



## FORESTERÍA ANÁLOGA PARA LA REMEDIACIÓN Y USO DE SUELOS AFECTADOS POR LA SAL

### ANALOG FORESTRY FOR THE REMEDIATION AND USE OF SALT-AFFECTED SOILS

ABILIO O'FARRILL COLEBROOK<sup>1\*</sup>, ORLIDIA HECHAVARRÍA KINDELÁN<sup>1</sup>, MILAGROS COBAS LÓPEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, La Habana, Cuba.

<sup>2</sup>Universidad de Pinar del río "Hermanos Saiz Montes de Oca", Pinar del Río, Cuba.

\*Autor para la correspondencia: [abilio@forestales.co.cu](mailto:abilio@forestales.co.cu)

#### RESUMEN

La remediación de suelos salinizados es crucial para enfrentar los problemas de desertificación y pérdida de productividad agrícola, especialmente en regiones áridas como el valle de Guantánamo, Cuba. Este estudio evaluó la efectividad de la Forestería Análoga (FA) para rehabilitar suelos afectados por salinidad, con el objetivo de restaurar su funcionalidad ecológica y productiva. Se trabajó en 14 fincas (351 ha) con suelos Oscuro Plásticos Gleyzados, clasificados en cuatro zonas según su salinidad (desde >2007 ppm hasta no salinos). Se implementaron parcelas demostrativas con especies tolerantes a la sal (e.g., *Prosopis juliflora*, *Azadirachta indica*) y técnicas de manejo adaptadas, como enriquecimiento orgánico y riego controlado. Los resultados mostraron una reducción significativa de la salinidad y el pH (de 8.4-8.8 a niveles menos alcalinos) tras cinco años, junto con un aumento en la cobertura vegetal y la biodiversidad. El análisis estadístico (CATPCA,  $\alpha = 0.89$ ) confirmó que especies con raíces profundas y alta tolerancia a la sal fueron las más efectivas. Se concluyó que la FA es una estrategia viable para rehabilitar suelos salinos, que combina beneficios ecológicos y socioeconómicos mediante la participación comunitaria y el uso de especies multifuncionales.

**Palabras clave:** salinización, biodiversidad, intercambio catiónico, participación comunitaria, restauración ecológica

#### ABSTRACT

The remediation of salinized soils is crucial to address desertification and agricultural productivity loss, especially in arid regions such as the Guantánamo Valley, Cuba. This study evaluated the effectiveness of Analog Forestry (AF) in rehabilitating salinity-affected soils, with the aim of restoring their ecological and productive functionality. Fourteen farms (351 ha) with Dark Plastic Gleyzose soils were studied, classified into four zones based on salinity (from >2007 ppm to non-saline). Demonstration plots were planted with salt-tolerant species (e.g., *Prosopis juliflora*, *Azadirachta indica*) and adapted management techniques, such as organic enrichment and controlled irrigation. The results showed a significant reduction in salinity and pH (from 8.4-8.8 to less alkaline levels) after five years, along with an increase in vegetation cover and biodiversity. Statistical analysis (CATPCA,  $\alpha = 0.89$ ) confirmed that species with deep roots and high salt tolerance were the most effective. It was concluded that AF is a viable strategy for rehabilitating saline soils, combining ecological and socioeconomic benefits through community participation and the use of multifunctional species.

**Keywords:** salinization, biodiversity, cation exchange, community participation, ecological restoration

#### INTRODUCCIÓN

Una de las tareas más urgentes que debe asumir la humanidad en el milenio que recién comienza es enfrentar de manera justa y eficaz los crecientes problemas ambientales que afectan al planeta (Remond, 2004). La ciencia forestal desempeña un papel determinante en la solución de estos problemas debido a las esferas de trabajo que le competen. Su

contribución resulta esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental.

La deforestación y la desertificación se encuentran entre los problemas ambientales más graves que amenazan la vida en el planeta. En algunos casos, la desertificación se debe a la salinización de los suelos provocada por actividades humanas (O'Farrill, 2012). Estos fenómenos requieren atención inmediata para evitar consecuencias irreversibles.

Recibido: 05/1/2020

Aceptado: 10/3/2020

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no existir conflictos de intereses.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



La actividad humana ha causado la salinización de aproximadamente 76 000 000 de hectáreas de tierras a nivel mundial (Hamilton, 2009; FAO, 2015). En Cuba, más de 1 000 000 de hectáreas, equivalentes al 15 % del área agrícola del país, presentan condiciones salinas o están salinizadas (PNCMS, 2000; Olivera, 2012; Renda, 2017). Esta situación exige la implementación de estrategias efectivas para su recuperación.

En el valle de Guantánamo, 17 878.90 hectáreas se encuentran afectadas por salinidad, con rangos que varían desde débilmente salino hasta muy fuertemente salino (Milá et al., 2015). Según Villamet (2013), la falta de sistemas de drenaje adecuados en los sistemas de riego ha intensificado el deterioro de estos suelos, elevando el manto freático. Este fenómeno, de origen antropogénico, ha convertido extensas áreas agrícolas, especialmente cañeras, en tierras improductivas.

Iannetta & Colonna (2005) definieron la salinidad como la medida de la cantidad de sales disueltas en el agua, la cual se expresa tradicionalmente en partes por mil (‰) o como Total de Sólidos Disueltos (TSD). El TSD representa la concentración de la solución, donde 1 ppm equivale a 1 miligramo por litro y 1 ‰ corresponde a 1 gramo por litro. Esta medición es fundamental para evaluar el grado de salinización.

La conductividad eléctrica de la solución también sirve como indicador de salinidad, ya que existe una relación directa entre la concentración de sales y la capacidad de conducción eléctrica. Esta propiedad se expresa en deciSiemens por metro (dS/m). Ambos métodos de medición son ampliamente utilizados en estudios de suelos afectados por salinidad.

Para abordar la remediación de suelos salinizados, es esencial diferenciar entre los conceptos de mejoramiento y recuperación. Flores (1991) estableció una clara distinción entre ambos términos y describe diversas técnicas para manejar la salinidad del suelo. Según este autor, los métodos empleados se clasifican en físicos, eléctricos, químicos, hidrotécnicos y biológicos.

La cubierta vegetal desempeña un papel clave en el mejoramiento de suelos salinizados, particularmente en la estabilización del pH. La biomasa forestal favorece la recuperación de bacterias responsables del ciclo de nitrificación, lo que facilita la asimilación de nutrientes por las plantas. Este proceso contribuye a restablecer las condiciones óptimas del suelo.

