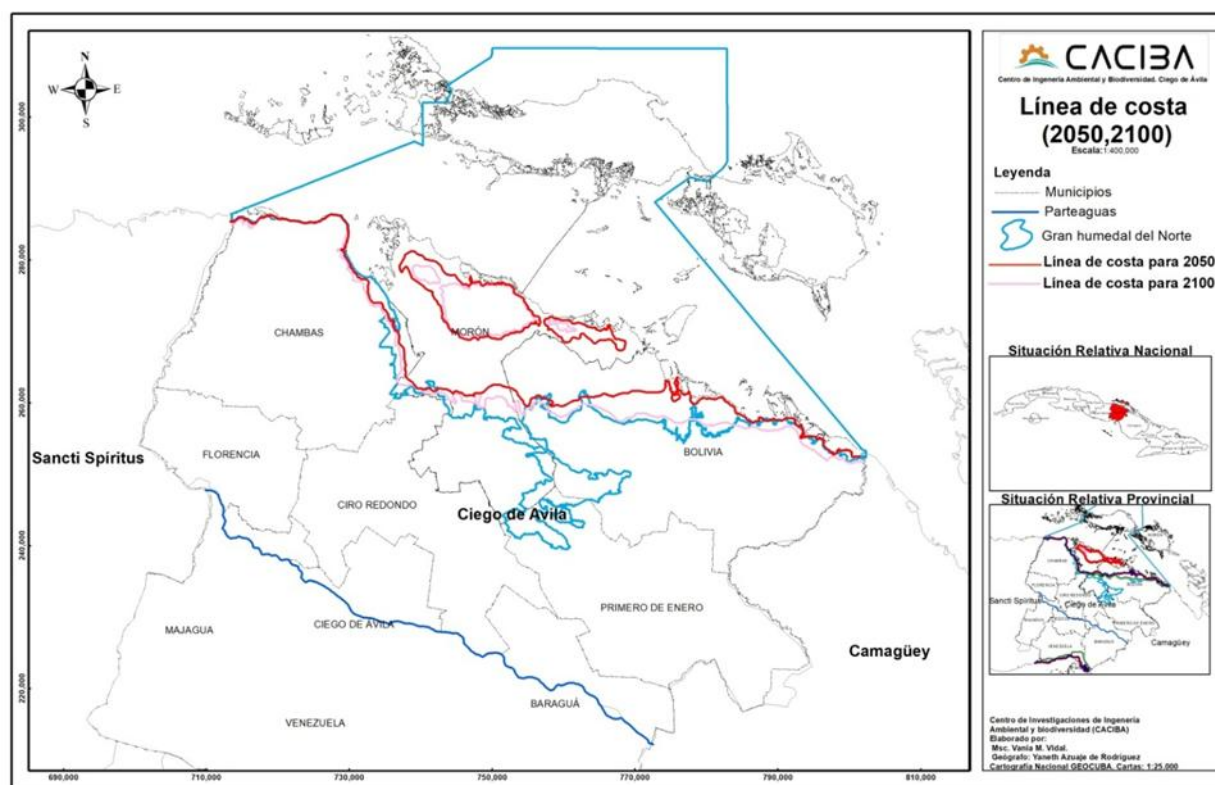


Fig. 6- Mapa de retroceso de línea de costa en el GHNCA para los escenarios 2050 y 2100.

La pérdida de línea de costa implica mucho más que un problema territorial; constituye la desaparición de la primera y más efectiva línea de defensa natural: los ecosistemas de manglar y praderas de pastos marinos. Estos ecosistemas, característicos del GHNCA, son ingenieros naturales que disipan la energía del oleaje, atrapan sedimentos y estabilizan la costa. Su inundación permanente o retroceso implica entre otras amenazas, pérdida de biodiversidad, reducción de la resiliencia costera y liberación de carbono.

El primer caso implica destrucción de hábitats de cría para peces, refugio para aves migratorias y residentes, y de una biodiversidad única adaptada a condiciones específicas de salinidad. En el caso de la reducción de la resiliencia costera, no existiría la barrera física y de amortiguamiento que proveen los manglares, por lo que el interior del humedal y las comunidades costeras se volverían más vulnerables a la energía del oleaje y a las marejadas asociadas a huracanes [12]. Por último, la consecuente liberación de carbono se explica debido a que los suelos de estos ecosistemas, especialmente las turberas en manglares, son sumideros de carbono altamente eficientes. Su inundación y degradación pueden conducir al incremento de la emisión de gases de efecto invernadero, creando un bucle de retroalimentación positiva con el cambio climático [13].

La situación documentada para el GHNCA es similar a la que ocurre en otros grandes deltas y humedales costeros del mundo, como el Sundarbans en India/Bangladesh [14] y el ya mencionado Delta del Mekong, donde la combinación de subsidencia, ascenso del nivel del mar y alteraciones hidrológicas aguas arriba, está provocando una pérdida masiva de territorio y la salinización de vastas áreas productivas.

4. CONCLUSIONES

El análisis mediante Kriging Ordinario de seis décadas de datos pluviométricos reveló una reconfiguración espacial y una reducción cuantitativa severa de las lluvias en el GHNCA, particularmente en su franja costera norte. Este nuevo régimen hídrico reduce drásticamente la recarga de los acuíferos, iniciando una cascada de impactos.

