

INVENTARIO DE CARBONO EN LA RECUPERACIÓN DE PLAYAS CUBANAS

Carbon inventory for the nourishment of Cuban beaches

Niurka PEDRO SILVA^{1*}, Gloria de las Mercedes GÓMEZ PAÍS², Ernesto Ramón TRISTÁ BARRERA¹,
Lourdes RIVAS RODRÍGUEZ³ y Oralís Catalina ALBURQUERQUE BROOKS⁴

¹ Inversiones GAMMA, División Comercial de Ingeniería Costera, Calle 14 núm. 308 entre 3a y 5a, Miramar, Playa, 11300, La Habana, Cuba.

² Dirección General de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Línea 8 entre N y O, Vedado, Plaza de la Revolución, 10400 La Habana, Cuba.

³ Departamento de Procesos Físicos, Instituto de Ciencias del Mar, Loma 14 entre 35 y 37, Alturas del Vedado, Plaza de la Revolución, 10600 La Habana, Cuba.

⁴ Departamento de Química, Instituto de Ciencias del Mar, Loma 14 entre 35 y 37, Alturas del Vedado, Plaza de la Revolución, 10600 La Habana, Cuba.

*Autor para correspondencia: niurka.pedro@gmail.com

(Recibido: mayo de 2019; aceptado: mayo de 2020)

Palabras clave: inventario de carbono, carbonato de calcio, remoción-deposición de dióxido de carbono, recuperación de playas.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue hacer un inventario de carbono para la recuperación de playas arenosas cubanas. Se emplearon los datos de la inversión ejecutada en el archipiélago de Jardines del Rey en Ciego de Ávila, Cuba, en 2016, y un algoritmo del inventario de carbono para la recuperación de playas. El presupuesto de carbono fue de 62531.04 Mg, de los cuales 952.36 estuvieron contenidos en los combustibles consumidos, 2338.95 fueron retenidos por la vegetación protegida o sembrada y 59239.73 por las arenas vertidas. La proporción de moles en los compuestos de carbono se empleó para transformar el inventario en una captura de 5084.16 Mg de dióxido de carbono de la atmósfera y una deposición neta de 493652.11 Mg de carbonato de calcio en las playas. Las cuantías se valoraron en 127 104.06 y 30 413 906.67 pesos cubanos (MT), respectivamente. Los valores se sumaron y el total se comparó con el costo de la inversión. Se dedujo un valor actual neto positivo representativo de una inversión rentable en términos de captura de carbono y de incremento de superficies con arenas carbonatadas en las playas estudiadas. Recomendamos continuar el estudio de las playas arenosas para completar el inventario con la futura investigación de la emisión de carbono derivada de los cambios producidos en la vegetación de la zona submarina.

Key words: carbon inventory, calcium carbonate, carbon dioxide capture-deposition, beach nourishment.

ABSTRACT

The objective of this study is to construct an inventory of carbon for the nourishment of Cuban sand beaches. It uses data of a beach nourishment project executed in 2016 in the archipelago of Jardines del Rey in Ciego de Ávila, Cuba, according to an algorithm

of carbon inventory for the recovery of beaches. The carbon budget was 62531.04 Mg, of which 952.36 were contained in consumed fossil fuels, 2338.95 were retained in the protected or rehabilitated vegetation, and 59239.73 Mg were retained in carbonate sands. The mole ratio in carbon compounds was used to transform the inventory into a net capture of 5084.16 Mg of carbon dioxide and the net depositions of calcium carbonate at 493652.11 Mg. These amounts were valued at 127 104.06 and 30 413 906.67 Cuban pesos, respectively. The total amounts were compared with the cost of investment. A positive net present value was deducted, representing a profitable investment in terms of carbon capture and increased carbonate sand surfaces on the studied beaches. We recommend to continue the study of sand beaches, in order to complete the inventory by our further research on carbon emission due to changes produced in the vegetation of the submarine zone.

INTRODUCCIÓN

El inventario de carbono es una práctica para determinar cambios en las existencias de este elemento químico debidos a la intervención de las actividades humanas, como se observa en los sectores forestal (Álvarez y Mercadet 2011) y energético (IPCC 2006). Pedro et al. (2019a) lo ajustaron para evaluar los proyectos de inversión en recuperación de playas, lo cual se justifica para cumplir lo establecido por el Reglamento del Proceso Inversionista legislado por el Decreto 327 (2014) del Consejo de Ministros de Cuba, en cuanto al estudio de factibilidad técnico-económica.

En el ajuste se integran el método sectorial propuesto por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2006), el manejo estadístico propuesto por Doménech et al. (2010) para calcular emisiones indirectas en la huella de carbono MC3 y los modelos de densidad aparente, fracción de carbonato de calcio (CaCO_3) en las arenas y retención de carbono en la flora de las dunas costeras generados por Pedro (2017a) y Pedro et al. (2017, 2019b) en ocho sectores de playas y dos préstamos de arenas en el norte de Cuba.