Ávila Vega (2017) clasificó los suelos según su pH en las siguientes categorías:

- Fuertemente ácido: 4.5 - 5.5
- Poco ácido: 5.5 - 6.5
- Neutro: 6.8 - 7.2
- Poco alcalino: 7.5 - 8.5
- Fuertemente alcalino: 8.5 - 9.5

Este autor destaca la estrecha relación entre salinidad y pH, donde la acidez del suelo depende de la concentración de iones hidronio en disolución. La cantidad de  $H^+$  determina las propiedades químicas del suelo.

El aumento de la alcalinidad genera toxicidad por  $H^+$ , deficiencias en la fijación de nutrientes como Fe, Mn, Zn, Cu y B, y exceso de Na y B. Además, deteriora la estructura del suelo y perjudica la nitrificación. Estas condiciones limitan el desarrollo vegetal y reducen la productividad agrícola.

Senanayake (2011) advirtió que ignorar las funciones del bosque representa una amenaza para los sistemas de soporte de vida del planeta. Los bosques proporcionan elementos esenciales para mantener estos sistemas, por lo que restaurar la cubierta vegetal se ha convertido en una necesidad urgente. Como alternativa, este autor propone la técnica de Forestería Análoga.

La Forestería Análoga es un sistema silvícola que busca crear ecosistemas dominados por árboles análogos a los ecosistemas originales maduros en estructura arquitectónica y funciones ecológicas (Senanayake, 2005). Constituye una forma específica de reforestación diseñada para emular las condiciones naturales. Su aplicación se ha extendido como método de restauración ecológica.

Antes de su introducción en Cuba, esta técnica se aplicaba principalmente en la recuperación de bosques tropicales degradados. Sin embargo, no se había implementado en ecosistemas con condiciones extremas de sequía y suelos salinizados, como ocurre en el valle de Guantánamo. Este contexto plantea nuevos desafíos para su adaptación.

Aunque muchos países reconocen el potencial de la Forestería Análoga para la restauración, existe poca información sobre su eficacia en la remediación de suelos salinizados. Tras comprobar su factibilidad en 14 fincas del valle de Guantánamo, actualmente se extiende su aplicación a cuatro municipios de la provincia mediante el proyecto internacional "Mejoramiento de la resiliencia y adaptación al cambio climático en Guantánamo, Cuba".

Este trabajo responde a la pregunta: ¿Qué puede hacerse para remediar y utilizar suelos afectados por salinidad? Se demuestra la viabilidad de recuperar áreas salinizadas mediante la técnica de Forestería Análoga. Los resultados obtenidos ofrecen una solución sostenible para este problema ambiental.

## MATERIALES Y MÉTODO

La investigación se realizó en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2016 en la Unidad Silvícola de Base Guantánamo. Esta unidad pertenece a la Empresa Agroforestal Guantánamo, ubicada en el Consejo Popular Paraguay del municipio Guantánamo, en la provincia homónima de la República de Cuba (Figura 1). El estudio abarcó 14 Fincas Forestales Integrales con un área total de 351 ha.

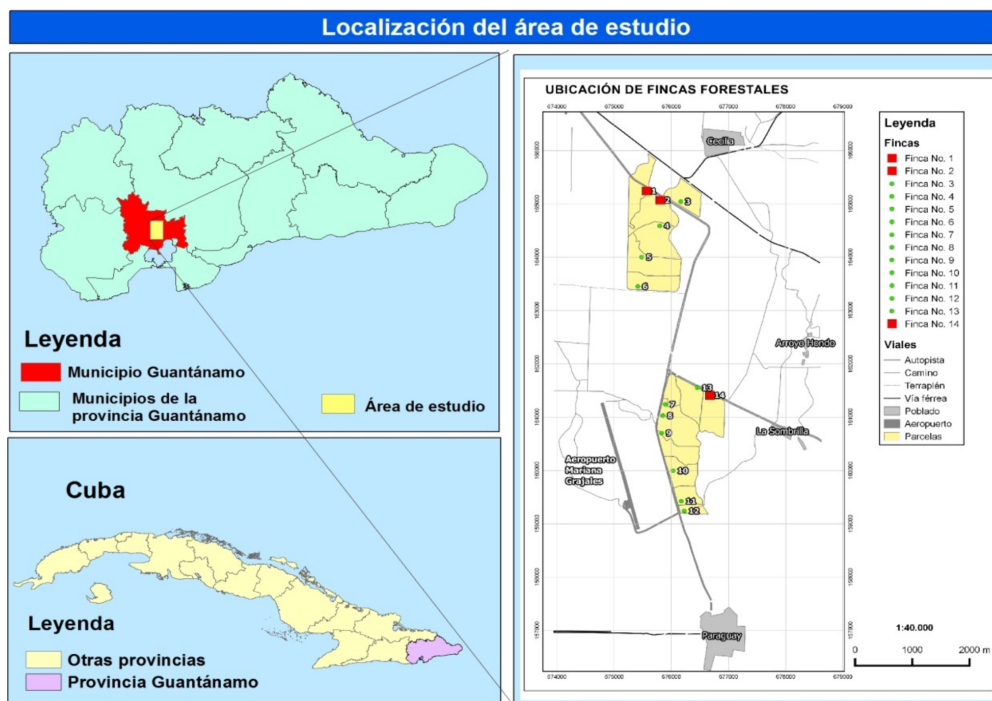


Figura 1. Localización del área de estudio.

Las fincas se localizaron en los lotes forestales 15 y 16 de la Empresa Agroforestal (EAF) Guantánamo. Los límites extremos del área de estudio fueron: al noreste el ferrocarril Guantánamo-Boquerón, al este la coordenada 677 000 m E, al sur la coordenada 159 000 m N y al oeste la carretera Guantánamo-Paraguay. Esta delimitación permitió establecer con precisión la zona de investigación.

La región presenta un clima semidesértico, considerado el más seco de toda Cuba. Tanto el área de estudio como toda la parte sur del Valle comparten esta característica climática. Esta zona se encuentra ubicada en el denominado corredor xerofítico de Guantánamo, lo que explica sus condiciones ambientales particulares.

Las precipitaciones en la zona son muy escasas, con valores que oscilan entre 400 y 600 mm anuales. Los niveles de evaporación alcanzan hasta 2 300 mm, manteniéndose constantemente elevados. La temperatura media anual supera los 26,1°C, con máximas que llegan hasta los 36°C.

