

CarbonSink-Chile: Explorador para la evaluación de impacto en Sumideros Naturales de Carbono. Informe metodológico.

Modelos de bosque esclerófilo y humedales costeros.

Daniela Bellott Figueroa
Naomí Cubillos Vidal
Felipe Díaz Alvarado

Proyecto financiado por ANID: IDeA I+D 2024-
ID24110040
18/11/25

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	4
MODELO DE BOSQUES	6
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO.....	6
BALANCES DE MASA.....	8
BALANCE DE BIOMASA VIVA (B)	8
BALANCE DE MASA A LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (SOM)	10
BALANCE DE MASA DE LA MADERA MUERTA Y LA HOJARASCA (LW)	10
CÁLCULO DE PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA (NPP).....	11
CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS	12
CROSS VALIDATION - RESULTADOS	13
CONCLUSIONES Y SIGUIENTES PASOS.....	16
NOMENCLATURA MODELO DE BOSQUES	17
MODELO DE HUMEDALES	18
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO.....	18
BALANCES DE MASA – CARBONO EN EL SUELO.....	20
BALANCE DE MASA A LA COLUMNA DE AGUA.....	20
BALANCE DE MASA A LA CAPA AERÓBICA DE SEDIMENTO	22
BALANCE DE MASA A LA CAPA ANAERÓBICA DE SEDIMENTO.....	24
CARBONO TOTAL DEL SUELO	25
OBTENCIÓN DE DATA SATELITAL.....	26
VOLUMEN DE AGUA.....	26
BIOMASA AÉREA	26
BIOMASA SUBTERRÁNEA	27
OXÍGENO DISUELTO	27
CARBONO TOTAL – MODELO DE HUMEDALES	27
CALIBRACIÓN DEL MODELO DE HUMEDALES.....	28
METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN	29
RESULTADOS CALIBRACIÓN	31
CONCLUSIONES Y SIGUIENTES PASOS.....	34
NOMENCLATURA MODELO DE HUMEDALES.....	35
Bibliografía	37

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

ECUACIÓN 1: BALANCE DE MASA GENERAL.	4
ECUACIÓN 2: BALANCE DE MASA GENERAL PARA EL MODELO DE BOSQUE.....	7
ECUACIÓN 3: REACCIONES QUÍMICAS DEL MODELO DE BOSQUES.....	7
ECUACIÓN 4: CRECIMIENTO DEL TIPO MONOD.....	8
ECUACIÓN 5: BALANCE DE MASA A LA BIOMASA.	9
ECUACIÓN 6: TASA DE CRECIMIENTO DE BIOMASA MEDIADA POR FOTOSÍNTESIS.....	9
ECUACIÓN 7: CÁLCULO DE NDVI CON LAS BANDAS SATELITALES NIR Y RED.	9
ECUACIÓN 8: TASA DE CAÍDA DE MADERA MUERTA Y HOJARASCA.	10
ECUACIÓN 9: BALANCE DE MASA A LA SOM.	10
ECUACIÓN 10: TASA DE GENERACIÓN DE SOM.	10
ECUACIÓN 11: BALANCE DE MASA A LA MADERA MUERTA Y HOJARASCA.	11
ECUACIÓN 12: DEFINICIÓN DE NPP.	11
ECUACIÓN 13: CONVERSIÓN DE CARBONO DESDE RESERVORIOS.....	11
ECUACIÓN 14: EXPRESIÓN FINAL DE NPP.....	11
ECUACIÓN 15: BALANCE DE MASA AL CARBONO PARTICULADO DISUELTO EN LA COLUMNA DE AGUA.	20
ECUACIÓN 16: BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA COLUMNA DE AGUA.....	21
ECUACIÓN 17: BALANCE DE MASA AL CARBONO PARTICULADO EN LA ZONA AERÓBICA.	23
ECUACIÓN 18: BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA ZONA AERÓBICA.....	24
ECUACIÓN 19: BALANCE DE MASA AL CARBONO PARTICULADO EN LA ZONA ANAERÓBICA.....	25
ECUACIÓN 20: BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA ZONA ANAERÓBICA.	25
ECUACIÓN 21: CARBONO TOTAL DEL SUELO EN HUMEDALES.....	25
ECUACIÓN 22: VOLUMEN DE AGUA.	26
ECUACIÓN 23: CÁLCULO DE NDWI CON DATA SATELITAL.	26
ECUACIÓN 24 CÁLCULO DE BIOMASA VIVA USANDO NDVI (HARDISKY, 1983).....	26
ECUACIÓN 25: TOTAL DE BIOMASA AÉREA.	26
ECUACIÓN 26: CÁLCULO DE BIOMASA SUBTERRÁNEA.	27
ECUACIÓN 27: EXPRESIÓN PARA EL CÁLCULO DE OXÍGENO DISUELTO (PADILLA-MENDOZA, 2023).	27
ECUACIÓN 28: ECUACIÓN DE STOCK DE CARBONO TOTAL EN HUMEDALES.....	27
FIGURA 1: REPRESENTACIÓN BALANCE DE MASA GENERAL.	4
FIGURA 2: DIAGRAMA DE PRINCIPALES RESERVORIOS DE BOSQUE ESCLERÓFILO. ELABORACIÓN PROPIA.	6
FIGURA 3: DIAGRAMA MODELO DE BOSQUES.	7
FIGURA 4: REPRESENTACIÓN DE BALANCE DE MASA A B.	9
FIGURA 5: REPRESENTACIÓN DE BALANCE DE MASA A SOM.	10
FIGURA 6: REPRESENTACIÓN DE BALANCE DE MASA A LW.....	10
FIGURA 7: CALIBRACIÓN DE LA PRIMERA PARTICIÓN DEL MODELO.	14
FIGURA 8: VALIDACIÓN DE LA PRIMERA PARTICIÓN DEL MODELO.	14
FIGURA 9: CALIBRACIÓN DE LA SEGUNDA PARTICIÓN DEL MODELO.	14
FIGURA 10: VALIDACIÓN DE LA SEGUNDA PARTICIÓN DEL MODELO.	14
FIGURA 11: CALIBRACIÓN DE LA TERCERA PARTICIÓN DE MODELO.....	15
FIGURA 12: VALIDACIÓN DE LA TERCERA PARTICIÓN DEL MODELO.	15
FIGURA 13: CALIBRACIÓN FINAL DEL MODELO DE BOSQUES.....	15
FIGURA 14: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL MODELO DE HUMEDALES.	18
FIGURA 15: ESQUEMA DEL BALANCE DE MASA AL CARBONO PARTICULADO DISUELTO EN LA COLUMNA DE AGUA CP_w ...20	
FIGURA 16: ESQUEMA DE BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA CAPA DE AGUA.	21
FIGURA 17: ESQUEMA DE BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO EN LA CAPA DE SEDIMENTO AERÓBICA.	23
FIGURA 18: ESQUEMA DE BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA CAPA DE SEDIMENTO AERÓBICA.24	

