

## Algoritmo del inventario de carbono en la recuperación de playas

Niurka Pedro Silva  
Inversiones GAMMA S.A., Habana, Cuba.  
e-mail: [niurka.pedro@gmail.com](mailto:niurka.pedro@gmail.com)

Gloria de las Mercedes Gómez Pais  
Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, Habana, Cuba.  
e-mail: [gloriagp@citma.gob.cu](mailto:gloriagp@citma.gob.cu)

Ernesto Ramón Tristán Barrera  
Inversiones GAMMA S.A., Habana, Cuba.  
e-mail: [ernestotrista@gmail.cu](mailto:ernestotrista@gmail.cu)

### RESUMEN

Por primera vez se integraron métodos orientados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, técnicas del método compuesto de las cuentas contables y modelos matemáticos de retención de carbono por vegetación y arenas en playas cubanas. El objetivo de la investigación fue diseñar un algoritmo para el inventario de carbono en combustibles, siembra de vegetación y vertimiento de arenas, registrados en la actividad económica de la inversión para la recuperación de playas en Cuba. La metodología del algoritmo describió la cuantificación de emisión neta de dióxido de carbono y deposición de carbonato de calcio y la validación de estas variables. La investigación se concibió para orientar la toma de decisiones. Se recomendó programar el algoritmo en un sistema informático y aplicarlo en una propuesta de inversión.

**Palabras clave:** cambio climático, evaluación de proyectos, recuperación de playas, retención de carbono.

## Algorithm of carbon inventory in the nourishment of beaches

### ABSTRACT

For the first time methods developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change, techniques of the composed method of accounting accounts and mathematics models of carbon sequestration by vegetation and sands on Cuban beaches were integrated. The objective was to design an algorithm for the inventory of carbon in fuels, planting vegetation and dumping of sand, registered in the economic activity of the investment in the nourishment of beaches in Cuba. The methodology of the algorithm described the quantification of the net emission of carbon dioxide and deposition of calcium carbonate in these projects and the validation of both variables. This research was conceived to guide the decision making. It was recommended to program the algorithm in a computer system and apply it to an investment proposal.

**Keywords:** climate change, project evaluation, nourishment of beaches, carbon sequestration.

## **INTRODUCCIÓN**

El cambio climático es un reto global que impone la evaluación de los procesos productivos en este contexto. La recuperación de playas es una acción de ingeniería, considerada en la política ambiental cubana para atenuar la erosión costera. El Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 la contempla como medida de adaptación al cambio climático para atenuar la degradación de la zona costera y potenciar el turismo de sol y playa, un sector estratégico para la transformación productiva del país. El Plan del Estado para el enfrentamiento al cambio climático aprobado en Cuba por el Consejo de Ministros en el año 2017, conocido como “Tarea Vida”, la considera en una de sus tareas. La Estrategia Ambiental Nacional 2017/2020 plantea el incremento de acciones para rehabilitación y mantenimiento de ecosistemas, con el objetivo de aumentar el nivel de resiliencia que mejora la provisión de bienes y servicios favorables a la adaptación y mitigación del cambio climático. En este documento se refiere que el 84% de las playas cubanas están afectadas, principalmente por la acción del hombre y los eventos meteorológicos extremos. En el Programa Nacional sobre la Diversidad Biológica 2016-2020, se plantea detener la degradación de la zona costera con medidas de adaptación y mitigación.

La presencia de la recuperación de playas como necesidad reconocida en la política ambiental, promovió el desarrollo de la evaluación de los proyectos de inversión, dado el beneficio que generan para mitigación y adaptación del cambio climático. Con la concepción de la reforestación y la rehabilitación de suelos (acciones indicadas en el enfrentamiento del cambio climático), se potencia el desarrollo del turismo de sol y playa en el plano internacional.

La medida del aporte de los proyectos para mitigación y adaptación del cambio climático presentó como problema la necesidad de cuantificar la emisión neta de dióxido de carbono y la deposición de carbonato de calcio. La solución se planteó con un inventario de carbono en combustibles, siembra de vegetación y vertimiento de arenas, registrados como gastos de la inversión. Para probar esta hipótesis se integraron por primera vez métodos orientados por el IPCC (2006); técnicas del método compuesto de las cuentas contables MC3 (Domenech et al. 2010) y modelos de retención de carbono por vegetación y arenas de playas cubanas (Pedro 2017), (Pedro et al. 2017a), (Pedro et al. 2017b), aportes científicos de este proyecto.

La recuperación de playas alcanza costos millonarios, significativos para la economía cubana. La importancia de esta decisión, el control y la verificación de la efectividad de las inversiones motivó diseñar un algoritmo para el cálculo del inventario de carbono en combustibles, vegetación y arenas, registrados en la actividad económica de inversión.