Los meses de mayor precipitación son mayo, septiembre y octubre. Por el contrario, el periodo menos lluvioso ocurre durante diciembre, enero y febrero. Estos datos climáticos coinciden con los informados por O'Farrill (2012, 2018) en sus estudios de 2012 y 2018.

Los suelos Oscuro Plásticos Gleyzoso salinizados se encuentran entre los menos estudiados en Cuba. Su presencia más agresiva se reportó en la cuenca hidrográfica de Guantánamo, donde se formaron sobre material carbonatado antiguo. Estos suelos tuvieron una gran fertilidad inicial, pero la erosión severa ha provocado el afloramiento del material basal, el cual presenta baja fertilidad.

Estos suelos se desarrollan sobre arcillas compactas erosionadas con afloramientos de lutita y poseen una capacidad muy reducida de retención de agua. La vegetación en estas condiciones es xerofítica, con un cubrimiento mínimo, lo que acelera el proceso de salinización (Borges, 2007). El incremento en área e intensidad de la salinidad en la región está asociado a factores climáticos, como la sequía, y a la actividad antropogénica (Rodríguez & Sánchez, 2007).

### Procedimiento metodológico de la investigación

Para caracterizar el estado de la vegetación en función de la salinidad y el pH del suelo en las áreas de estudio, se aplicó la metodología de la Red Internacional de Forestería Análoga (RIFA) (Bekins & Arnold, 2007). Esta técnica busca facilitar, estandarizar y homogenizar el análisis. Su implementación en el Valle de Guantánamo requirió adaptaciones específicas debido a las condiciones locales.

En primer lugar, se tomó como referencia una zona menos afectada dentro de las fincas, ocupada por bosques secundarios y plantaciones, en lugar de un bosque natural maduro. Esta modificación fue necesaria porque no existía un bosque de referencia en el área. En segundo lugar, se incorporaron técnicas no previstas inicialmente en el diseño metodológico.

El proceso se basó en la cartografía del Proyecto de Ordenación Forestal de la EAF Guantánamo, mediante mapas a escala 1:25 000 para ubicar las áreas de estudio. Se colaboró con finqueros, comunitarios, técnicos y especialistas de la UEBS Guantánamo, con la aplicación del método

de levantamiento planimétrico de poligonal cerrada con cinta y brújula. Esto permitió elaborar esbozos de mapas actuales y potenciales del paisaje, que incluyen vegetación, biodiversidad, cursos hídricos, curvas de nivel, dirección del viento y exposición solar.

Se realizó una caracterización general de las fincas a partir de datos registrados en la Empresa y la UEBS, complementada con entrevistas a informantes clave vinculados a los proyectos de creación de las fincas en el año 2000. Una vez recopilada la información cartográfica y documental, se procedió al diagnóstico.

### Diagnóstico

Según la metodología de Forestaria Análoga (FA), se revisó la información disponible sobre el área y se efectuaron recorridos de campo. Estas actividades permitieron conocer la localidad y sus entornos, cumpliendo con el primer principio de la técnica: observar y registrar.

### Mapeo

Los esquemas elaborados durante el trabajo de campo se verificaron en la Empresa de Proyectos Agropecuarios de Guantánamo. Se elaboraron mapas de localización de las fincas, clima, salinidad del suelo y vegetación al inicio del estudio. Posteriormente, estos mapas se georreferenciaron en el Instituto de Geografía Tropical del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

### Valoración ecológica rápida

Se aplicó la metodología para evaluar los indicadores de la valoración ecológica rápida, la cual proporciona una línea base para comparar el estado del ecosistema a lo largo del tiempo. Esta herramienta identifica elementos sensibles del ecosistema, priorizando acciones para fortalecerlos y mejorar la salud general del sistema (Torres & Gamboa, 2008).

La información obtenida también mide los beneficios ecológicos de la técnica de FA en la restauración de ecosistemas, mediante indicadores cuantitativos y cualitativos in situ. Los indicadores se calificaron en una escala del uno al ocho, según la percepción del equipo evaluador.

Los indicadores evaluados caracterizan la calidad del suelo, la composición de la vegetación, el componente animal y la productividad. Estos incluyen el perfil del suelo, la densidad aparente y la macrofauna del suelo. La evaluación se realizó en varios puntos de cada finca, seleccionados de manera aleatoria.

Para evaluar la sostenibilidad, se aplicó la metodología de Altieri & Nicholls (2002). Los valores de los indicadores inferiores a cinco se consideran por debajo del umbral de sostenibilidad. Cuando los valores se acercan a ocho, el sistema se considera más sostenible. Los resultados de la valoración ecológica rápida se complementaron con un estudio de suelos, realizado en colaboración con el Laboratorio Provincial de Suelos de Guantánamo.

### Análisis físico-químico del suelo

Se utilizó el mapa forestal a escala 1:25 000 para delimitar las cuatro zonas identificadas en la valoración ecológica rápida. Posteriormente, se verificó el grado de salinidad de cada zona en las parcelas demostrativas, con el apoyo del Centro Provincial de Suelos de Guantánamo (CPSG). Este proceso permitió corroborar los criterios obtenidos mediante observación directa.

Los análisis incluyeron la determinación del pH en H<sub>2</sub>O mediante el método potenciométrico, según la norma NC ISO 10390:1999. También se midió la salinidad por conductividad eléctrica, con una relación suelo:agua de 1:5, conforme a las normas NC 112:2001 o NC 32:1999. Estas mediciones se aplicaron al total de las muestras recolectadas (100%). La evaluación del grado de salinidad se basó en los rangos establecidos en la [Tabla 1](#).

**Tabla 1.** Estimación de la Salinización global (NC 2010).

| Símbolos | Gradaciones (dS/m) | Evaluación de la salinización |
|----------|--------------------|-------------------------------|
| S0       | < 1                | No Salino                     |
| S1       | 1 a 2              | Débilmente Salino             |
| S2       | 2 a 4              | Medianamente Salino           |
| S3       | 4 a 6              | Salino                        |
| S4       | 6 a 8              | Fuertemente Salino            |
| S5       | > 8                | Muy Fuertemente Salino        |

Las tablas de datos se elaboraron para registrar las características de las especies existentes y las propuestas análogas para la recuperación del área. Esta información se obtuvo del inventario florístico, encuestas a conocedores locales y revisión documental.