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

FIGURA 19: ESQUEMA DE BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO EN LA CAPA DE SEDIMENTO ANAERÓBICA.	24
FIGURA 20: ESQUEMA DE BALANCE DE MASA AL CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA CAPA DE SEDIMENTO ANAERÓBICA.	25
FIGURA 21: DIAGRAMA DEL PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE CONDICIONES INICIALES.	30
FIGURA 22: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE LA CALIBRACIÓN FINAL POR MÍNIMOS CUADRADOS.	32
FIGURA 23: DIAGRAMA DE VALIDACIÓN DEL MODELO DE HUMEDALES.	33
TABLA 1: VARIABLES INDEPENDIENTES. MODELO DE BOSQUES.	12
TABLA 2: VARIABLES DEPENDIENTES DEL SIMULADOR. MODELO DE BOSQUES	12
TABLA 3: VARIABLES DEPENDIENTES. MODELO DE BOSQUES.	13
TABLA 4: PARÁMETROS FINALES DE LA CALIBRACIÓN. MODELO DE BOSQUES.	16
TABLA 5: MÉTRICAS DEL ERROR PARA LA CALIBRACIÓN FINAL. MODELO DE BOSQUES.	16
TABLA 6: TASAS DE REACCIÓN. MODELO DE BOSQUES.	17
TABLA 7: VARIABLES DEL MODELO DE BOSQUES.	17
TABLA 8: PARÁMETROS PARA CALIBRAR DEL MODELO DE BOSQUES.	17
TABLA 9: VARIABLES INDEPENDIENTES. MODELO DE HUMEDALES.	28
TABLA 10: VARIABLES DEPENDIENTES DEL SIMULADOR. MODELO DE HUMEDALES.	29
TABLA 11: VARIABLES DEPENDIENTES. MODELO DE HUMEDALES.	29
TABLA 12: VALORES DE PARÁMETROS FINALES. MODELO DE HUMEDALES.	33
TABLA 13: VARIABLES DEL MODELO DE HUMEDALES.	35
TABLA 14: PARÁMETROS DEL MODELO DE HUMEDALES.	35

INTRODUCCIÓN

El proyecto IDeA I+D CarbonSink-Chile, busca desarrollar una herramienta georreferenciada que permita estimar la producción primaria neta (NPP), el stock de carbono, la tasa de fijación y el stock de CO_2 , en sumideros naturales chilenos. La motivación principal del proyecto es facilitar la evaluación del impacto en sumideros naturales de carbono. En este escenario, un proyecto de inversión que interviene significativamente un sumidero natural de carbono afecta de dos maneras el balance nacional: (i) el stock de carbono almacenado en un ecosistema podría ser liberado como CO_2 y otros gases a la atmósfera y (ii) los flujos futuros de CO_2 que un sumidero fijaría dejarían de existir. En consecuencia, las estimaciones antes mencionadas de stock de carbono en un ecosistema y la producción primaria neta son traducidas en el proyecto a CO_2 .

Este informe presenta la primera versión de una calculadora en línea (explorador de sumideros de carbono), que utiliza datos satelitales desde Sentinel-2 (COPERNICUS) y MODIS (Terra/Aqua) con el objetivo de adquirir información relevante y actualizada que permita identificar el estado del ecosistema y, de este modo, entregar estimaciones de fijación de carbono que reflejen sus condiciones más recientes.