## **BASES DEL ALGORITMO**

Las bases de la metodología se construyeron a partir de documentos de la política ambiental cubana: las Bases del Plan Nacional de Desarrollo Económico Social 2030, la Tarea Vida: Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático en Cuba, el Programa Nacional sobre la Diversidad Biológica 2016-2020 y la Estrategia Ambiental Nacional 2017-2020. Se tuvo en cuenta el Plan de inversiones del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente para el año 2016. Otros documentos que sirvieron de base para el diseño del algoritmo se obtuvieron en internet. Entre los que se destacan las Directrices para los inventarios nacionales de gases de

efecto invernadero (IPCC 2006) y los Estándares 2010 de la huella de carbono MC3 (Domenech et al. 2010). Los documentos nacionales revisados fueron: métodos presentados en Álvarez y Mercadet (2011), factores de conversión y valores calóricos de los combustibles dispuestos para su implementación en el Plan de la Economía cubana en el año 2016 por la Unión Cuba-Petróleo (CUPET), la organización estatal cubana encargada de satisfacer el suministro de combustibles y lubricantes al mercado nacional y el Reporte de carbono 2017 del sector forestal cubano acreditado por el Instituto de Investigaciones Agro-Forestales (INAF 2017). A continuación, se describen las tareas planificadas para diseñar el algoritmo.

### **Detección de productos y servicios con inventario de carbono**

Se evidencia la intervención de la actividad humana en el ciclo de carbono, a partir de las partidas de gastos por el consumo de combustibles, materiales y servicio. En los proyectos ejecutivos se identifican depósitos y flujos de carbono (emisión, absorción y deposición) incrementados por acciones antrópicas (uso de combustibles, siembra vegetación, rehabilitación de suelos). Los productos y servicios que contribuyen al “incremento de carbono”, se ordenan según los sectores y categorías principales del inventario establecidos por el IPCC (2006).

### **Selección de métodos para estimar el inventario**

Se adopta el abordaje metodológico orientado por el IPCC (2006) para el inventario de carbono. Se combina la información sobre el alcance de una actividad humana (datos de la actividad o *AD*, del inglés *activity data*) con coeficientes que cuantifican la emisión, absorción y deposición de carbono por actividad unitaria (factores de emisión, *EF* del inglés *emission factors*). La ecuación básica es:

$$Emisiones = AD \cdot EF \quad (1)$$

Se eligió el nivel 1 de complejidad metodológica (IPCC 2006)). Este es un nivel más flexible, admite el uso de estadísticas nacionales e internacionales y de la modelación. El inventario de carbono tiene dos expresiones: en depósitos y en flujos anuales. Para ambas se eligen métodos de cálculo. Se integran en un algoritmo que establece el método del inventario en combustibles, vegetación y suelos. La esencia del método es la siguiente:

La estimación del contenido de carbono en los combustibles, se expresa en la ecuación (2). Es el producto de la Energía por el factor de emisión y por el factor de oxidación de carbono (IPCC 2006)).

$$Carbono\ acumulado\ en\ combustibles = Energía \cdot Factor\ Emisión\ Carbono \cdot 0,99 \quad (2)$$

El contenido de carbono en los combustibles se relaciona con el consumo de energía, como se establece en IPCC (2006) para combustión móvil y estacionaria. El carbono total en los combustibles se considera proporcional a la energía que genera. La quema de combustibles para obtención de energía por las actividades humanas, incrementa la emisión de dióxido de carbono hacia la atmósfera. La emisión relacionada con una cuantía de carbono, se deriva de la relación molar del carbono en el dióxido de carbono (44/12).

La estimación de la retención de carbono por la vegetación, se expresa en la ecuación (3). Es el producto del área por formación forestal por la Retención Media de Carbono (RMC) (Álvarez y Mercadet 2011).

$$\text{Carbono en vegetación} = \text{Área de vegetación} \cdot \text{RMC} \quad (3)$$

La vegetación tiene la función natural de absorber el dióxido de carbono atmosférico por fotosíntesis. La absorción de dióxido de carbono correspondiente a una cuantía de carbono, se deriva de la relación molar (44/12).

La suma de la emisión con signo negativo y la absorción de dióxido de carbono derivan la emisión “neta” de dióxido de carbono, ecuación (4), una variable del problema planteado.

$$\text{Emisión neta de } CO_2 = -\text{Emisión de } CO_2 + \text{Absorción de } CO_2 \quad (4)$$

La estimación del contenido de carbono en las arenas, se obtiene de la relación molar del carbono en el carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), como se expresa en la ecuación (5).

$$\text{Carbono retenido en arenas} = \frac{12,0003 \cdot \text{Contenido de } CaCO_3}{100} \quad (5)$$

El contenido de carbonato de calcio en las arenas, es el producto del volumen de arena por la densidad aparente y la fracción de carbonato de calcio, según la ecuación (6).

$$\text{Contenido de } CaCO_3 = \text{Volum. de arena} \cdot \text{Fracción de } CaCO_3 \cdot \text{Densidad aparente} \quad (6)$$

La fracción de  $CaCO_3$  y la densidad aparente se estiman en función de la granulometría de las arenas. La tabla 1 presenta modelos idóneos para arenas carbonatadas de origen biogénico con granulometrías entre 0,125 y 1,00 milímetro.