El dióxido de carbono (CO_2) y el CaCO_3 son dos compuestos relevantes en el contexto del cambio climático. Aunque no son tóxicos, la variación de su concentración en el ambiente puede ocasionar efectos indirectos adversos para el hombre y los ecosistemas, como acidificación de los océanos, erosión costera o efecto invernadero. De ahí que requieran evaluación y monitoreo continuos. El CO_2 por su responsabilidad en el calentamiento global y el CaCO_3 porque constituye más del 80 % de las playas arenosas, cuya rehabilitación contribuye a disminuir la degradación de hábitats y paisajes, e incrementar la resiliencia de los ecosistemas, la provisión de bienes y servicios, la adaptación y la mitigación del cambio climático.

Estos ecosistemas, priorizados por su relevancia en el hábitat de especies, el desarrollo del turismo y la protección del patrimonio construido (como refiere el Decreto Ley 212 Gestión de la Zona Costera [MINJUS 2000]), están afectados en la actualidad por la pérdida de arenas, entre otras causas por la elevación del nivel medio del mar y la extracción desmedida para la actividad constructiva (Juanes 1996).

La recuperación de playas con el uso de máquinas de construcción se ejecuta en Cuba desde la década de 1980 (Juanes 1996); está considerada en la política ambiental cubana dentro de las Bases del plan nacional de desarrollo económico y social hasta el 2030: Visión de la nación, ejes y sectores estratégicos; el Plan del estado para enfrentar el cambio climático, aprobado en Cuba por el Consejo de Ministros en 2017 (conocido también como Tarea vida); la Estrategia ambiental nacional 2017/2020, y el Programa nacional sobre la diversidad biológica 2016-2020. Constituye una inversión ambiental de acuerdo con el Reglamento del proceso inversionista (MINJUS 2014) y requiere de un estudio de factibilidad técnico-económica para su desarrollo.

El cálculo del beneficio económico de los proyectos de inversión se problematiza, porque las playas no tienen precio. Para resolver esto, se decidió remplazarlo con una valoración del beneficio de los proyectos por reducir emisiones de CO_2 y reponer el CaCO_3 contenido en las arenas que se vierten para rehabilitar el suelo. Esta es una práctica que se emplea para orientar procesos de diseño y toma de decisión de proyectos en el contexto del cambio climático, como proponen Colomb et. al (2012).

Se presenta como problema la necesidad de cuantificar la emisión neta de CO_2 y la deposición neta de CaCO_3 , para lo cual Pedro et al. (2019a) diseñaron un algoritmo del inventario de carbono en la recuperación de playas. La metodología del algoritmo se divide en cuatro etapas: recopilación de datos,

estimación, validación y valoración del inventario. Planeada la evaluación de proyectos de inversión en el contexto del cambio climático, el presente estudio definió como objetivo general hacer un inventario de carbono en la recuperación de playas cubanas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El incremento de superficie y la capacidad de carga de usuarios en las playas se calculó de acuerdo con la NC 93-06-302 (NC 1988) y estos parámetros se asumieron como indicadores de impacto social (Pedro 2017b). El cambio del presupuesto de carbono en las playas se calculó mediante el algoritmo de inventario de carbono en la recuperación de playas de Pedro et al. (2019a), y se estimó sumando los aportes por parte de combustibles, vegetación y arenas gestionadas; se expresó en masa de carbono elemental (toneladas) y pesos cubanos. Se ajustó la ecuación básica para estimar las emisiones y la absorciones de CO₂, según las Directrices del IPCC (2006).

$$\text{Emisión} = \text{AD} \times \text{Factores de emisión} \quad (1)$$

La recuperación de playas se identificó con los sectores Energía y Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés).

Los datos de la actividad (AD, *activity data*) se identificaron con el consumo anual de energía, el área con cubierta vegetal y el volumen de arena. Se eligieron como factores de contenido de carbono los factores de contenido de carbono por omisión para los principales combustibles fósiles (IPCC 1996), la retención media de carbono (RMC) de las formaciones forestales cubanas (INAF 2018) y la CaCO₃ en las arenas (Pedro et al. 2017).

La metodología del inventario está publicada (Pedro et al. 2019a). A continuación, se resume lo básico.

Recopilación de datos

Los AD y FC se recolectaron en los documentos de inversión: proyectos ejecutivos, balances y contratos. Se completaron con datos publicados por fuentes de prestigio (IPCC 1996) o se generaron por modelos resultantes de la investigación del ecosistema de playas arenosas (Pedro et al. 2017), como se explica a continuación.

En el balance económico anual se incluyeron los gastos en combustibles, materiales y servicios. Se convirtieron en consumo de energía mediante factores de conversión (precios, equivalencias, valores calóricos netos de los combustibles, índices

de materialización e intensidad energética), según se planteó en Doménech et al. (2010) y Pedro et al. (2019a). Los factores de contenido de carbono de los combustibles se eligieron por defecto con base en las Directivas para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC 1996).

Las áreas con cobertura vegetal se midieron con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las RMC se identificaron con el tipo de vegetación: en la manigua costera se tomaron 187.49 toneladas de carbono por hectárea (tC/ha), valor registrado en el Reporte de carbono del Instituto de Investigaciones Forestales del Ministerio de la Agricultura en Cuba (INAF 2018). Pedro et al. (2019b) determinaron una RMC de 7.12 tC/ha en la flora de las dunas para esta investigación; las especies identificadas fueron: *Panicum amarum* Ell. (Poaceae); *Ipomoea pes-caprae* (L.) R. Br. boniato de costas (Convolvulaceae), *Canavalia rosea* (Sw.) DC frijol de playa (Fabaceae), *Suriana maritima* (L.) DC (Surianaceae), *Bidens alba* (L.) romerillo (Asteraceae), *Cynodon dactylon* (L.) pers. grama (Poaceae), *Wedelia trilobata* (L.) Hitch romero de costa (Asteraceae).