La herramienta está desarrollada para incluir, en una primera versión, las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'higgins. Particularmente, son dos los ecosistemas modelados pertenecientes a estas regiones, y que son representados a través del simulador: el ecosistema de bosque esclerófilo y los humedales costeros.

Los modelos de bosque y humedales fueron desarrollados utilizando un enfoque de ingeniería de procesos, cuyos principales componentes de los ecosistemas se modelaron como sistemas a los que se aplicó el principio de conservación de masa. En la Figura 1 se muestra un esquema típico utilizado en ingeniería para modelar un conjunto de procesos o sistemas. En él se observa que la acumulación de materia (masa, molaridad) puede ser representada a través de su ingreso, salida, generación y consumo en un sistema cerrado, delimitado o definido. Matemáticamente, este principio se representa a través de la Ecuación 1.

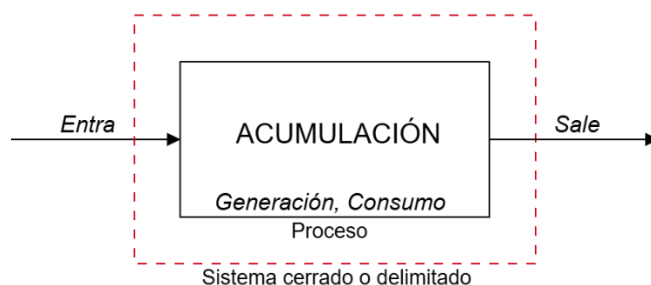


Figura 1: Representación balance de masa general.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

Ecuación 1: Balance de masa general.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

La Ecuación 1 es utilizada, en ambos modelos, para describir la dinámica interna de los ecosistemas. Cada una de las expresiones de *Entrada*, *Salida*, *Generación* y *Consumo* serán representadas de diferente forma en los modelos, de manera tal, que las características inherentes a los sistemas naturales sean expresadas correctamente.

El presente informe muestra el procedimiento metodológico realizado para la creación de estos modelos. Primero, se describe el modelo de bosques, lo que incluye su descripción general, los balances de masa y las estrategias de desarrollo, la metodología de calibración y los resultados iniciales.

En segundo lugar, se detalla el modelo de humedales. En esta parte se desarrollan los balances de masa para estimar el carbono orgánico del suelo y se explican los procesos para obtener datos satelitales que permiten calcular el carbono total. Finalmente, se presenta el procedimiento de calibración del modelo y los resultados obtenidos.

MODELO DE BOSQUES

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

El modelo de bosques estima el NPP de los bosques esclerófilos a través de una serie de ecuaciones que modelan el **crecimiento de la biomasa** en los principales reservorios de carbono del ecosistema. La dinámica de crecimiento de biomasa, en cada uno de estos compartimentos, determina la cantidad de carbono fijado: si la biomasa crece, entonces mayor fijación de carbono existió para sustentar ese crecimiento y, en consecuencia, este podrá ser expresado a través de la variación de la biomasa en el sistema.

Son tres los reservorios principales que se utilizaron en la creación del modelo y que fueron definidos para representar el sistema de bosques (Figura 2):

- 1) Reservorio de Biomasa viva (B): Corresponde a toda la vegetación viva del bosque. Es aquella que realiza el proceso de fotosíntesis para su crecimiento y desde donde el carbono es fijado a través de la integración de CO_2 al sistema.
- 2) Reservorio de Materia orgánica del suelo (SOM): Corresponde a toda la materia orgánica del suelo que puede incluir restos de animales, plantas y microorganismos que se encuentren en diferentes estados de descomposición.
- 3) Reservorio de Madera muerta y hojarasca (LW): Corresponde a toda aquella materia orgánica que se encuentre en el ecosistema, pero que no pertenece a la biomasa viva, ni a la SOM. Se asumirá que estos elementos se encuentran en un único conjunto (LW) que representará un comportamiento general en el modelo.

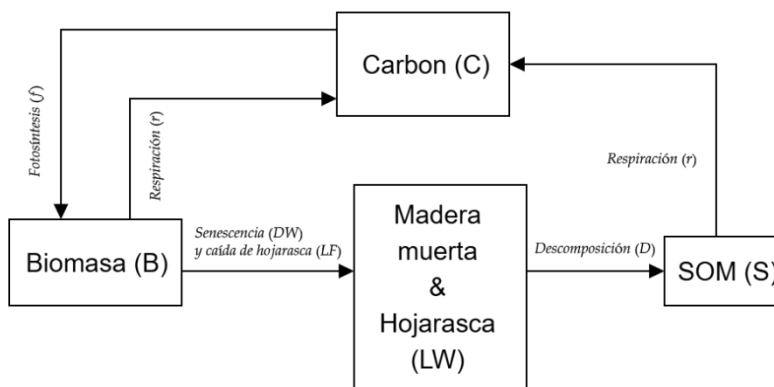


Figura 2: Diagrama de principales reservorios de bosque esclerófilo.
 Elaboración propia.