**Tabla 1. Modelos idóneos para arenas cubanas**

Fracción de $CaCO_3$	Densidad aparente
a) $0,761686 + 0,159494 \cdot \text{granulometría}$	d) $1,36515 + 0,246454 \cdot \text{granulometría}$
b) $\frac{1}{\left(1,11247 + \frac{0,345246}{\text{granulometría}}\right)}$	e) $\sqrt{\left(1,60281 + 0,889895 \cdot \sqrt{(\text{granulometría})}\right)}$
c) $0,747289 + 0,243876 \cdot \text{granulometría} - 0,097348 \cdot \text{granulometría}^2$	f) $1,36478 + 0,248609 \cdot \text{granulometría} - 0,00248624 \cdot \text{granulometría}^2$
[Fuente: Pedro et al. 2017b]	

### Compilación del inventario

Los métodos seleccionados para el inventario se programan en un libro de cálculo. Se recopilan, generan o adaptan los datos requeridos para las estimaciones y se conforma la base de datos según orientaciones reportadas en IPCC (2006). Los datos provendrán de fuentes publicadas, asequibles, provenientes de instituciones prestigiosas. La compilación es el procesamiento de los datos en libro de cálculo. El inventario se expresa en unidades de masa de

carbono y de compuestos de carbono, como establecen las Directivas del 2006 (IPCC 2006). Se utiliza el sistema internacional de unidades (SI), establecido en Cuba por el decreto de la implantación del sistema internacional de unidades (MINJUS 1982).

### Validación del inventario

En la validación se verifica que el inventario se haya compilado correctamente, conforme con las orientaciones reportadas en IPCC (2006). Se evalúa la certeza, la calidad y el valor económico del inventario. Este último se vincula con el plano jurídico para utilizarlo como evaluación oficial.

La incertidumbre del inventario se asocia con diferencias estadísticas en los *AD* y con errores de muestreo en los *EF*. En IPCC (2006) se orienta la identificación, cuantificación y combinación de las incertidumbres para el método de nivel 1. El análisis se programa en una hoja de cálculo. Por cada categoría del inventario: se transcriben las cuantías de carbono estimadas ( $C_i$ ) y se calcula la incertidumbre o error relativo ( $\varepsilon_r$ ) de los *AD* y *EF*, según la ecuación (7), si se tienen muestras de datos de *AD* y *EF*. ( $S$ ) es la desviación estándar y ( $\bar{X}$ ) la media.

$$\varepsilon_r = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (7)$$

La desviación estándar y la media se calculan como indican las ecuaciones (8) y (9). Las  $X_i$  son los datos de la muestra.

$$S = \frac{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2}}{n - 1} \quad (8)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (9)$$

Por defecto de datos o del intervalo de confianza de *AD* y *EF*, se adopta el 95%. Si no se tiene una medida de la incertidumbre, se supone un intervalo de más menos un 5% (0,95 veces el dato para el límite inferior y 1,05 veces para el límite superior). Se calculan los límites superior e inferior del intervalo a partir del dato disponible. Se calcula el error absoluto ( $\varepsilon_a$ ) ecuación (10) y el error relativo o incertidumbre ( $\varepsilon_r$ ) ecuación (11), según se observa:

$$\varepsilon_a = \frac{\text{Límite}_{Superior} - \text{Límite}_{Inferior}}{2} \quad (10)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{DATO_{Disponible}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Como el cálculo del inventario se basa en la multiplicación, las incertidumbres de los *AD* y *EF* se combinan por suma. La combinación de la incertidumbre ( $\varepsilon_{Combinada}$ ) se realiza para cada categoría, según la ecuación (12).

$$\varepsilon_{Combinada} = \sqrt{\varepsilon_{r(AD)}^2 + \varepsilon_{r(EF)}^2} \quad (12)$$

Finalmente se calcula la contribución a la varianza por categoría, según la ecuación (13).

$$Contribución\ a\ la\ varianza = \frac{(\varepsilon_{Combinada} \cdot C_i)^2}{(\sum C_i)^2} \quad (13)$$

La contribución a la varianza de cada categoría se suma. La raíz cuadrada del total es el porcentaje de la incertidumbre del inventario de carbono. La certidumbre del inventario se evalúa según la tabla 2.

**Tabla 2. Evaluación del porcentaje de certidumbre del inventario total**

Certidumbre	Porcentaje	Certidumbre	Porcentaje
Virtualmente cierto	99% o más	Tan probable como improbable	33 a 66%
Extremadamente probable	95% o más	Improbable	33% o menos
Muy probable	90% o más	Muy improbable	10% o menos
Probable	66% o más	Extremadamente improbable	5% o menos
Más probable que improbable	50% o más	Excepcionalmente improbable	1% o menos
[fuente: (IPCC 2015)]			

En el control de la calidad del inventario se revisan la selección de los métodos de estimación y de los factores de emisión. Se verifican los datos de entrada. Los resultados del inventario se comparan por métodos alternativos. Se solicita una revisión externa a la realizada por el compilador del inventario (IPCC 2006).

El beneficio por mitigación y adaptación del cambio climático, se valora en términos económicos. La mitigación, a partir del balance entre emisión y absorción de dióxido de carbono (emisión neta) y el precio de la tonelada de CO<sub>2</sub> en el mercado. La adaptación, por combinación de la deposición “artificial” de carbonato de calcio con el precio de producto comercial. El beneficio de la protección costera se asigna porque la recuperación de playas contribuye a la resistencia de ecosistemas costeros como: uveral, manigua costera, manglar y herbazal sobre la duna.