Estas tablas contienen hojas de cálculo con 16 registros de especies arbóreas maderables, frutales y forestales medicinales. Los registros incluyen datos como época de floración, fructificación, ancho de copa, tipo y efecto de las raíces, tolerancia a la sal, tipo de plantas (caducifolias o perennifolias), grupos funcionales (pioneras, colonizadoras, estabilizadoras, rezagadas) y demanda de luz (heliófilas o esciófilas). También se consideraron aspectos culturales, como usos religiosos, entre otros, los cuales se actualizan de manera constante.

Para analizar el efecto de la plantación de especies arbóreas seleccionadas sobre la salinidad y el pH del suelo, se estudiaron parcelas demostrativas. Además, se buscó establecer la relación entre el pH, la salinidad y la supervivencia, crecimiento y desarrollo de las plantas, mediante la técnica de la FA. Se aplicaron modelos de regresión lineal simple y cuadrática, a través del paquete estadístico Infostat, versión 2014 (Di Rienzo et al., 2014).

### Parcelas demostrativas

La investigación utilizó parcelas demostrativas establecidas por [Toirac et al. \(2014\)](#). Estas consistieron en tres parcelas de una hectárea, ubicadas en las fincas 1 y 2 del lote 16 y la finca 14 del lote 15. Estas parcelas representaron las diferentes características de suelos y vegetación observadas durante los recorridos de campo. Además, permitieron evaluar la aplicación de la FA mediante la plantación de especies seleccionadas y el monitoreo de su supervivencia y parámetros de desarrollo.

En la zona más afectada, se observó afloramiento de sal en la superficie del suelo en algunos parches. También se identificaron especies indicadoras de altos niveles de salinidad o especies con tolerancia limitada y pobre desarrollo. Otra zona presentó características similares, pero menos severas. Una tercera zona mostró mayor diversidad de especies. En una cuarta zona, con plantaciones establecidas y un bosque secundario diverso, no se instalaron parcelas demostrativas debido a la presencia visible de materia orgánica y condiciones más favorables.

### Establecimiento de las plantaciones experimentales

La reforestación en las parcelas demostrativas comenzó en mayo de 2008 con la plantación de 10 especies seleccionadas de la tabla de datos previamente elaborada. La plantación se realizó en hoyos preparados con antelación, en cajuelas o montículos en el caso de la parcela 1. Se incorporaron 2 kg de materia orgánica mezclada con suelo local en cada sitio de plantación.

La selección de especies se basó en literatura científica que recomendaba algunas de ellas para condiciones similares. También se consideraron consultas con comunitarios, finqueros y especialistas de la EAF Guantánamo, quienes aportaron información sobre especies históricamente presentes en el área. Se tomó como referencia la experiencia

exitosa de introducción de *Azadirachta indica* A. Juss en el corredor xerofítico, informada por [Martínez et al. \(2009\)](#). Aunque la metodología de FA no lo exige, se buscó equilibrar especies autóctonas y alóctonas, que incluyeron variantes representativas de cada grupo análogo.

En estas parcelas, además de las especies existentes antes del experimento, se incorporaron progresivamente otras especies análogas. Estas acompañaron a las seleccionadas inicialmente para evaluar su adaptación y contribución al sistema.

En la parcela 1, la plantación se realizó sobre cajuelas de 0,30 m × 0,30 m × 0,25 m de profundidad. Esta medida respondió a problemas de encharcamiento en épocas lluviosas y resequedad extrema en temporadas secas, factores que afectaban la supervivencia de las plántulas durante su aclimatación inicial. Las plántulas de todas las especies presentaron una longitud promedio de tallo entre 35 y 45 cm al momento de la plantación.

Las especies utilizadas en el experimento se detallan en la [Tabla 2](#).

### Evaluación de la supervivencia y desarrollo de las especies

El riego manual se aplicó a razón de 4 litros de agua por planta, con frecuencias variables de 7, 14 o 21 días según la ocurrencia de precipitaciones. Para conservar la humedad alrededor de las plantas, se realizó un arroje con hierbas provenientes de las limpiezas. Este método aseguró condiciones óptimas durante el establecimiento inicial.

Los conteos de supervivencia se efectuaron a los tres y cinco años después de la plantación, según el Manual de Procedimientos del Fondo de Desarrollo Forestal (2005). En el octavo año, se llevó a cabo la evaluación final, que incluyó mediciones de altura, diámetro del fuste y ancho de copa. Además, se realizó una inspección visual del suelo, ya que el estado de la vegetación refleja la salud del ecosistema.

**Tabla 2.** Especies seleccionadas de la tabla de datos.

| Nombre Científico                         | Crecimiento | Tolerancia a la Sal | Req. De Agua | Tipo de Raíz | Efec. Raíz          |
|-------------------------------------------|-------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|
| <i>Savia sessiliflora</i> (Sw.) Willd     | Medio       | Alto                | Poco         | Mediana      | Controla la erosión |
| <i>Simaruba laevis</i> Griseb.            | Medio       | Limitado            | Mediano      | Profunda     | Aporta nitrógeno    |
| <i>Colubrina arborescens</i> (Mill.) Sarg | Rápido      | Medio               | Poco         | Profunda     | Mejora el suelo     |
| <i>Prosopis juliflora</i> (Sw.)           | Rápido      | Alto                | Poco         | Profunda     | Aporta nitrógeno    |
| <i>Moringa oleifera</i> (Lam.)            | Rápido      | Limitado            | Mediano      | Mediana      | Aporta nitrógeno    |
| <i>Swietenia mahagoni</i> (L.) Jacq.      | Lento       | Limitado            | Mediano      | Profunda     | Controla la erosión |
| <i>Azadirachta indica</i> A. Juss         | Rápido      | Alto                | Poco         | Profunda     | Mejora el suelo     |
| <i>Thespesia populnea</i> (L.) Soland     | Medio       | Alto                | Mediano      | Profunda     | Formadora de suelo  |
| <i>Guaiacum officinale</i> (L.)           | Lento       | Alto                | Poco         | Profunda     | Controla la erosión |
| <i>Conocarpus erecta</i> (L.)             | Medio       | Alto                | Poco         | Profunda     | Formadora de suelo  |

Legenda: Crec: crecimiento; Tol. sal: tolerancia a la sal; Req. de agua: requerimiento de agua; Efec. raíz: efecto de la raíz

Para medir la altura y el diámetro, se emplearon métodos tradicionales con cinta métrica, forcípula diamétrica y vara graduada. Los datos de supervivencia se procesaron mediante un análisis estadístico de comparación de proporciones (Chi Cuadrado). Se calcularon porcentajes y se compararon las medias proporcionales con la prueba de Duncan (Duncan, 1955) para un nivel de significancia de  $P < 0,05$ .