Los volúmenes de arenas vertidas se obtuvieron en los informes de la ejecución del proyecto. Estos documentos pertenecen a la inversión, como se establece en MINJUS (2014). Pedro (2017a) y Pedro et al. (2017) evaluaron arenas de 0.342 mm en promedio granulométrico en ocho sectores de playas con una densidad promedio aparente de 1.449 g/cm³ y fracción de CaCO₃ de 816 mg/g en promedio. Las dos variables se relacionaron en función de la granulometría y se ajustaron en modelos matemáticos para generar nuevos datos de densidad y contenido de CaCO₃ a partir de la granulometría de las arenas registrada en los proyectos de vertimiento en cada playa.

Estimación del inventario de carbono

El algoritmo de inventario de carbono se programó en un libro de Excel. Los datos recopilados se ingresaron en la columna de entrada por sector (Energía y AFOLU). Los resultados fueron los siguientes: consumo anual de energía en gigajulios (GJ), carbono retenido en combustibles, vegetación, arenas, emisión neta de CO₂ y deposición neta de CaCO₃, todos en Mg de acuerdo con el Decreto Ley 68 de 1982 para implementación del Sistema Internacional de Unidades en Cuba (MINJUS 1982).

Validación del inventario de carbono

Se calculó la incertidumbre por el método de propagación del error, como planteó el IPCC para el Nivel 1 (IPCC 2006). Dos especialistas del Instituto de Ciencias del Mar realizaron un control de calidad

del inventario. Se verificó el origen y la veracidad de los datos en sus registros primarios y la observancia de la metodología del inventario descrita por Pedro et al. (2019a).

El inventario se estimó por métodos alternativos que fueron seleccionados previamente por Pedro et al. (2018). La emisión neta de CO₂ se calculó con EX-ACT, un método promovido por la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación según Bernoux et al. (2013). La deposición de CaCO₃ se comparó con mediciones realizadas en dos préstamos de las arenas vertidas en Jardines del Rey en 2016. Las medidas fluctuaron entre 801 y 887 mg/g de CaCO₃ y 1.126 y 1.228 g/cm³ de densidad aparente, característicos de sedimentos carbonatados de origen biogénicos (Pedro et al. 2017).

Los resultados del inventario y los alternativos se compararon para determinar la existencia de una diferencia significativa (**Cuadro I**). Se relacionaron por el origen de las emisiones en parejas que conformaron cuatro grupos denominados: arenas, energía, bosques y siembras. Para el análisis se utilizó el programa Statgraphics Centurion (StatPoint 2006). En el menú seis-sigma se usó la opción analizar, datos continuos, comparación de varias muestras. Los resultados fueron la prueba F en la tabla ANOVA, que identifica si hay una diferencia significativa entre las medias de las muestras, y la prueba de múltiples rangos, que confirma las medias significativamente diferentes (LSD de Fisher).

CUADRO I. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS INVENTARIOS.

Datos estadísticos	Unidades	Inventario de carbono	Inventario alternativo
Combustibles	Mg CO ₂	3491.99	3557.00
Bosques	Mg CO ₂	8570.61	6021.00
Herbazal	Mg CO ₂	5.55	6.00
Arenas	Mg CaCO ₃	493 652.11	498 666.00
Promedio		126 430.07	127 062.50
Mínimo	Mg CO ₂	5.55	6.00
Máximo	Mg CaCO ₃	493 652.11	498 666.00
Rango		493 647.44	498 660.00

Fuente: elaboración propia.

Valoración del inventario de carbono

Se representó el beneficio de la inversión ante el impacto del desplazamiento de la línea de costas sobre los bosques costeros en dos escenarios, con y sin inversión, en tres momentos: al inicio (año 0), en el año de la inversión (año 1) y 30 años después

(año 30). Para cada momento se calculó la pérdida de bosques según el desplazamiento registrado en los documentos de la inversión, en específico los proyectos de vertimiento de arenas y el contrato para la siembra en las dunas.

Se calculó la emisión bruta por la pérdida de bosques en el escenario sin inversión. Se calculó e interpretó el balance de carbono entre los escenarios. Las emisiones netas de CO₂ se valoraron en 30.00 USD/t CO₂, precio referenciado en el informe World Bank (2017) para 2030. La deposición de CaCO₃ se valoró en 61.61 pesos cubanos, moneda total (MT). Dicho precio fue aprobado para el carbonato 5 por la Resolución 113/2017 de la OSDE GEOMINSAL perteneciente al Ministerio de Energía y Minas de Cuba. Se calcularon el valor actual (VA) y el valor actual neto (VAN) del inventario según Pedro et al. (2019a). Se analizó la sensibilidad del VAN por la variabilidad de las emisiones netas de carbono si cambia el área de siembras.