Se sugiere el análisis costo-beneficio en la evaluación económica para orientar la política climática (IPCC 2015). El beneficio económico esperado ( $C_1$ ), es la suma de los beneficios estimados para mitigación y adaptación del cambio climático. El Valor Actual (VA) ecuación (14) del inventario, se estima con la tasa de descuento ( $r$ ) vigente para proyectos públicos.

$$VA = \frac{C_1}{1 + r} \quad (14)$$

La factibilidad de los proyectos se evalúa como establece el Decreto 327 de 2014 del Consejo de Ministros como Reglamento del Proceso Inversionista en Cuba (MINJUS 2014). Se deduce el Valor Actual Neto (VAN) con la suma del costo de la inversión ( $C_0$ ) con signo negativo y el Valor Actual del inventario (VA), ecuación (15).

$$VAN = C_0 + VA \quad (15)$$

## METODOLOGÍA DEL ALGORITMO

La consecución de las tareas planificadas derivó la metodología del algoritmo. El alcance del inventario es un año fiscal, de acuerdo con el Plan de la Economía Nacional. La estimación del incremento “antrópico” de carbono en depósitos y transferencias del ciclo de carbono, integra los aportes del uso de combustible para transporte, la producción de bienes y la contratación de servicios requeridos en las fases de: pre-inversión, ejecución y desactivación de la inversión.

### Productos y servicios con inventario de carbono

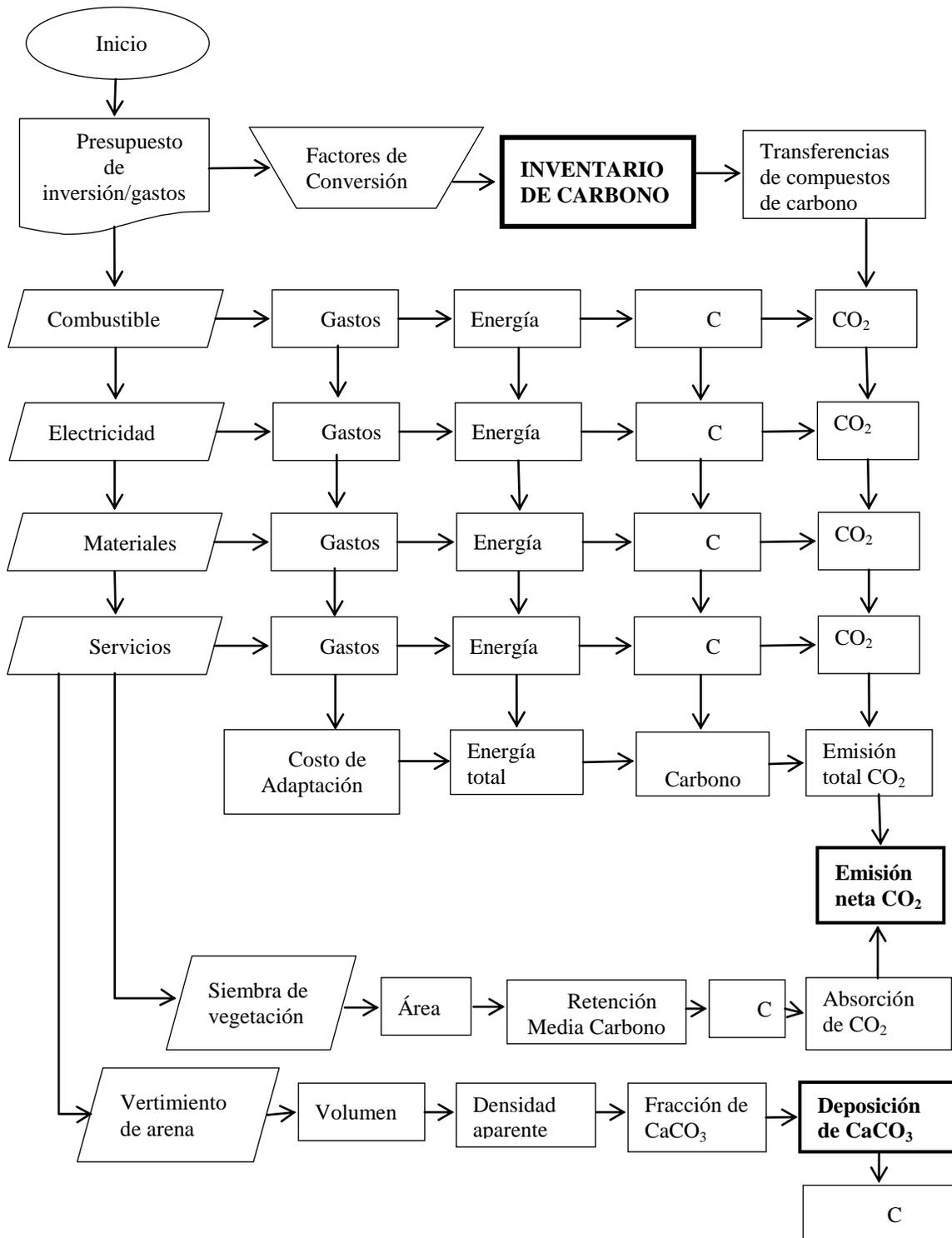
La intervención humana en el ciclo de carbono en los proyectos de inversión se manifestó por: planificación del uso de combustibles fósiles, rehabilitación de vegetación y de volúmenes de arenas. Estas actividades incrementan carbono en la atmósfera, la vegetación y el suelo. Los depósitos y transferencias de carbono detectados definieron los sectores y categorías principales del inventario (tabla 3), de acuerdo con lo orientado en IPCC (2006).