Para modelar el ecosistema, se realizan ecuaciones de balance de masa en cada uno de los reservorios mencionados. Para efectos del modelo de bosques, se asume que no hay variaciones en los ecosistemas asociados al ingreso o extracción artificial de vegetación que puedan afectarlo (i.e.: $Entra = Sale = 0$). Por otro lado, la **generación** de biomasa representa su crecimiento, fruto de la fijación de CO_2 (entre otras moléculas), y su **consumo** describe la muerte y descomposición como mecanismo natural de pérdida de biomasa.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

Dado lo anterior, la ecuación general de balance masa para cada reservorio queda de la siguiente forma:

$$\text{Acumulación} = \text{Generación} - \text{Consumo}$$

Ecuación 2: Balance de masa general para el modelo de bosque.

La representación gráfica del sistema de bosques se observa en la Figura 3. En ella, se puede observar que las interacciones entre cada uno de los reservorios, para una región de interés (ROI) de área A_p , son representadas a través de tasas de crecimiento o muerte - generación o consumo (r_f , r_{LW} , r_D) - que alimentarán a los reservorios consecutivamente. La Ecuación 3 muestra las reacciones químicas que representan la dinámica del sistema.

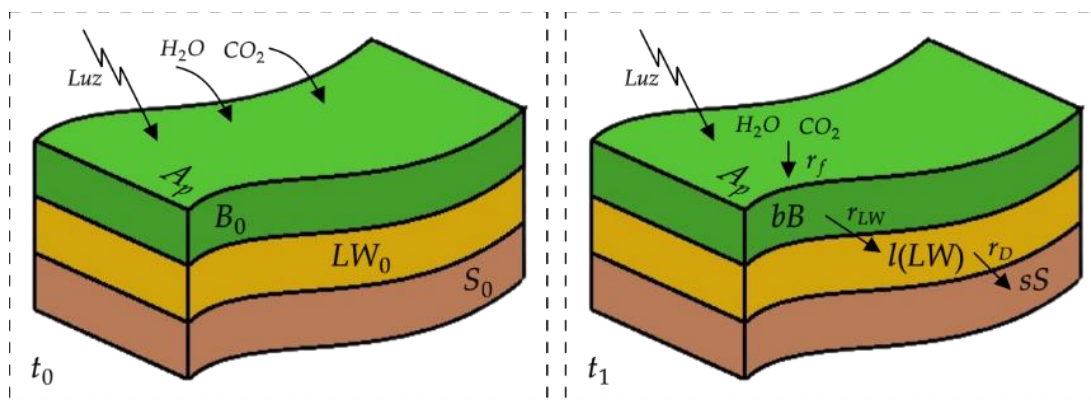
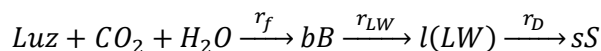


Figura 3: Diagrama modelo de bosques.



Ecuación 3: Reacciones químicas del modelo de bosques.

Es importante mencionar que el estado final del sistema, o los “productos” que se obtengan al final del modelamiento, dependerán de sus condiciones iniciales, representadas por B_0, LW_0, S_0 .

BALANCES DE MASA

La dinámica de crecimiento biológico que se utilizará principalmente en el modelo de bosques se muestra en la Ecuación 4. En ella, la tasa de crecimiento de un sistema biológico (r_X) dependerá de dos factores principales: el sustrato limitante (S), que representa el componente principal que alimenta o sustenta el crecimiento del sistema; y, la concentración (o densidad) de biomasa (X) del sistema biológico. Esta interacción está modulada por las constantes k_1 y k_2 .

$$r_X = k_1 \cdot \frac{S}{k_2 + S} \cdot X$$

Ecuación 4: Crecimiento del tipo Monod.

La relación entre la tasa de crecimiento y los factores mencionados anteriormente es la siguiente:

- r_X es directamente proporcional con la concentración de biomasa. A mayor X , más grande es el sistema y, en consecuencia, mayor es la tasa de crecimiento.
- La relación entre la tasa de crecimiento y el sustrato limitante no es lineal y está determinada por la expresión $\frac{S}{k_2 + S}$.
 - Si el valor de S es muy alto ($k_2 \ll S$), la expresión tiende asintóticamente a 1 y la tasa de crecimiento adopta un crecimiento constante, saturado y máximo. Es decir, la sobrealimentación de un sistema biológico no asegura su crecimiento.
 - Si el valor de S no es alto ($S \ll k_2$), entonces la tasa es sensible a la disponibilidad de sustrato y, en consecuencia, un aumento en S genera un aumento proporcional en la tasa de crecimiento.

Esta expresión se basa en la ecuación de Monod, una relación ampliamente utilizada para describir el crecimiento de organismos vivos (Monod, 1949).

A continuación, se desarrollan los balances de masa para cada una de las especies del sistema, siguiendo la dinámica de crecimiento anteriormente descrita. Además, al final de este capítulo, se encuentra la sección “NOMENCLATURA MODELO DE BOSQUES” donde se resumen los principales componentes del modelo.

BALANCE DE BIOMASA VIVA (B)

En la Figura 4 se muestra el esquema al balance de masa a la biomasa viva. En el diagrama, las flechas indican los cambios mediados por un proceso o reacción y **no** una entrada ni salida de componentes en el sistema.