RESULTADOS

Se comprobó el incremento de superficies con uso turístico (Pedro 2017b). El área de exposición solar (franja de arena entre el límite de marea alta y la duna litoral) creció en 269 320 m²: 38 920 en Las Coloradas, 80 000 en Flamenco y 150 400 en El Paso (**Fig. 1**).

La ocupación media de 10 m² por usuario derivó la capacidad de carga de 26 932 usuarios en el área de exposición solar: 3892 en Las Coloradas, 8000 en Flamenco y 15 040 en El Paso. De acuerdo con la NC 93-06-302 (NC 1988), se asumió que en el área de exposición solar solo permanece el 40% de los usuarios de la playa; de acuerdo con ello, resultó un total de 67 330 usuarios de las playas: 9730 en Las Coloradas, 20 000 en Flamenco y 37 600 en El Paso. A continuación se describe la valoración del incremento de la retención de carbono en las playas.

Datos de la actividad y factores de emisión de carbono

En el balance económico anual de la inversión se evidenció un gasto de 8 627 021.00 pesos cubanos vinculados al consumo de energía: 7397.00 en combustibles fósiles, 1993.00 en servicio eléctrico y 8 617 631.00 en la adquisición de bienes y servicios cuyas facturas incluyen gastos de energía, como plantearon Doménech et al. (2010). El gasto se convirtió en el consumo anual de 47 172.14 GJ de energía. Los factores de emisión de carbono elegidos por defecto fueron: 20.2 diésel, 18.9 gasolina y 20.0 lubricantes,



Fig. 1. Playa El Paso antes (10 de febrero de 2016) y después (1 de octubre de 2016) de la inversión.

todos en toneladas de carbono por terajulios (tC/TJ) (IPCC 2006).

Se midieron 57.52 ha de manigua costera: 34.84 en Las Coloradas, 11.51 en Flamenco y 11.17 en El Paso. Se verificó la siembra de 0.21 ha en las dunas de playa El Paso. Se determinó una RMC de 187.49 tC/ha en la manigua costera (INAF 2018) y de 7.12 en la flora de las dunas costeras, determinada para esta investigación en cuatro sectores de las playas del este de La Habana en verano (Pedro et al. 2019b).

Se comprobó el vertimiento de 834247 m³ de arena: 205 189 m³ en Las Coloradas, 251 240 m³ en Flamenco y 377 818 m³ en El Paso. Se generaron datos de la densidad aparente y la fracción de CaCO₃ por playa: 1.49 y 0.84 g/cm³ en Las Coloradas, 1.43 y 0.80 g/cm³ en Flamenco y 1.44 y 0.81 g/cm³ en El Paso, respectivamente, como describieron Pedro et al. (2017).

Inventario de carbono

En cuanto a combustibles fósiles se inventariaron 952.36 Mg de carbono, producto del consumo anual

de energía estimado en la inversión de 2016 por los factores de contenido de carbono elegidos por tipo de combustibles en el módulo del sector Energía en las Directrices del IPCC (1996). El inventario estimado se multiplicó por 44/12 y se transformó en la emisión total de 3491.99 Mg CO₂ a la atmósfera.

En el Sector AFOLU se calcularon 2338.95 Mg de carbono retenidos en la vegetación, de los cuales 2337.44 Mg corresponden a la manigua costera protegida del desplazamiento de la línea de costa y 1.51 Mg a la vegetación sembrada en las dunas. Los megagramos totales de carbono por 44/12 se transformaron en -8576.15 Mg de CO₂ removidos de la atmósfera por la fotosíntesis y transformados en biomasa vegetal; de ellos, -8570.61 por la protección de la manigua costera y -5.55 por la siembra de la flora en las dunas (el signo negativo significa remoción de CO₂ atmosférico). El balance entre la emisión y la remoción de CO₂ resultó en una emisión neta de -5084.16 Mg CO₂.

En el volumen de arenas vertido que se registró en los informes de ejecución fue de 834 247.00 m³. Las arenas son transferidas del fondo del mar a las playas mediante el dragado y vertimiento. Para calcular el volumen neto, se tuvo en cuenta la vida útil de las playas recuperadas como el tiempo en que se pierde el 50 % del volumen de arenas y deben ser alimentadas. La proporción se utilizó para deducir la masa neta de arena en 417 123.50 m³ y se asumió como el volumen que queda después de su reacomodo y el regreso a la parte emergida.

A partir de la granulometría media de las arenas registradas en los proyectos ejecutivos y los modelos concebidos por Pedro et al. (2017) se generó la densidad aparente y la fracción de CaCO₃ de las arenas en cada playa. El volumen se convirtió de m³ a Mg mediante la densidad aparente por playa (Las Coloradas, 102 594.50 m³ con 1.49 g/cm³; Flamenco, 125 620.00 m³ con 1.43 g/cm³, y El Paso, 188 909.00 m³ con 1.44 g/cm³) y se totalizó en 604 617.58 Mg. Con la masa de arenas en Mg y la fracción de CaCO₃ de las arenas en porcentaje por playa (152 446.45 Mg y 84 % en Las Coloradas; 179 849.22 Mg y 80 % en Flamenco, y 272 321.91 Mg y 81 % en El Paso) se calculó una deposición de CaCO₃ igual a 493 652.11 Mg CaCO₃. La masa total de CaCO₃ se transformó usando la relación molar del compuesto (12.0003/100) en el inventario de 59 239.73 Mg de carbono.