### Fórmula fisionómica de vegetación

La fórmula fisionómica de la vegetación se describió en las 14 fincas mediante la metodología propuesta por RIFA (2011). Este enfoque permitió representar simbólicamente la estructura vegetal. Además, se realizó un análisis de brechas para identificar las carencias en las áreas afectadas, tomando como referencia la zona con la mejor composición arbórea.

### Selección de especies promisorias para cada zona

En las parcelas demostrativas, se definieron las especies más adecuadas para rehabilitar las áreas afectadas por salinidad. El procedimiento estadístico incluyó el Escalamiento Óptimo mediante el Análisis de Componentes Principales Categóricos (CATPCA). Este método redujo la información a la menor dimensión posible y permitió identificar los principales indicadores estudiados. Los resultados se visualizaron mediante un gráfico Biplot que incluyó las 69 especies forestales, frutales y otras en menor proporción.

El análisis comenzó con la determinación del Alfa de Cronbach y la evaluación de los coeficientes de peso. Posteriormente, se agruparon las especies por dimensiones según los indicadores evaluados. Este proceso se complementó con el análisis de brechas para seleccionar las especies idóneas para cada zona.

De las 16 características nominales disponibles, inicialmente se trabajó con todas, pero finalmente se consideraron cinco debido a su mayor peso en los coeficientes de correlación. Las características seleccionadas para el análisis final fueron las siguientes:

- Ritmo de crecimiento de las especies (lento, medio, rápido): Define el momento serial en que puede introducirse cada especie.
- Tolerancia a la salinidad (poca, media, alta): Determina la zona de plantación y el ritmo adecuado para cada especie.
- Requerimiento de agua (poca, media, alta): Influye en la selección de la zona de plantación.
- Tipo de raíz (profunda, superficial, mediana): Afecta la infiltración del agua y el lavado de sales del suelo.
- Efecto de la raíz (mejora el suelo, controla la erosión, forma suelos): Los exudados radiculares influyen en los microorganismos del suelo y mejoran el ecosistema.

La biomasa superficial produce efectos beneficiosos o antagónicos en el desarrollo del ecosistema edáfico. Además,

el sistema radicular de los árboles reduce significativamente la erosión, tanto eólica como hídrica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el diagnóstico y la valoración ecológica se identificaron cuatro zonas en el área, las cuales se diferenciaron por sus niveles de salinidad. Esta clasificación se basó en la presencia o ausencia de especies indicadoras y tolerantes a la sal, así como en los análisis químicos de muestras de suelo procesadas en el laboratorio. Los resultados confirmaron la distribución espacial de estas zonas según su concentración salina.

La zona 1 presentó la mayor salinidad, con valores superiores a 2007,15 ppm, mientras que la zona 2 mostró una salinidad media, entre 1260,18 y 1488,45 ppm. Ambos sectores poseen un suelo clasificado como Oscuro Plástico Gleyzoso, formado sobre material transportado y carbonatado. Estas áreas presentan una profundidad media de 20 a 50 cm, un contenido de materia orgánica del 2,2% y un grado de humificación entre 2,1 y 4,0%. Además, exhiben textura arcillosa, poca erosión y una profundidad efectiva de 30 cm. Su topografía es casi llana, con pendientes del 1,1 al 2,0%, y presentan drenaje superficial moderado e interno entre moderado y deficiente.

La zona 3 registró una baja salinidad, con valores entre 609,32 y 1118,59 ppm. El suelo en esta área también se clasificó como Oscuro Plástico Gleyzoso sobre material transportado carbonatado. Comparte características similares con las zonas anteriores, pero con una textura loam arcillosa y una profundidad efectiva de 26 cm.

La zona 4 no presentó salinización, con valores inferiores a 600,00 ppm. Esta área se consideró como referencia debido a la ausencia de un bosque que cumpliera esta función, según los criterios metodológicos de FA. Su condición no salina permitió establecer comparaciones con las demás zonas.

En términos generales, los suelos de las 14 fincas estudiadas en la UEBF Guantánamo, ubicadas en el Consejo Popular Paraguay, mostraron características físicas y químicas específicas. En cuanto a las propiedades físicas, la elevación capilar (EC) se clasificó como baja, con valores entre 30 y 94 mm/5h. El límite superior de plasticidad (LSP) presentó un comportamiento plástico, con valores que oscilaron entre 84,1 y 90,95%. La higroscopicidad seca al aire (hy) varió de baja a media, según los parámetros establecidos por (Sánchez et al., 2008).

En las características químicas, el pH en agua mostró un rango entre 8,4 y 8,8, clasificado como medianamente alcalino a alcalino. En cloruro de potasio (CIK), el pH fue ligeramente alcalino, con valores de 7,5 a 8,5. El contenido de carbonatos se situó entre 21 y 40%, lo que indica su naturaleza carbonatada. La capacidad de intercambio catiónico (Valor T) resultó alta, con 15 a 25 meq/100 g de suelo. La relación Ca/Mg varió desde niveles bajos hasta adecuados, con valores entre 1,77 y 4,0 cmol·kg<sup>-1</sup> (Sánchez et al., 2008).

La capacidad de intercambio catiónico detectada en estos suelos sugiere que es posible recuperar su fertilidad histórica. Este hallazgo coincide con las observaciones de Piedrahita (2011), quien afirmó que los suelos con alta capacidad de intercambio catiónico pueden retener mayores cantidades de nutrientes. La restauración de la fertilidad depende de estrategias de manejo adecuadas.

La implementación de especies adecuadas, que provean abundante hojarasca, junto con la aplicación de compost y abonos orgánicos durante las plantaciones, contribuye a mejorar la fertilidad del suelo. Estas prácticas siguen los lineamientos metodológicos de la FA. Los análisis de suelo realizados cinco años después de la aplicación de la FA demostraron una tendencia a la disminución progresiva de los niveles de salinidad en las áreas afectadas (Figura 2). Además, se observó una reducción significativa de la basicidad del suelo (Figura 3).