Se demostró que la reducción de la precipitación y el ascenso del nivel medio del mar actúan en sinergia, generando un escenario de "doble presión" que amplifica exponencialmente otras amenazas. La menor recarga de agua dulce reduce la presión hidrostática continental, mientras que el NMM ascendente aumenta la presión marina, acelerando tanto la intrusión salina en acuíferos y suelos como la erosión costera.

La aplicación combinada de cartografía climática (SIG/Kriging), modelado físico (regla de Bruun) y prospección geoelectrica (SEV) permitió no solo proyectar vulnerabilidades futuras, sino también validarlas con evidencia empírica actual. Los valores de resistividad $<5 \Omega \cdot m$ confirmaron insitu la intrusión salina modelada, mientras que el método de Bruun cuantificó el retroceso costero esperado, ofreciendo un diagnóstico multicapa y robusto.

La intrusión salina y el retroceso costero proyectados conducen a la degradación o pérdida de ecosistemas clave (manglares, pastos marinos). Esto compromete la biodiversidad, reduce la resiliencia costera ante huracanes y puede desencadenar la liberación de carbono almacenado en turberas, creando un bucle de retroalimentación positiva con el cambio climático.

La cartografía climática integrada generada trasciende su función diagnóstica al identificar espacialmente las zonas de máxima vulnerabilidad (acuíferos costeros del norte, áreas de baja elevación). Esto la convierte en una herramienta fundamental para la planificación adaptativa basada en evidencia, permitiendo priorizar acciones como la restauración de manglares, la implementación de agricultura tolerante a la salinidad, y la reubicación estratégica de infraestructuras.

El enfoque metodológico aplicado, que combina análisis espacial, modelado y validación de campo, es replicable y adaptable a otros humedales costeros tropicales del Caribe, regiones que enfrentan presiones climáticas análogas y requieren de planes de conservación y adaptación urgentes y fundamentadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Se le agradece al Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad Ciego de Ávila (CIBA-CA) por el apoyo institucional para la realización de esta investigación. Además, se agradece al Centro Meteorológico Provincial (CMP) y la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciego de Ávila (EAHCA), por la provisión de datos fundamentales para el estudio. De igual forma se le extiende un agradecimiento al Instituto Nacional de Meteorología (INMT) por permitirme consultar los datos históricos de precipitación.

Agradecimiento especial a la Mcs. Vania M, Vidal Olivera, por su invaluable apoyo y guía durante todo el desarrollo de la investigación, y al MSc. Rafael González Abreu Fernández por el apoyo constante para esta investigación.

1. Ramsar, Convention Secretariat, "Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) — Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila," 2002. [Online]. Available: <https://rsis.ramsar.org/es/ris/1235>
2. Ramsar, "El manejo de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales," in *Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales*, 3rd ed., vol. 9. Gland, Switzerland: Secretaría de la Convención de Ramsar, 2007. [Online]. Available: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/hbk4-09sp.pdf>
3. K. L. Erwin, "Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world," *Wetlands Ecol. Manage.*, vol. 17, no. 1, pp. 71–84, Feb. 2009, doi: <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1>
4. J. González, H. Menéndez, R. González, J. Fonseca, R. González, and V. Vidal, "Papel regulador de las zonas inundables del humedal en el intercambio salino subterráneo entre las bahías interiores-acuíferos en el Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila," *Tecnol. Química*, no. 2, pp. 66–74, Apr. Jun. 2008. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/5375/537553506008.pdf>
5. 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". Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2022. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> doi: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
6. World Meteorological Organization (WMO), "Guidelines on Homogenization", 1st ed., WMO-No. 1245. Geneva, Switzerland: WMO, 2018. [Online]. Available: <https://library.wmo.int/records/item/56055-guidelines-on-homogenization>
7. P. Bruun, "Sea-level rise as a cause of shore erosion," *J. Waterw. Harb. Div.*, vol. 88, no. 1, pp. 117–130, Feb. 1962, doi: <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000252>
8. A. D. Werner and C. T. Simmons, "Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers," *Ground Water*, vol. 47, no. 2, pp. 197–204, Mar. 2009, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x>
9. G. Ferguson and T. Gleeson, "Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change," *Nature Climate Change*, vol. 2, no. 5, pp. 342–345, May 2012, doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>
10. D. A. Tran et al., "Understanding the role of groundwater in a changing climate: A case study in the Mekong Delta, Vietnam," *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, vol. 36, Apr. 2021, Art. no. 100858, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100858>
11. L. G. Pearlstine, F. J. Mazzotti, and L. A. Brandt, "Implications of climate change and sea level rise for Everglades restoration," *J. Coast. Res.*, vol. 26, no. 5, pp. 814–825, Sep. 2010, doi: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00008.1>
12. A. L. McIvor, I. Möller, T. Spencer, and M. Spalding, "Reduction of wind and swell waves by mangroves," *Nat. Commun.*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1233, 2012, doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms2340>
13. C. E. Lovelock et al., "The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise," *Nature*, vol. 526, no. 7574, pp. 559–563, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1038/nature15538>
14. M. M. Rahman, S. Rahman, and K. S. Islam, "The response of mangrove forest to the climate change: A review," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 11, pp. 1492–1496, Nov. 2011, doi: <https://doi.org/10.17485/ijst/2011/v4i11.32>