En la recuperación de playas no se producen emisiones de CO₂ por la quema de vegetación; sin embargo, se generan otras emisiones de CO₂ al impedir la remoción de la vegetación que se destruye

con el dragado. No se incluyeron las emisiones de CO₂ generadas por la intervención del proyecto en el fondo marino, por la falta de datos del área efectiva de dragado y de la vegetación que crece en dicha superficie.

Validaciones del inventario

La incertidumbre del inventario se programó en un libro de Excel de acuerdo con lo que se recomienda para el Nivel 1 en las Directrices del IPCC (2006). Para cada categoría del inventario tanto en el sector energía como en el sector AFOLU se identificaron los errores relativos de los AD y los FC. Las fuentes de los errores relativos en por ciento fueron las Directrices del IPCC (2006) y los modelos generados por Pedro et al. (2017, 2019); por omisión, se asumió un 5%. Los errores se combinaron según la ecuación de propagación del error.

El resultado de la incertidumbre fue de 2.7 %. Por diferencia se asumió una certeza del 97.23% y se calificó el inventario como extremadamente probable, como se explicó en Pedro et al. (2019a). En este resultado influye el inventario de carbono en las arenas, que representa el 94.7% del total. El volumen de arena vertido es un dato confiable, ya que se reporta diariamente como parte de la tecnología aplicada para evitar la extracción excesiva de arenas. La cuantía se mide en la cántara de la draga y se comprueba con equipos de topografía en las áreas de playa.

El control de calidad externo resultó sin señalamientos. Se comprobó en la veracidad de los datos y la observancia del algoritmo del inventario de carbono diseñado por Pedro et al. (2019a).

La emisión de CO₂ por la quema de combustibles, la remoción de CO₂ por protección de los bosques costeros, la remoción de CO₂ por la siembra en las dunas para restaurar la diversidad vegetal de modo que aumente su resiliencia, y la deposición de CaCO₃ por el vertimiento de arenas, se calcularon con métodos alternativos. Los resultados obtenidos se compararon con los del inventario de carbono compilados según Pedro et al. (2019a). Se ordenaron en pares (inventario y alternativo) la emisión de CO₂ por quema de combustibles fósiles (3491.99 y 3557.0 Mg CO₂), la remoción de CO₂ por bosques protegidos (8570.61 y 6021.00 Mg CO₂), la remoción de CO₂ por la siembra en las dunas (5.55 y 6.00 Mg CO₂) y la deposición de CaCO₃ por el vertimiento de arenas (493 652.11 y 498 666.00 Mg CaCO₃).

Los valores se colocaron en dos columnas y se realizó un análisis estadístico. Se empleó la tabla ANOVA que analiza la varianza de los datos en dos componentes, uno entre grupos y otro dentro

del grupo. El valor P resultó de 0.9972, mayor que 0.05, lo que demostró que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los dos grupos de datos con un 95 % de confianza. El resultado se confirmó en la **figura 2** en las gráficas de ANOVA y de LSD de Fisher. La mayor diferencia se observa en el par de la remoción de CO₂ por la pérdida de bosques, lo cual se debe a que la RMC de la manigua costera utilizada fue la reportada por INAF (2018), superior a la utilizada en el método EX-ACT por defecto para los bosques húmedos tropicales. Se asumió que los resultados de cada grupo proceden de las mismas poblaciones.

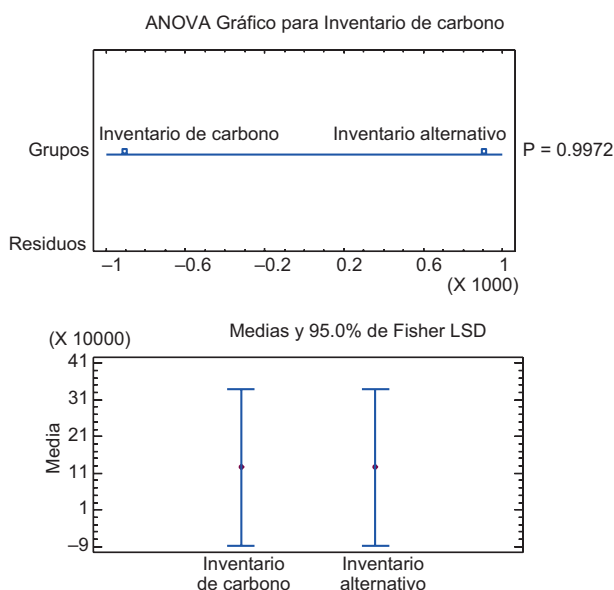


Fig. 2. Comparativo de los inventarios. Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

En 2016 se recuperaron tres playas en el archipiélago Jardines del Rey, al norte de la provincia Ciego de Ávila. El impacto económico superó los nueve millones de pesos cubanos, según se refiere en los documentos de inversión: el balance económico y los informes de ejecución. En Cayo Coco, playa Las Coloradas ganó 28 m de ancho promedio en 1390 m de longitud y playa Flamenco 40 m de ancho promedio en 2000 m de longitud. En cayo Guillermo, playa El Paso ganó 47 m a lo largo de 3200 m (**Fig. 1**).