Los resultados anteriores coinciden con lo expuesto por Herrera (1984). Este autor señaló que las áreas salinizadas pueden mejorar de manera significativa mediante la repoblación forestal con especies adecuadas. El humus acumulado neutraliza los efectos tóxicos de las sales, y la cubierta vegetal influye en la retención de agua en los

horizontes superficiales, lo que evita la concentración y cristalización de las sales. Estas condiciones favorecen la conservación de los tejidos vegetales.

En las parcelas demostrativas se analizaron inicialmente las 16 características incluidas en la tabla de datos. Posteriormente, se seleccionaron cinco variables por presentar los mayores coeficientes de peso en el análisis preliminar. La elección se basó en los aportes de los coeficientes de correlación para determinar la ubicación óptima de las especies.

El análisis de brechas reveló que en las zonas 1 y 2 existe una falta de árboles con alturas entre 5.0 y 10.0 metros. Por ello, se recomienda plantar especies capaces de alcanzar estas alturas, según la metodología de la FAO. Es fundamental considerar tratamientos y manejos silvícolas adaptados a condiciones extremas durante este proceso.

Respecto a la cobertura, se observaron diferencias significativas entre las tres zonas (1, 2 y 3) y el bosque de referencia. Para incrementar la cobertura a corto, mediano y largo plazo, se propone la incorporación gradual de especies análogas en cada dosel. Este enfoque permitirá equilibrar la estructura forestal en las áreas estudiadas.

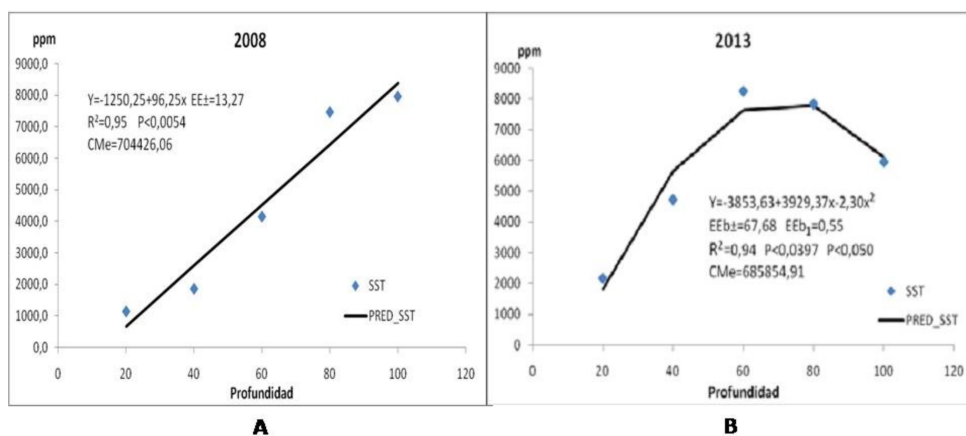


Figura 2. Modelos de regresión para el muestro inicial y final de la salinidad. Parcela 1

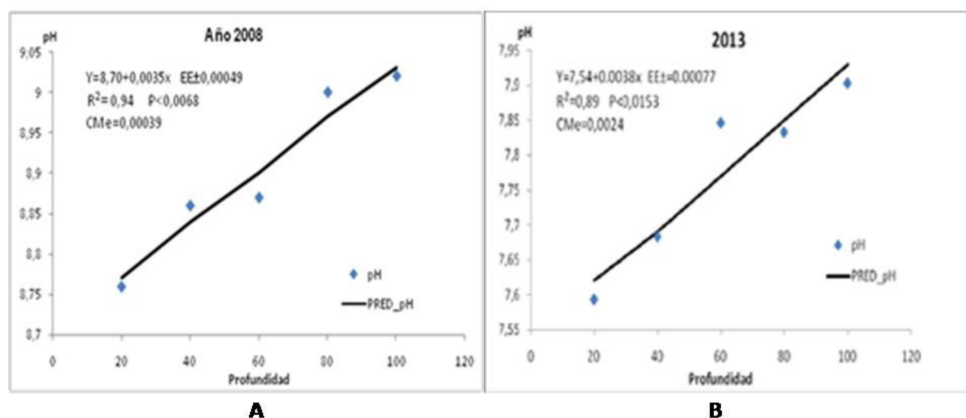


Figura 3. Modelos de regresión lineal para el muestro inicial y final del pH. Parcela 1.

El Análisis de Componentes Principales Categóricos (CATPCA) explicó el 61% de la variabilidad de los datos originales en dos dimensiones. El coeficiente Alfa de Cronbach total fue de 0.89, lo que indica un alto nivel de fiabilidad (Tabla 3). Estos resultados son consistentes con los informados por Herrera (2013) en su investigación sobre métodos estadísticos alternativos para variables discretas y categóricas, donde obtuvo una fiabilidad de 0.94. Según la escala de Hair et al. (1999), el método empleado en este estudio se considera excelente, ya que supera el umbral de aceptabilidad (0.60-0.70).

El análisis permitió determinar que las características seleccionadas son suficientes para establecer la relación entre los niveles de salinidad de cada zona y las especies presentadas en la tabla de datos. Estas características ayudan a resolver las diferencias entre la zona de referencia (zona 4) y las demás zonas. Entre los criterios considerados figuran el ritmo de crecimiento de las especies (lento, medio, rápido), su tolerancia a la salinidad (poca, media, alta) y sus requerimientos de agua (poca, media, alta).

Además, se evaluaron el tipo de raíz (profunda, superficial, mediana) y el efecto de la raíz en el suelo. El Análisis de Componentes Principales Categóricos facilitó la selección de especies adecuadas para cada zona, según lo identificado en el análisis de brechas. Desde una perspectiva biológica, los resultados indican que un plan de manejo para rehabilitar estas áreas debe considerar cuatro características clave en la elección de especies: requerimiento de agua, efecto de las raíces, tipo de zona y tolerancia a la sal.

Para la zona 1 de cada finca, se recomiendan las siguientes especies: *Prosopis juliflora* (SW) DC, *Azadirachta indica* A. Juss, *Savia sessiliflora* (SW) Wild, *Conocarpus erecta* L, *Caesalpinia violacea* (Mill) Standl, *Albizia lebbeck* (L) Benth, *Guaiacum officinale* L, *Coccoloba uvifera* (L) y *Casuarina equisetifolia* Forst. En esta zona predominan especies de raíz profunda y alta tolerancia a la sal. Las diferencias en altura respecto a la zona de referencia se compensan con *Prosopis juliflora*, *Albizia lebbeck* y *Casuarina equisetifolia*.