Dado que el balance de masa se realiza sobre la biomasa, no se consideran flujos de **entradas o salidas de biomasa**. Sin embargo, es importante destacar que el ecosistema sí intercambia moléculas con su entorno. En particular, existe un ingreso de carbono (y otros componentes) a través del CO_2 y es este flujo el que posibilita la **generación** de biomasa mediante la fotosíntesis.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

El modelo no incorpora explícitamente el flujo de ingreso de carbono al ecosistema, pero sí lo representa de manera indirecta a través de la descripción del crecimiento de biomasa.

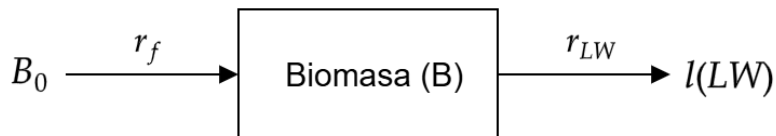


Figura 4: Representación de balance de masa a B.

$$\frac{dB}{dt} = (r_f - r_{LW}) \cdot A_p$$

Ecuación 5: Balance de masa a la biomasa.

En ese contexto, la acumulación de biomasa ($\frac{dB}{dt}$) de la Ecuación 5 está determinada por dos fenómenos principales: la tasa de crecimiento fotosintética (r_f), que representa la generación de biomasa dado el proceso de fotosíntesis; y la tasa de caída de madera muerta y hojarasca (r_{LW}), que busca representar el consumo o pérdida natural de la biomasa.

La tasa fotosintética r_f se observa en la Ecuación 6. Esta expresión muestra un crecimiento del tipo Monod, como el descrito anteriormente, en donde se asume que el sustrato limitante de la fotosíntesis es la luz. Sin luz no hay fotosíntesis, pero un aumento significativo en su sustento no asegura un crecimiento sostenido de la biomasa.

La luz será representada por el PAR (como dato satelital), que corresponde a la proporción de luz utilizada por los organismos para el proceso de fotosíntesis y comprende longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros (McCree, (1981)).

Por otro lado, el valor de la biomasa será estimada a través de una relación lineal con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), como dato satelital. Este índice es comúnmente utilizado para evaluar cambios en la vegetación (EOS DATA ANALYTICS, 2025) y se calcula a través de la expresión de la Ecuación 7.

$$r_f = \frac{PAR(t)_{norm}}{k'_f + PAR(t)_{norm}} (m'_f \cdot NDVI(t) + n'_f)$$

Ecuación 6: Tasa de crecimiento de biomasa mediada por fotosíntesis.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Ecuación 7: Cálculo de NDVI con las bandas satelitales NIR y RED.

La pérdida de biomasa, expresada a través de la caída de madera muerta y hojarasca se presenta en la Ecuación 8. En ella, se asume que el consumo o pérdida de biomasa viva sigue una cinética de reacción de primer orden que depende de la cantidad de biomasa por metro cuadrado presente en el área de interés (B^*).

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

$$r_{LW} = k_{LW} \cdot B^*$$

Ecuación 8: Tasa de caída de madera muerta y hojarasca.

BALANCE DE MASA A LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (SOM)

El balance a la SOM (Ecuación 9) expresa la dinámica de la Figura 5. En particular, se asume que la acumulación de SOM ($\frac{dS}{dt}$) se genera únicamente a través de la proporción estequiométrica de la descomposición de madera muerta y hojarasca (r_D); sin considerar ningún proceso de eliminación, consumo o descomposición de esta en el proceso. El supuesto anterior, se integra asumiendo que la generación de SOM es mayor a su descomposición en un ecosistema de bosque sano. Además, el supuesto cobra relevancia si se considera que gran parte del stock de carbono es acumulado en los suelos del ecosistema. En función de lo anterior, la descomposición o muerte de SOM se desprecia del modelo.

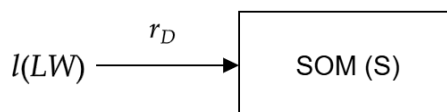


Figura 5: Representación de balance de masa a SOM.

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{S}{I}\right) r_D \cdot A_p$$

Ecuación 9: Balance de masa a la SOM.

La expresión que modela la tasa r_D se observa en la Ecuación 10. La velocidad de crecimiento se basa en la ecuación de Monod, asumiendo que el sustrato limitante es la misma concentración de suelo orgánico y que el crecimiento de SOM dependerá de la cantidad de madera muerta y hojarasca por unidad de área presente en el sistema (LW^*).

$$r_D = k_1 \left(\frac{S}{k_D + S} \right) LW^*$$

Ecuación 10: Tasa de generación de SOM.

BALANCE DE MASA DE LA MADERA MUERTA Y LA HOJARASCA (LW)

En la Figura 6 se muestra el esquema de generación y consumo de LW . La Ecuación 11, representa el balance de masa a este reservorio.