Valoración del inventario de carbono

El inventario de carbono se valoró con un enfoque antrópico por el origen de la emisión y la deposición

y con precios de mercado (costos de remplazo), como refirieron Bustamante y Ochoa (2014). Álvarez y Mercadet (2015) señalaron que el aumento del nivel del mar es el principal impacto asociado con el cambio climático en el sector forestal cubano. Este impacto afecta la remoción del CO₂ de la atmósfera por el desplazamiento de los bosques costeros.

En la **figura 3** se representa el cambio del área con cobertura vegetal, a partir del desplazamiento de la línea de costa registrado en metros por año (m/año) en los proyectos de vertimiento de arena. Se multiplicó la longitud de la playa por los metros de desplazamiento de costa calculado para 1 y 30 años y se asumió como el área perdida de bosques en un escenario sin inversión. En el escenario con inversión se consideró que la manigua costera se mantiene y se incrementa la cobertura vegetal con la siembra del herbazal natural de las dunas. El beneficio de la inversión se estimó en 0.63 ha en el primer año y 12.68 ha 30 años después (**Cuadro II**).

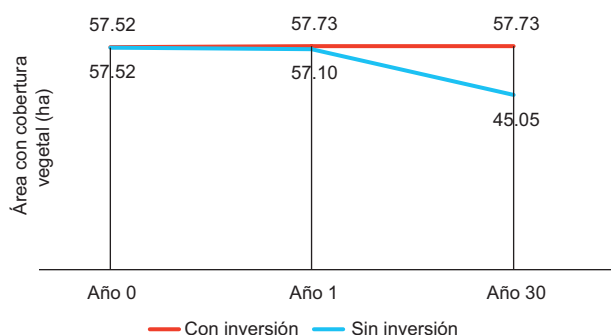


Fig. 3. Variación del área con cobertura vegetal. Fuente: elaboración propia.

La absorción de CO₂ atmosférico y la retención de carbono son funciones naturales de la vegetación que disminuyen con la pérdida de bosques, variando el inventario de carbono en el ecosistema. El beneficio de la inversión en emisiones netas de carbono se muestra en el (**Cuadro III**).

El empleo de EX-ACT en diferentes evaluaciones (Bernoux et al. 2013) facilitó la realización e interpretación del balance de carbono entre los escenarios. Se demostró que:

1. Las emisiones brutas totales muestran que los dos escenarios son fuentes de emisión de CO₂. El escenario sin proyecto mostró la mayor emisión a la atmósfera. La inversión incrementó considerablemente la deposición de CaCO₃ a la playa en un año por el vertimiento de arenas. Se analizaron el origen y las características físicas y químicas de las arenas, como plantean Pedro et al. (2017). Ésta es una práctica habitual en los proyectos de recuperación de playas y su control de calidad. De esta forma se proveen superficies sin contaminación con un material de relleno adecuado a las necesidades de especies costeras, la seguridad de los usuarios en las playas y a la protección de la zona.
2. Las emisiones netas totales mostraron a la inversión como un sumidero de carbono. La remoción de CO₂ atmosférico es un efecto esperado de la preservación y expansión de la vegetación costera. La deposición de CaCO₃ derivada del vertimiento de arenas de composición y granulometría equivalentes a la nativa, restituyó las condiciones estéticas de las playas, evidente en el incremento de la superficie de exposición solar para el desarrollo de la actividad turística como se muestra en la **figura 1** (Pedro 2017b).
3. Las emisiones brutas de CO₂ se relacionaron en el sector de energía, en la columna con inversión ya que se producen por efecto de la quema de combustibles para uso del transporte, la generación de electricidad para la producción de bienes y servicios requeridos. En el escenario sin inversión no se consideran las emisiones antropogénicas. El resultado del balance entre los dos escenarios se relacionó en la columna emisión neta con un valor igual a la emisión de CO₂ de la inversión. La mayor cantidad de las emisiones son generadas por el equipamiento de la construcción y quedan

CUADRO II. PROYECCIÓN PARA LA COBERTURA VEGETAL.

Tiempo	Área inicial (ha)	Siembras inversión (ha)	Pérdida de bosques por erosión (ha)	Cobertura sin inversión (ha)	Cobertura con inversión (ha)
Año 0	57.52	+0.21	0	57.52	57.73
Año 1	57.52	0.00	-0.42	57.10	57.73
Año 30	57.52	0.00	-12.47	45.05	57.73

Fuente: elaboración propia.

CUADRO III. BALANCE DE CARBONO EN Mg.

Sectores productivos que originan las emisiones	Compuestos de carbono	Emisión y deposición brutas (Mg)		Emisión y deposición netas (Mg)		
		Sin inversión	Con inversión			
Sector de la energía						
Consumo de energía	CO ₂	3	0	3491.99	3491.99	
Sector AFOLU						
Pérdida de bosques	CO ₂		8570.61	0	-8570.61	
Siembra en dunas	CO ₂		0	-5.55	-5.55	
Vertimiento de arena	CaCO ₃		0	-493 652.11	-493 652.11	
Total	CO ₂	1	8570.61	3486.44	2	-5084.16
Total	CaCO ₃		0	-493 652.11	-493 652.11	

Clave: positivo = fuente/negativo = sumidero.