**Tabla 3. Sectores y categorías principales del inventario**

Productos y servicios con inventario de carbono	Unidad	Fuente
<b>Sector de energía. Uso de Combustibles fósiles</b>		
<i>Emisiones directas de CO<sub>2</sub></i> : Actividades de quema de combustible Fuentes móviles: Transportación por carretera Diésel Gasolina-90 Gasolina-94 Lubricantes	Unidades Monetarias	Presupuesto de Inversión
<i>Emisiones indirectas de CO<sub>2</sub></i> : Actividades de quema de combustible Fuentes estacionarias: Generación de electricidad Servicio eléctrico	Unidades Monetarias	Presupuesto de Inversión
<i>Otras emisiones indirectas de CO<sub>2</sub></i> : Actividades de quema combustible Fuentes móviles: Navegación Marine Gas Oil Fuentes estacionarias: Producción de materiales Materiales y enseres de oficina Materiales de limpieza Partes y piezas de vehículos Equipos Fuentes estacionarias: Producción de servicios Servicio de hospedaje Servicio de oficinas alto valor agregado Servicio de telefonía fija y móvil Servicio de mantenimiento Servicio de formación Servicio de restaurante	Unidades Monetarias	Presupuesto de Inversión
<b>Sector de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra</b>		
<i>Absorción de CO<sub>2</sub></i> : Actividades de siembra y protección a vegetación Depósitos: Formaciones forestales Área de manigua costera Área de uveral Área de manglar Área de herbazal sobre la duna	Hectáreas	Sistema Información Geográfica Tarea técnica rehabilitación de la Dunas
<i>Deposición de CaCO<sub>3</sub></i> : Actividades de dragado y vertimiento de arenas Depósitos: Suelos Volumen de arena	Metros cúbicos	Proyectos Ejecutivos
[fuente: Elaborada por los autores]		

### Algoritmo del inventario de carbono

El algoritmo, representado en la figura 1, es el método para el inventario.



**Figura 1. Algoritmo de inventario de carbono en la recuperación de playas**

(Fuente: elaborado por los autores)

El algoritmo se elaboró a partir de los métodos seleccionados en las “Bases de la metodología del inventario”. De él se derivó una metodología que vinculó ecuaciones con el uso de estadísticas nacionales e internacionales.

Se formuló la estimación del contenido de carbono en combustibles y la emisión de dióxido de carbono generada por su combustión. De acuerdo con el abordaje metodológico orientado en IPCC (2006), la emisión es el producto de las unidades de energía, por el factor de emisión de carbono y por el factor de corrección del carbono no oxidado. El consumo de energía se derivó del ejercicio contable de la organización, según Domenech et al. (2010). Del presupuesto de la inversión se eligieron los gastos planificados en: combustibles para uso del transporte propio, la adquisición de productos industriales y la contratación de servicios. Los gastos se ordenaron en las categorías de producto presentadas en la tabla 3.

Para el cálculo del consumo de energía del transporte, en Terajoule, primero se estimó el consumo aparente de combustible en litros. Se dividió el importe de los gastos de combustible entre el precio vigente. Los litros se dividieron entre el factor de conversión de toneladas por litros y se convirtieron en toneladas. Las toneladas se convirtieron en unidades de energía, multiplicándolas por el respectivo valor calórico neto. El precio, el factor de conversión y el valor calórico neto de los combustibles, fueron los implementados en el Plan Nacional de la Economía del año 2016, por la Unión Cuba-Petróleo (CUPET). El consumo de energía deducido derivó las emisiones directas.

El servicio eléctrico del local de trabajo derivó emisiones indirectas, se denominan así porque tienen lugar donde radican las industrias energéticas. Se dedujeron a partir de lo propuesto por Domenech et al. (2010). Se calculó el consumo de electricidad en kilowatts-hora (kWh), dividiendo el importe del gasto del servicio eléctrico entre el precio del kWh en el sector estatal. La conversión de kWh a Joule, se realizó a partir de la equivalencia utilizada por Domenech en sus trabajos: el consumo eléctrico de 1 kWh demanda 0,0036 Gigajoule de energía.

De los gastos planificados para la obtención de productos industriales (material gastable y equipos) y servicios (contratos de servicios científico-técnicos) requeridos por la recuperación de playas, se derivaron “otras emisiones indirectas”.