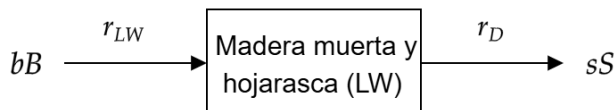


Figura 6: Representación de balance de masa a LW

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

$$\frac{dLW}{dt} = \left(\frac{l}{b} r_{LW} - r_D \right) \cdot A_p$$

Ecuación 11: Balance de masa a la madera muerta y hojarasca.

En particular, la generación de madera muerta y hojarasca ocurre en la misma proporción estequiométrica que la tasa de caída descrita en la Ecuación 8. Por otro lado, su consumo está dado por la tasa de descomposición mencionada anteriormente.

CÁLCULO DE PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA (NPP)

El NPP representa el flujo neto de carbono dentro de un ecosistema; corresponde a la tasa de fijación de carbono orgánico resultante de la fotosíntesis, una vez descontada la respiración autotrófica. En ese contexto, las variaciones del stock de carbono, durante un intervalo de tiempo dado reflejan el NPP que el sistema es capaz de incorporar. Formalmente, el NPP puede expresarse como la derivada temporal del contenido de carbono en el sistema (Ecuación 12).

$$NPP = \frac{dC}{dt}$$

Ecuación 12: Definición de NPP.

Es necesario, entonces, convertir la masa de biomasa presente en los reservorios, en masa de carbono. Para ello, se asume que existen tasas de conversión (x_b, x_{lw}, x_s) que representan la proporción de carbono presente en cada uno de los reservorios (Ecuación 13)

$$C_B = x_b \cdot B$$

$$C_{LW} = x_{lw} \cdot LW$$

$$C_S = x_s \cdot S$$

Ecuación 13: Conversión de carbono desde reservorios.

Finalmente, la expresión de Ecuación 12 se actualiza a la siguiente (Ecuación 14).

$$NPP = \frac{dC}{dt} = \frac{dC_B}{dt} + \frac{dC_{LW}}{dt} + \frac{dC_S}{dt}$$

$$NPP = \frac{dC}{dt} = x_b \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) + x_{lw} \cdot \left(\frac{dLW}{dt} \right) + x_s \cdot \left(\frac{dS}{dt} \right)$$

Ecuación 14: Expresión final de NPP.

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

La calibración de parámetros tiene por objetivo identificar los valores que permiten que el modelo teórico de bosques reproduzca de mejor manera los valores de carbono observados en terreno. Para ello, se plantea y resuelve un problema mayor, en el que los parámetros se ajustan hasta encontrar una configuración que minimice el error cuadrático entre las simulaciones del modelo y los datos medidos en campo.

El modelo de bosques tiene variables independientes (Tabla 1) que representan la posición y el tiempo donde se quiere calcular el carbono y desde donde se toman los datos satelitales para activar el modelo. Para efectos del problema de calibración, estas variables quedan fijas para cada uno de los puntos de medición en terreno.

El NDVI, el PAR, los datos de carbono de campo ($C_{p,t}^d$), el área de la región de interés (A_p) y las condiciones iniciales de carbono (C_p^i), son variables dependientes del simulador (no conclusión del modelo), ya que su valor no depende del modelo de bosques en sí, pero sí dependen de los puntos y tiempos de consulta de carbono en el simulador. En la calibración, estos valores quedarán definidos, dado que se trabaja con parcelas fijas para la obtención de datos de campo (Tabla 2).

Finalmente, los valores de los parámetros a ajustar y valores de carbono modelados, son las variables dependientes del modelo (Tabla 3). Estas son las variables que se modificarán en cada ajuste y las que determinarán la obtención de buenos resultados.

Tabla 1: Variables independientes. Modelo de bosques.

Variables independientes	Descripción	Unidad de medida
P	Corresponden a las parcelas (regiones de interés) desde donde se extraen los datos satelitales.	—
t_p	Corresponden a los tiempos de medición desde donde se toman los datos satelitales para cada una de las parcelas.	mes

Tabla 2: Variables dependientes del simulador. Modelo de bosques

Variables dependientes del simulador	Descripción	Unidad de medida
$C_{p,t}^d$	Datos de carbono (C) medidos en la parcela p para un tiempo t .	kg
$NDVI_p(t)$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada obtenido desde data satelital para una parcela p en un tiempo t	—
$PAR_p(t)$	Proporción de luz utilizada por los organismos para el proceso de fotosíntesis. Dato satelital obtenido para la parcela p en el tiempo t .	$\frac{W}{m^2}$

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

C_p^i	Condición inicial de carbono para la parcela p .	kg
A_p	Área de la parcela p .	m^2

Tabla 3: Variables dependientes. Modelo de bosques.

Variables dependientes del modelo	Descripción	Unidades de medida
θ	Corresponde al vector de parámetros que serán modificados para ajustar el modelo a valores cercanos de $C_{p,t}^d$.	—
$C_{p,t}^m$	Valores de carbono entregados por el modelo de bosques para una parcela p en un tiempo t .	kg

CROSS VALIDATION - RESULTADOS

El ajuste del modelo se realizó aplicando la metodología de *cross-validation*. Para ello, la base de datos utilizada en la calibración se dividió en tres subconjuntos o folds. En cada iteración, el modelo se calibra utilizando dos de estos subconjuntos (equivalentes a $\frac{2}{3}$ de los datos) y se valida con el tercio restante. Este procedimiento se repite tres veces, alternando las particiones de manera que cada subconjunto es utilizado una vez para la validación y dos veces para la calibración.