Fuente: elaboración propia.

fuera del control del inversionista. En el sector AFOLU, la pérdida de bosques fue la fuente principal de emisión de CO₂. Se relacionó en la columna del escenario sin inversión. Se compensó y se colocó como remoción en el sector porque se espera que la rehabilitación de los volúmenes de arenas en las playas evite la pérdida de los bosques costeros. La inversión incrementó la siembra y protección de la vegetación y los bosques costeros. Pedro et al. (2018) estimaron el beneficio de la inversión por la remoción de CO₂ incrementada. La deposición de CaCO₃ se anotó como beneficio directo de la inversión.

La valoración del beneficio esperado de la inversión se expresó en pesos cubanos en moneda total (MT), que es la suma de los pesos cubanos (CUP) y los pesos cubanos convertibles (CUC). Las dos monedas circulan en la economía cubana y tienen el mismo valor para el sector estatal. El beneficio proporcionado por la inversión en emisión neta de CO₂ y deposición de CaCO₃ se muestra en el **cuadro III** (casilla 2).

La emisión neta de 5084.16 Mg CO₂ se multiplicó por 30 USD/tCO₂, precio observado en el reporte de la High Level Commission on Carbon Prices (World Bank 2017). De esta forma, se valoró en 152 524.87 US\$. El monto en USD se convirtió en 127 104.06 pesos cubanos convertibles (CUC), con la tasa de cambio del Banco Central de Cuba (1.20 US\$/CUC). El valor en CUC se expresó en MT, como se explicó anteriormente y se dividió entre el área total con cobertura vegetal. El total de 12.68 ha incorporó las superficies de los bosques protegidos (12.47 ha) y de la vegetación expandida por la siembra (0.21 ha). El cociente entre

el valor de la emisión neta de CO₂ y el área con cobertura vegetal derivó una tasa de 10 023.98 MT/ha, un indicador del beneficio económico de la mitigación generada por la recuperación de playas.

La deposición neta de 493 652.11 Mg de CaCO₃ se valora en 61.61 pesos cubanos MT por megagramo (precio referido anteriormente en la sección valoración del inventario), lo que arroja un total de 30 413 906.67 MT. Este importe se divide entre el volumen total de arena vertido (834 247.00 m³) y muestra una tasa de 36.46 MT/m³, indicadora del beneficio de la adaptación. Las tasas anteriores se recomiendan para la valoración económica de la retención de carbono en playas biogénicas, con granulometría y composición similares a las investigadas por Pedro et al. (2017).

El beneficio total de la inversión por el inventario de carbono (suma de 127 104.06 MT por la emisión neta de CO₂ y 30 413 906.67 MT por la deposición neta de CaCO₃), se totalizó en 30 541 010.73 MT. El beneficio total se actualizó con un interés del 5% (recomendado para las inversiones ambientales por el Banco de Inversiones). Se calculó un VA de 29 086 676.88 MT y se le descontó el costo de la inversión, resultando 19 397 008.20 MT, un VAN positivo que valora a la inversión como rentable en términos de retención de carbono.

Se analizó la sensibilidad del VAN por la variación de la emisión neta de carbono en dos escenarios. Se recalculó en un escenario sin siembras en las dunas, el cual mostró un VAN menor de 19 395 003.40 MT, con un intervalo de 2004.80 y una variación de -0.010 %. En el escenario con el doble del área sembrada en las dunas se dedujo un VAN de 19 399 013.00 MT mayor, con un intervalo de 2004.80 MT y una variación de +0.010 %.

Aunque las variaciones no son significativas para la rentabilidad de la inversión, demuestran que el área con cobertura vegetal influye en el valor de uso indirecto de las playas para la retención de carbono. No se analizaron las emisiones generadas por el consumo de energía, la pérdida de bosques y el vertimiento de arenas porque dependen del nivel de erosión que debe atenuarse en las playas.

CONCLUSIONES

Se inventarió el presupuesto de carbono en combustibles fósiles, vegetación y arenas costeras gestionadas en un proyecto de recuperación de playas, ejecutado en Jardines del Rey, Ciego de Ávila, Cuba, en 2016. Se cuantificaron la emisión neta de CO₂ y la deposición de CaCO₃ en términos físicos y monetarios. Se demostró el beneficio para la mitigación y adaptación al cambio climático con un impacto netamente positivo por la siembra, la protección de la vegetación y la rehabilitación de las arenas. Se demostró que la inversión genera una rentabilidad financiera positiva en términos de remoción del CO₂ de la atmósfera y la deposición de CaCO₃ como componente principal de la arena en playas con usos turísticos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar el estudio de la retención de carbono en el ecosistema de las playas arenosas para completar el inventario con la integración del impacto submarino de la inversión.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se sufragó con el Fondo de Desarrollo de Inversiones GAMMA S.A. Se reconoce a Adrián Gómez Armenteros por su preocupación por el desarrollo científico y tecnológico. A Lizzie Morales por sus indicaciones en la revisión de la redacción. Ada Teja por la revisión y traducción del resumen. A los árbitros anónimos que contribuyeron con sus comentarios a mejorar el artículo.