Los montos planificados para adquisición de productos industriales se convirtieron en toneladas de productos, entre un índice de materialización en toneladas por miles de pesos, por categoría material. Por defecto de información en las estadísticas nacionales, se adoptaron las bases de datos de la Organización Internacional del Comercio, datos espejo de las exportaciones a Cuba. Las toneladas de materiales, se multiplicaron por la intensidad energética de los materiales, en Terajoule por mil toneladas, asumidas por defecto de la *Methodology Report v12 Draf*, promovida por *WWF One Planet Business* (como se citó en Domenech et al. 2010).

La energía empleada en los servicios requeridos se derivó del costo planificado a este propósito. Se supuso que una parte del costo del servicio corresponde a gasto de energía. Se derivó el gasto energético en servicios de: hospedaje, oficinas de alto valor agregado, telefonía, mantenimiento, formación y restaurante, con porcentajes recomendados por Domenech et al. (2010). Los gastos se convirtieron en Gigajoule, como se explicó antes en el servicio eléctrico.

El servicio de navegación derivó “otras emisiones indirectas”. Se seleccionaron las partidas de gastos planificados para estos servicios. Se derivó el gasto del combustible como un 14%. Esta proporción fue recomendada por técnicos de la Empresa de Obras Marítimas experta en la recuperación de playas en Cuba. Derivado el importe del gasto en combustible, se siguió la rutina descrita para los combustibles.

El carbono retenido por la vegetación, se relacionó al área que ocupan las distintas formaciones forestales. En las playas cubanas las formaciones más frecuentes son: manigua costera, uveral, manglar y el herbazal sobre las dunas, según Álvarez y Mercadet (2011). La RMC de las tres primeras formaciones vegetales, se encontraron en el reporte de carbono del INAF (2017). La RMC en el herbazal que crece y estabiliza la duna, requirió una investigación. Se estudió la flora en cuatro sectores de las playas de Este de La Habana (Pedro et al. 2017a). Se identificaron siete especies vegetales y se determinó una RMC de 7,12 toneladas de carbono por hectárea. Se aceptó como adecuada para evaluar la captura de dióxido de carbono en proyectos de recuperación de playas y orientar la toma de decisiones del fomento de la vegetación costera.

La siembra en las dunas es parte de la tecnología de la recuperación de playas, fija el sedimento e impide que este salga del sistema fundamentalmente por acción del viento. La pérdida de arenas devasta las formaciones forestales por el escape de su sustrato. La retención de dióxido de carbono se cuantificó en la vegetación presente en la playa. El carbono retenido por la vegetación se cuantificó, como el producto del área de cada formación, en hectáreas, por su RMC. El carbono retenido se convirtió en absorción de CO<sub>2</sub> por relación molar. En este punto se estimó la primera variable del problema planteado: emisión neta de dióxido de carbono. Se sumó la emisión de CO<sub>2</sub> por la quema de combustibles fósiles (con signo negativo), con la absorción de CO<sub>2</sub> estimada por formaciones forestales sembradas y protegidas.

La retención de carbono por las arenas se investigó en ocho sectores de playas en la costa norte de Cuba. Se eligieron ocho sitios con desarrollo de la actividad turística. Las arenas analizadas resultaron de origen carbonatado, biogénico predominantemente. En las muestras colectadas en la duna, se comprobó que el componente fundamental son las algas calcáreas. Los moluscos, foraminíferos y bioclastos no identificados también se encontraron presentes, aunque en proporciones variables de una localidad a otra. El material proveniente de las fuentes terrestres fue insignificante, de acuerdo con el bajo contenido de los restos inorgánicos. Se observaron fragmentos de origen antrópico. El carbono orgánico tanto en la duna como en la postplaya de los sitios evaluados fue menor que 10 mg/g (1,0 %), característico de sedimentos carbonatados de grano grueso con poca superficie de adsorción. El contenido de carbonato de calcio superó el 80 % del contenido de las muestras (Pedro 2017).

Se cuantificó el contenido de carbonato de calcio como el producto del volumen de relleno, la densidad aparente y la fracción de carbonato de calcio de las arenas. El volumen de arena fue proyectado por Izquierdo et al. (2014). La densidad aparente y la fracción de carbonato de calcio fueron modeladas a partir de la granulometría de las arenas. Los modelos se validaron con arenas de préstamos para la recuperación y se eligieron los más idóneos (Pedro et al. 2017b). El contenido de carbono se dedujo por relación molar en el carbonato de calcio.

## Base de datos

Los datos se recopilaron como se describe a continuación. Se identificaron los importes de gastos en combustibles, materiales y servicios del presupuesto de la inversión. El precio, los factores de conversión y valores calóricos netos de combustibles, se adoptaron de los indicados por CUPET para el Plan de la Economía del año 2016.

La proporción del gasto energético en el costo de los servicios, la intensidad energética de productos industriales, el importe y peso de productos industriales exportados a Cuba se adoptaron de bases utilizadas en Domenech et al. (2010). Los factores de emisión de carbono de los combustibles, se eligieron “por defecto” en el Volumen 2: Capítulo 1 (IPCC 2006).