De esta forma, se obtiene una evaluación más robusta del desempeño del modelo, reduciendo la dependencia de una única partición de datos. En las Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se muestran los resultados de calibración y validación obtenidos mediante este método para las tres particiones. Además, en la Tabla 4 se observan los parámetros finales obtenidos luego del proceso de calibración.

Los resultados obtenidos luego de la calibración cruzada permiten concluir que el modelo es robusto y estable en la resolución del problema. Con lo anterior, se realiza una última calibración del modelo, pero esta vez utilizando el 100% de los datos disponibles (75 puntos de calibración). El resultado se observa en la Figura 13. Además, las métricas del error del modelo se muestran en la Tabla 5.

Finalmente, el modelo de bosques muestra un error de RMSE similar a otras herramientas implementadas en el proyecto y que utilizan remote sensing para estimar el carbono en ecosistemas. Por otro lado, el modelo no muestra un sesgo sustancial en su estimación, sin embargo, puede subestimar ligeramente la solución final.

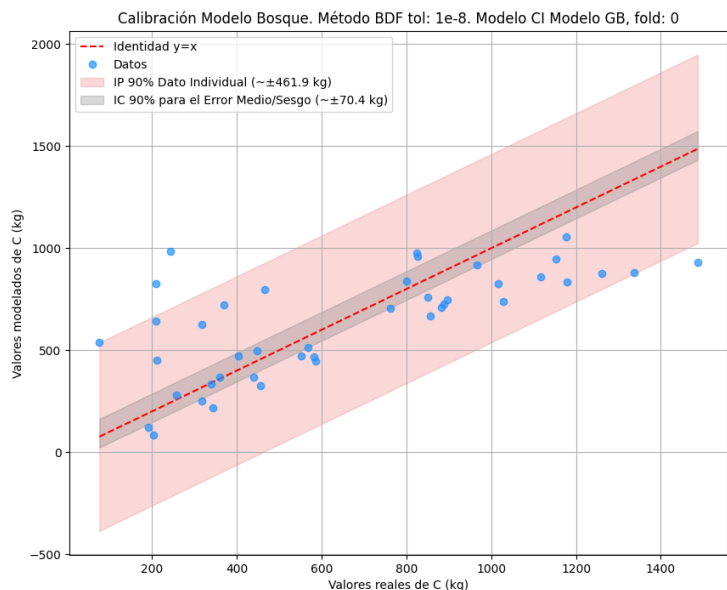


Figura 7: Calibración de la primera partición del modelo.

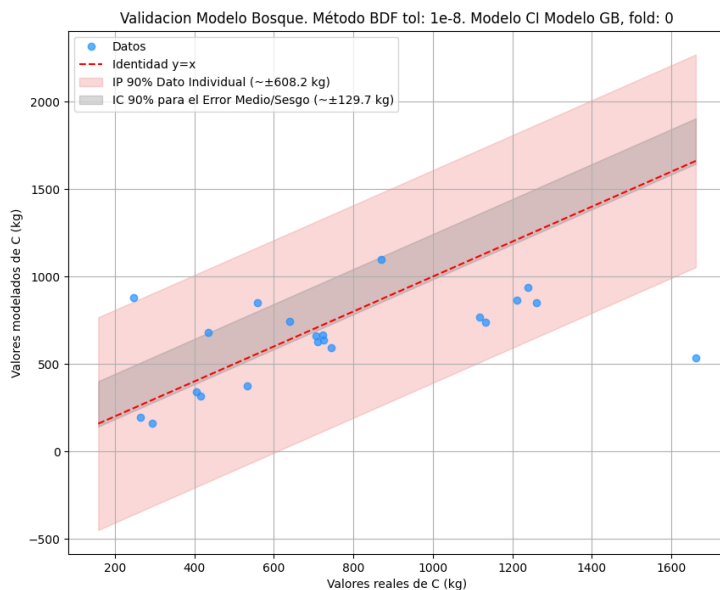


Figura 8: Validación de la primera partición del modelo.

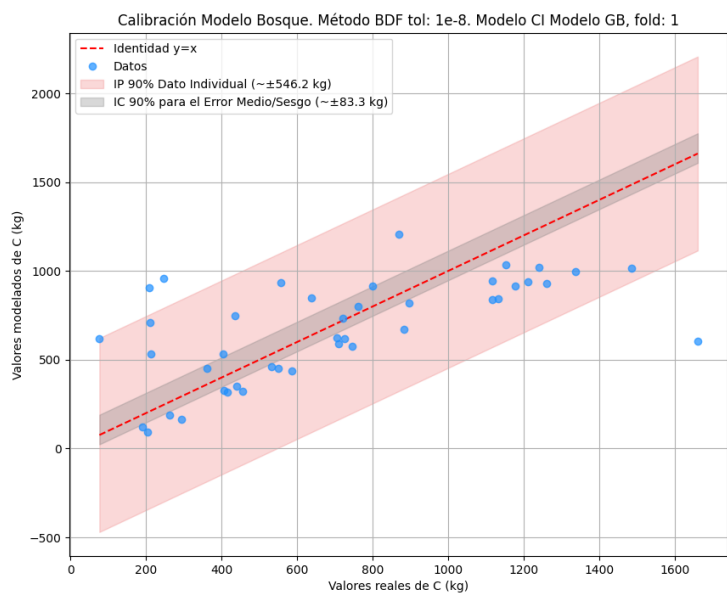


Figura 9: Calibración de la segunda partición del modelo.