REFERENCIAS

Álvarez A. y Mercadet A. (2011). El sector forestal cubano y el cambio climático. Instituto de Investigaciones

Agroforestales, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba, 248 pp.

Álvarez A. y Mercadet A. (2015). El programa forestal cubano de enfrentamiento al cambio climático. *Revista Agricultura Orgánica* 21 (1), 11-15.

Bernoux M., Bockel L., Branca G. y Tinlot M. (2013). Herramienta de cálculo del balance de carbono ex-ante (EX-ACT). Guía técnica para la versión 3. Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, Roma, Italia [en línea]. http://www.fao.org/docs/up/easy-pol/873/EX-ACT-tech-guidelines_101SP.pdf 03/01/2018

Bustamante M.P. y Ochoa E. (2014). Guía práctica para la valoración de servicios ecosistémicos en Madre de Dios [en línea]. <https://wwf.panda.org/?229550/guiapRACTICAPARALAVALORACIONDESERVICIOSECOSSISTEMICOSENMADREDEDIOS> 09/09/2018

Colomb V., Bernoux M., Bockel L., Chotte J.L., Martin S., Martin-Phipps C. y Mousset J. (2012). Estudio de las calculadoras GEI para los sectores agrícola y forestal. Guía para la elección y utilización de herramientas de evaluación a nivel territorial. FAO-ADEME-IRD [en línea]. http://www.fao.org/fileadmin/templates/ex_act/pdf/ADEME/Review_existingGHGtool_VF_ES4.pdf 10/02/2017

Doménech J.L., Carballo A., Jiménez L. y Cruz de la J.L. (2010). Estándares 2010 de huella de carbono MC3. Comunicación técnica. Memorias del Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA10). Palacio Municipal de Congresos de Madrid, 22 al 26 de noviembre [en línea]. https://www.researchgate.net/publication/282132948_Estandares_2010_de_huella_de_carbono_MC3 09/05/2011

INAF (2018). Reporte de carbono 2017. Sistema de medición, reporte, monitoreo y verificación. Grupo Empresarial Agro-Forestal-Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba, 29 pp.

IPCC (1996). Directrices del IPCC de 1996 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero 1996 (versión revisada) (JT Houghton, LG Meira Filho, B Lim, K Treanton, I Mamaty, Y Bonduki, DJ Griggs y BA Callender, Eds.) Disponible en CD-ROM.

IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Eggleston H.S., Buendía L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K., Eds.). National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japón.

Juanes, J.L. (1996). La erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control. Tesis de Doctorado, Universidad de la Habana, La Habana, Cuba, 175 pp.

MINJUS (1982). Decreto Ley 68 de 1982. De la implantación del Sistema Internacional de Unidades. Ministerio de Justicia. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Especial No 9. La Habana, Cuba, 30 de diciembre.

- MINJUS (2000). Decreto Ley 212 de 2000. Gestión de la zona costera. Ministerio de Justicia. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Ordinaria No. 68. La Habana, Cuba, 8 de agosto.
- MINJUS (2014). Decreto 327 de 2014. Reglamento del proceso inversionista. Ministerio de Justicia. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Extraordinaria No. 5. La Habana, Cuba, 23 de enero.
- NC (1988). Norma Cubana NC 93-06-302-1988. Sistema de normas para la protección del medio ambiente. Paisaje. Áreas de playa. Requisitos generales de proyecto para el ordenamiento. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba, diciembre.
- Pedro Silva N. (2017a). Modelación de densidad aparente y retención de carbono: arenas carbonatadas en playas cubanas. *M+A, Revista Electrónica de Medioambiente* 18 (2), 49-61. <https://doi.org/10.5209/MARE.56823>
- Pedro Silva N. (2017b). Medidas del impacto social de la ciencia y la tecnología para recuperación de playas. Memorias del III Simposio de Ciencia de la Sostenibilidad. Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba. XI Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 3 al 7 de julio [CD-ROM].
- Pedro Silva N., Rivas Rodríguez L., Alburquerque Brooks O. y Fernández Perera Y. (2017). Reajuste de densidad aparente y retención de carbono: modelos idóneos para arenas cubanas. *M+A. Revista Electrónica de Medioambiente* 18 (2), 117-135. <https://doi.org/10.5209/MARE.58369>
- Pedro Silva N., Gómez G. y Tristá E. (2018). Valoración del balance de carbono proporcionado por la recuperación de playas en Jardines del Rey. Memorias. X Simposio Universitario Ibero-Americano de Medio Ambiente, Palacio de las Convenciones de La Habana. XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, 26 al 30 de noviembre. [CD-ROM].
- Pedro Silva N., Gómez País G., y Tristá Barrera E. (2019a). Algoritmo del inventario de carbono en la recuperación de playas. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 40 (2), 25-38.
- Pedro Silva N., Martell A. y Ferrá H. (2019b). Retención media de carbono en vegetación costera: flora en playas cubanas. *M+A. Revista Electrónica de Medioambiente* 20 (1), 110-119.
- StatPoint (2006). Statgraphics Centurion XV v. 15.2.05. StatPoint Technologies [programa informático].
- World Bank (2017). Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. World Bank, Washington DC [en línea]. <https://www.carbonpricingleadership.org/report-of-the-highlevel-commission-on-carbon-prices> 23/05/2018