La absorción de carbono, se identificó con áreas de formaciones forestales. Las áreas se midieron con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se representaron en mapas. El área del herbazal de las dunas, se determinó con el esquema de siembra para la rehabilitación de las dunas y la longitud de las playas. Se seleccionaron las RMC por formación forestal en el Reporte de carbono 2017 y se adoptó la RMC del herbazal que crece sobre la duna determinada por Pedro et al. (2017a).

Se localizaron en los proyectos ejecutivos (Izquierdo et al. 2014), los volúmenes de relleno en metros cúbicos y la granulometría en milímetros. Se generaron densidad aparente y fracción de carbonato de calcio en las arenas, a partir de la granulometría, con los modelos presentados en la tabla 1.

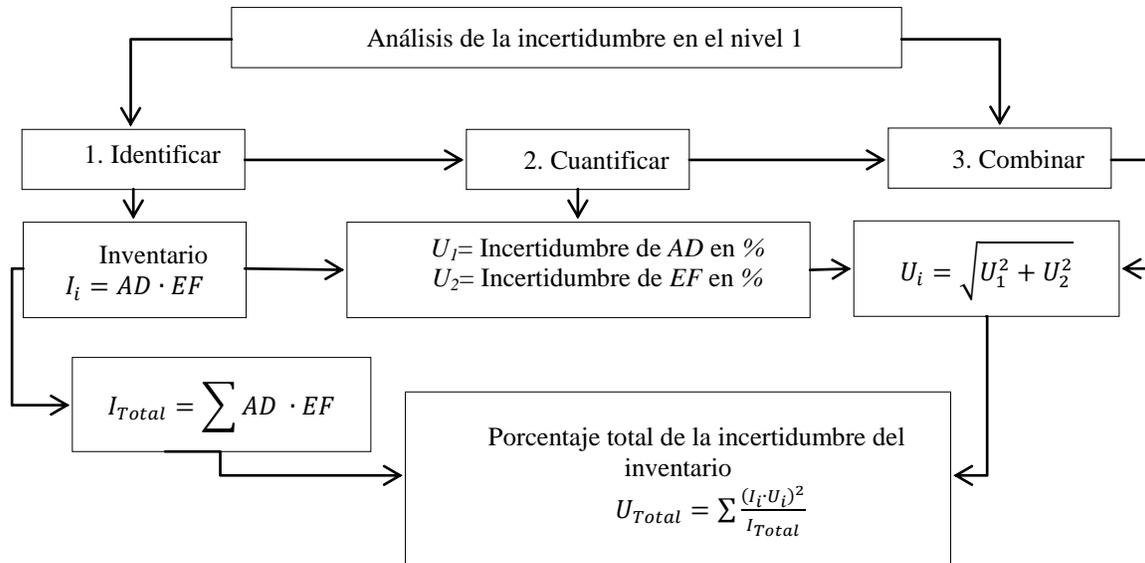
## Inventario de carbono

La compilación del inventario se realizó en un libro de cálculo en EXCEL. Se programaron los métodos de cálculo seleccionados en las “Bases de la metodología del inventario”. Se procesaron los datos para los sectores de: energía y agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Se estimó el presupuesto de inventario de carbono incrementado en un año. Se expresó en depósitos (combustibles, vegetación y arenas) y transferencias (emisión, absorción y deposición). Se resolvió la emisión neta de dióxido de carbono y deposición de carbonato de calcio.

## Validez del inventario

La validez del inventario se evaluó mediante la certeza, la calidad y el Valor Actual Neto. La deducción del porcentaje de incertidumbre (figura 2), se programó en una hoja de cálculo en EXCEL como sigue: se listaron las categorías de productos y servicios con inventario de carbono (tabla 3). Se relacionó el inventario de carbono estimado por categoría. Se programó la ecuación (7), para calcular la incertidumbre o error relativo de los *AD*. Se programó la ecuación (11), para calcular la incertidumbre de los *EF* por categoría.

Se combinó la incertidumbre de los *AD* y los *EF*, según la ecuación (12). Se programó la contribución a la varianza por categoría, según la ecuación (13). Se sumó la contribución a la varianza por categoría y al total se le calculó la raíz cuadrada y resultó el porcentaje total de la incertidumbre del inventario de carbono. El resultado del porcentaje de probabilidad de la incertidumbre se evaluó, acorde con lo descrito en la tabla 1.



**Figura 2. Esquema del análisis de incertidumbre del inventario**

[Fuente: elaborada por los autores, según IPCC 2006]

La calidad del inventario se controló con la revisión de la selección de los métodos de estimación y los factores de emisión. Se verificaron los datos de entrada. Se comparó el resultado del inventario estimado por una calculadora de carbono validada internacionalmente y las tasas de retención de carbono de formaciones forestales y arenas naturales de las playas cubanas. Finalmente, se realizó una revisión externa a la realizada por los compiladores del inventario.

El Valor Actual Neto es un requisito de la evaluación de proyectos, documentada en el Reglamento del Proceso Inversionista (MINJUS 2014). Su deducción se efectuó luego de valorar en términos económicos el beneficio estimado para mitigación y adaptación. La mitigación comprendió dos indicadores: emisión y la absorción de dióxido de carbono. Del balance, cuantía física de la emisión “neta” multiplicada por un precio adoptado del mercado, se dedujo el beneficio.