*Prosopis juliflora* es una especie introducida de la familia Mimosaceae. Según Pérez & Fals (2017), actúa como colonizadora en suelos salinos gracias a su resistencia y raíces

profundas, que acceden a estratos acuíferos menos salinos. Su capacidad adaptativa la hace idónea para áreas degradadas.

*Albizia lebbeck*, también de la familia Mimosaceae, es un árbol mediano que alcanza entre 8 y 15 m de altura, aunque puede superar los 30 m en condiciones óptimas. Según Betancourt (2000), es una especie decidua, maderable y melífera, que contribuye a la fijación de nitrógeno en el suelo. Se adapta a climas extremos, con temperaturas entre 5 y 46 °C y precipitaciones anuales de 500 a 2,500 mm. Su capacidad para crecer en suelos diversos, incluso arcillosos, arenosos y degradados, la hace ideal para zonas con estrés hídrico.

*Casuarina equisetifolia* presenta tolerancia limitada a la sal, pero posee raíces profundas y contribuye a la fijación de nitrógeno. Según Bruzón Sánchez (2013), esta especie demostró una notable capacidad adaptativa en áreas degradadas por minería en Cuba, incluso en sustratos rocosos. Su papel como formadora de suelos la destaca en proyectos de rehabilitación.

Para la zona 2 de cada finca, se añaden las siguientes especies a las ya mencionadas: *Cordia gerascanthus* (L.) Borh., *Simaruba laevis* Griseb, *Swietenia mahagoni* L. Jacq. y *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg. Estas especies, junto con las de la zona 1, ayudan a reducir las diferencias en altura respecto a la zona de referencia. *Swietenia mahagoni*, de la familia Meliaceae, se clasifica como estabilizadora según Pérez & Fals (2017). En Cuba, crece en suelos con marga y piedra caliza, tolera un pH de hasta 8.5, lo que la hace adecuada para zonas menos afectadas por la salinidad. Su requerimiento de agua es moderado, y su madera, de alto valor, la convierte en una especie de interés económico y ecológico.

Para la zona 3, se incorporan las siguientes especies adicionales a las ya propuestas para las zonas 1 y 2: *Albizia cubana* Britt. et Wils, *Hebestigma cubense* (Kunth) Urb., *Pithecelobium dulce* (Roxb.) Benth. y *Samanea saman* (Jacq.) Merrill. Estas especies complementan las alturas requeridas entre las zonas 3 y 4, tomada como referencia. *Albizia cubana* y *Samanea saman* son especies nativa y naturalizada, respectivamente, presentes en los entornos del área de estudio.

En cuanto a *Pithecelobium dulce*, Monroy & Colín (2016) la clasificaron como un árbol de uso múltiple, con funciones que incluyen su empleo como cerco vivo en campos de cultivo.

**Tabla 3.** Resultado del coeficiente Alfa de Cronbach para las características evaluadas.

| Dimensión                                                     | Alfa de Cronbach  | Varianza contabilizada |               |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|---------------|
|                                                               |                   | Total (autovalor)      | % de varianza |
| 1                                                             | ,719              | 2,603                  | 37,187        |
| 2                                                             | ,476              | 1,689                  | 24,122        |
| Total                                                         | ,895 <sup>a</sup> | 4,292                  | 61,309        |
| Se utiliza el total de alfa de Cronbach en el autovalor total |                   |                        |               |

Este árbol alcanza alturas de hasta 20 m, presenta una copa ancha, tallo ligeramente torcido y corteza ornamentada de color gris verdoso con manchas blanquecinas. Se caracteriza por su fácil establecimiento, rápido crecimiento y propagación por semilla, además de tolerar sequías, suelos pobres y tala continua. Asimismo, es resistente a plagas y tiene aplicaciones en la medicina tradicional.

Las condiciones mencionadas hacen de *Pithecelobium dulce* una especie promisoría para los objetivos de rehabilitación planteados en este trabajo. Estas especies deben manejarse de manera gradual, considerando sus particularidades, su contribución al mejoramiento del suelo y su potencial para incrementar el valor económico de las plantaciones.

Para el enriquecimiento de la zona 4, se proponen especies autóctonas con alto potencial económico desde el punto de vista maderable. Entre ellas se encuentran *Swietenia mahagoni* L. Jacq., *Cedrela odorata* L., *Cordia gerascanthus* (L.) Bort. y *Albizia cubana* Britt. et Wils.

Los éxitos alcanzados incluyen la supervivencia de especies forestales y frutales en áreas donde anteriores esfuerzos habían fracasado. También destacan la introducción de plantas útiles, como alimenticias, medicinales, ornamentales, flores, lianas y epífitas, así como el retorno de fauna silvestre. Un aspecto fundamental ha sido la participación activa de la comunidad.

La gestión económica permitió mejorar la calidad de las posturas y aumentar la supervivencia de las plantaciones. Además, se identificaron las potencialidades económicas de las fincas de la zona para lograr su autoabastecimiento y la producción de bienes y servicios.