En la valoración de la adaptación se consideró la deposición de carbonato de calcio y la protección costera. Se dedujo un beneficio de la cuantía física de la deposición de carbonato de calcio por un precio de mercado. El beneficio generado por la protección costera de áreas de: uveral, manigua costera, manglar y herbazal sobre la duna, se estimó de acuerdo con valoraciones realizadas en ecosistemas costeros cubanos.

El total de los beneficios valorados por mitigación y adaptación, se adoptó como el ingreso económico esperado por el proyecto de inversión. Se identificó el costo de la inversión, se calculó el Valor Actual mediante la ecuación (14) y seguido el Valor Actual Neto del inventario con la ecuación (15). La metodología fue concebida para evaluar la fase de pre-inversión, puede aplicarse en post-inversión para la comprobación de la efectividad del proyecto, otro requisito del proceso inversionista (MINJUS 2014).

## CONCLUSIONES

Se diseñó un algoritmo para el inventario de carbono en combustibles, vegetación y arenas, presupuestos de proyectos de inversión para la recuperación de playas en Cuba. Se describió la metodología para resolver la emisión neta de dióxido de carbono y la deposición de carbonato de calcio con bases científicas. La validación se concibió con calculadoras de carbono de organizaciones reconocidas y tasas de retención de carbono de formaciones forestales y arenas de ecosistemas cubanos. La valoración económica del inventario se identificó con la determinación de la factibilidad económica, para orientar la toma de decisiones, el control y la verificación de la efectividad de inversiones ambientales en el enfrentamiento del cambio climático.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda programar el algoritmo del inventario de carbono en un sistema informático y aplicarlo en una propuesta de inversión específica.

## RECONOCIMIENTO

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 Lourdes Rivas Rodríguez investigadora del Instituto de Ciencias del Mar, por sus indicaciones para la mejora del artículo. A Ada Teja por la revisión y traducción del resumen. A los árbitros que contribuyeron con sus comentarios a mejorar el artículo.

## REFERENCIAS

- Álvarez A. y Mercadet A.** (2011). “El sector forestal cubano y el cambio climático”, Inst. Investigaciones Agro-forestales. Ministerio de la Agricultura, ISBN: 9789-959-7215-00-4. La Habana, Cuba.
- Domenech J.L., Carballo A., Jiménez L. y De la Cruz J.L.** (2010). “Estándares 2010 de huella de carbono MC3”. Comunicación Técnica. Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 10. Autoridad Portuaria de Gijón. España. Extraído de: [www.jdomenech.com](http://www.jdomenech.com) en abril 2013.
- INAF** (2017). “Reporte de carbono 2017”. Sistema de Medición Reporte, Monitoreo y Verificación. Instituto de Investigaciones Agro-Forestales (INAF). Grupo Empresarial Agroforestal. Ministerio de la Agricultura, Cuba.
- IPCC** (2006). “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories”. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón. ©Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2006. Extraído de: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp> en diciembre 2015.

**IPCC** (2015). “Cambio Climático 2014. Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático”. Resumen para responsables de políticas. Revisado en febrero de 2015 por el IPCC, Suiza. © Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2015. Extraído de: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch). en diciembre 2017. 40 pp.

**Izquierdo M., Núñez C., Caballero V., González R. y Hernández K.** (2014). “Proyectos de vertimiento de arena en las Playas El Paso en Cayo Guillermo, Playa Larga, Flamenco y Las Coloradas en Cayo Coco, Ciego de Ávila”. Proyectos Ejecutivos. División Comercial de Ingeniería Costera. Inversiones Gamma S.A. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.

**MINJUS** (1982). “Decreto Ley No. 62 de 1982: De la implantación del sistema internacional de unidades”. Gaceta Oficial de la República de Cuba. ISSN 1682-7511. Ministerio de Justicia (MINJUS). Edición Especial. La Habana 30 de diciembre de 1982. Año LXXX. (No. 9, pág. 19), Cuba.

**MINJUS** (2014). “Decreto No. 327 de 2014: Reglamento del proceso inversionista”. Gaceta Oficial de la República de Cuba. ISSN 1682-7511. Ministerio de Justicia (MINJUS). Edición Extraordinaria. La Habana 23 de enero de 2015. Año CXIII. (No.5, pág. 27), Cuba.

**Pedro N.** (2017). “Modelación de densidad aparente y retención de carbono: Arenas carbonatadas en playas cubanas”. M+A Revista Electrónica de Medioambiente, 18(1), 49-61. ISSN-e: 18861-3329. Universidad Complutense de Madrid, España.

**Pedro N., Martell A. y Ferras H.** (2017a). “Retención media de carbono en vegetación costera: Flora en playas cubanas”. División Comercial de Ingeniería Costera. Inversiones Gamma S.A. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba (inédito).

**Pedro N., Rivas L., Albuquerque, O.C. y Fernández, Y.** (2017b). “Reajuste de densidad aparente y retención de carbono: Modelos idóneos para arenas cubanas”. M+A Revista Electrónica de Medioambiente, 18(2), 117-135. ISSN-e: 18861-3329. Universidad Complutense de Madrid, España.