## CONCLUSIONES

1. El área estudiada se dividió en cuatro zonas según su salinidad, confirmada por especies indicadoras y análisis químicos. Las zonas 1 y 2 presentaron mayor salinidad (2007,15 ppm y 1260,18-1488,45 ppm, respectivamente), con suelos arcillosos y alta capacidad de intercambio catiónico, mientras que las zonas 3 y 4 mostraron menor salinidad o ausencia de esta.
2. La implementación de especies tolerantes a la sal (como *Prosopis juliflora* y *Albizia lebeck*), junto con abonos orgánicos, redujo significativamente la salinidad y el pH en cinco años. Esto evidencia que estrategias de manejo adecuadas pueden restaurar la fertilidad en suelos degradados, neutralizando toxinas y mejorando la retención de agua.
3. El análisis estadístico (CATPCA,  $\alpha = 0,89$ ) validó la selección de especies según tolerancia a la sal, requerimientos hídricos y tipo de raíz. La incorporación gradual de especies nativas y adaptadas (*Swietenia mahagoni*, *Pithecelobium dulce*) mejoró la cobertura vegetal y la estructura del suelo, promoviendo la biodiversidad y la participación comunitaria en la rehabilitación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2002). *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable* (1ra ed.). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. <https://www.sidalc.net/search/Record/cat-unco-ar-61028/Description>
- Ávila Vega, J. (2017). Acidez del suelo. [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/acidez\\_suelo.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/acidez_suelo.pdf)
- Bekins, M., & Arnold, J. (2007). *La Gran Guía de Forestería Análoga*. Centro Falls Brook Centre.
- Betancourt, A. (2000). *Árboles maderables exóticos en Cuba*. Editorial Científico Técnica.
- Borges, O. (2007). Las Fincas Forestales Integrales (FFI). Una alternativa para la sostenibilidad de regiones semiáridas. *Revista Agricultura Orgánica*. ACTAF, 13(1), 9-10.
- Bruzón Sánchez, N. (2013). Rehabilitación de áreas degradadas por la minería a cielo abierto en la región Nicaro-Mayaría, Cuba [Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Facultad Forestal y Agronomía. Centro de Estudios Forestales]. <https://rc.upr.edu.cu/handle/DICT/2193>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2014). InfoStat versión 2014. InfoStat Group, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Duncan, D. B. (1955). Multiple range and multiple F tests. *biometrics*, 11(1), 1-42.
- FAO. (2015). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. Food and Agriculture Organization of the United Nations Roma, Italy. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- Flores, A. (1991). Suelos salinos y sódicos. Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana «Fructuoso Rodríguez Pérez» Facultad de Agronomía Departamento de Suelos y Riego Suelos Salinos y Sódicos. [https://www.academia.edu/2770265/Suelos\\_salinos\\_y\\_s%C3%B3dicos](https://www.academia.edu/2770265/Suelos_salinos_y_s%C3%B3dicos)
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., & Black, W. (1999). *Análisis MultiVariante*. Madrid: Prentice Hall Iberia.
- Hamilton, L. S. (2009). Los bosques y el agua: Estudio temático elaborado en el ámbito de la Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Estudio FAO: Montes N° 178. <https://openknowledge.fao.org/items/6f971dcc-6f93-4f67-a0d8-073557ecf9b0>
- Herrera, J. C. (1984). Perspectiva de utilización forestal de las áreas salinizadas de la zona de regadío del Río Dulce de Santiago Estero. *Actas del Primer Congreso Forestal*, 385.
- Herrera, M. (2013). *Métodos Estadísticos alternativos de análisis con variables discretas y categóricas en investigaciones agropecuarias* [Tesis (en opción al

- grado científico de Doctor en Ciencias Veterinarias)]. Universidad Agraria de la Habana.
- Ianneta, M., & Colonna, N. (2005). Salinización. LUCINDA, Ed.) Recuperado el Mayo de 2015, de Land care in desertification affected áreas (LUCINDA): [http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B3\\_Leaflet\\_ES.pdf](http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B3_Leaflet_ES.pdf).
- Martínez, E., Matos, A., & Martínez, Y. (2009). Azadirachta indica A. Juss. Opción eficaz para el manejo medio ambiental en la zona seca del Sur de Guantánamo.
- Milá, F., Herrera, R., & Sánchez, R. (2015). Determinación de los Factores Limitantes y Agroproductividad con la Utilización del Sistema de Información Geográfica en la Provincia de Guantánamo.
- Monroy, R., & Colín, H. (2016). El guamúchil *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, un ejemplo de uso múltiple. Madera y Bosques, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011278>
- O'Farrill, A. (2018). Restauración con técnica de forestería análoga de áreas afectadas por la salinización en fincas forestales del valle de Guantánamo, Cuba [Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales]. Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz Montes de Oca". Facultad Forestal y Agronomía. Centro de Estudios Forestales.
- O'Farrill, A. (2012). Recuperación de la biodiversidad forestal en tierras severamente afectadas. Simposio Internacional "Masonería e integración en la sociedad actual".
- Olivera, D. (2012). Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies": La Degradación de los Suelos de Cuba. Madrid. Boletín de Noticias IDI, 26, 03-12.
- Pérez, E., & Fals, A. R. (2017). Algunos indicadores de la restauración ecológica, para rehabilitar territorios degradados en Cuba. 7mo Congreso Forestal de Cuba. Convención Internacional Agro- Forestal.
- Piedrahita, O. (2011). Capacidad de intercambio cationico. Accedido el, 18.
- PNCMS. (2000). Programa Nacional de mejoramiento y conservación de suelos. Instituto de Suelos. Agrinfor La Habana.
- Remond, R. (2004). Estudio del estado de degradación de los paisajes de Cuba. Casos de estudio: Provincia La Habana y municipio Artemisa [inédito] [PhD Thesis, Tesis presentada en opción al título académico de Doctor en Ciencias]. <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/318>
- Renda, A. (2017). Suelos forestales de cuba y su importancia en la reforestación intensiva.
- RIFA. (2011). Forestería Análoga. Una guía práctica. Red Internacional de Forestería Análoga. [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:anIE-cIxSzScJ:www.analogforestry.org/?smd\\_process\\_download=1&download\\_id=2551](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:anIE-cIxSzScJ:www.analogforestry.org/?smd_process_download=1&download_id=2551)
- Rodríguez, R., & Sánchez, I. (2007). Análisis económico ambiental en los suelos salinos de la Empresa de Cultivos Varios de Guantánamo. 81.
- Sánchez, R., Milá, F., Planas, J., Sánchez, I., Cintra, M., & Lugo, D. (2008). Informe de suelo realizado a tres fincas forestales (1, 2 y 14) del Paraguay (p. 10). Centro provincial de suelos. Guantánamo.
- Senanayake, R. (2005). Principles of Analog Forestry. <http://www.richforests.org/our-method/analog-forestry/>
- Senanayake, R. (2011). Realizando el valor de la Biomasa Fotosintética: El Rol de la Forestería Análoga. 5to Congreso Forestal de Cuba, La Habana, Cuba.
- Toirac, W., Bravo-Iglesias, J. A., Hechavarría-Kindelán, O., Matos-Leyva, A., Ajete-Hernández, A., Fuentes-Útrías, V. M., Suárez-Ramos, E., Sordo-Olivera, L., Ofarril-Colebrook, A., & Villamet-Pineda, P. (2014). Restauración de áreas degradadas mediante la aplicación de la forestería análoga en la provincia de Guantánamo, Cuba. Revista Forestal Baracoa, 33(1), 3-7.
- Torres, D., & Gamboa, L. (2008). Manual de Valoración Ecológica. Red Internacional de Forestería Análoga.
- Villamet, P. (2013). Director de la Unidad Silvícola de Base Guantánamo. Comunicación Personal. [Comunicación personal].