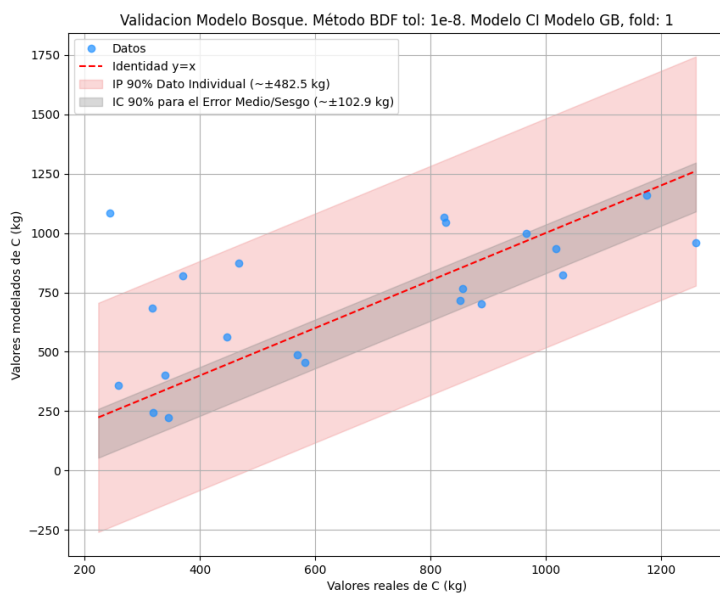


Figura 10: Validación de la segunda partición del modelo.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

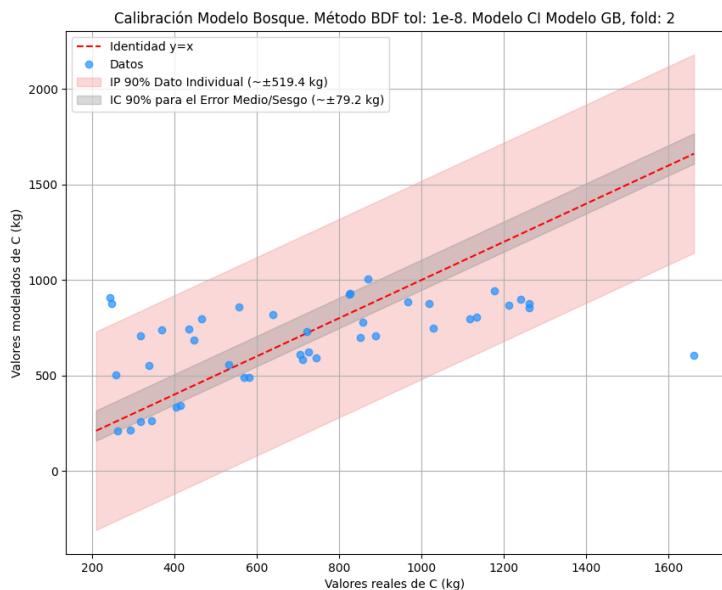


Figura 11: Calibración de la tercera partición de modelo.

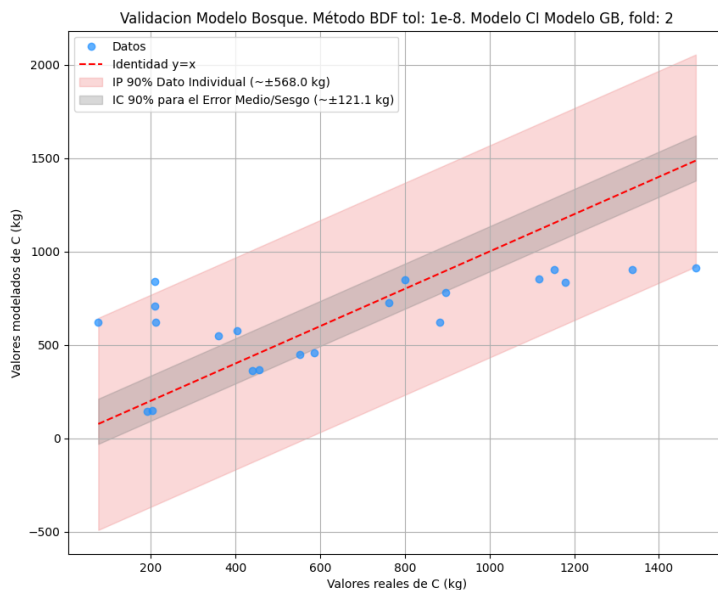


Figura 12: Validación de la tercera partición del modelo.

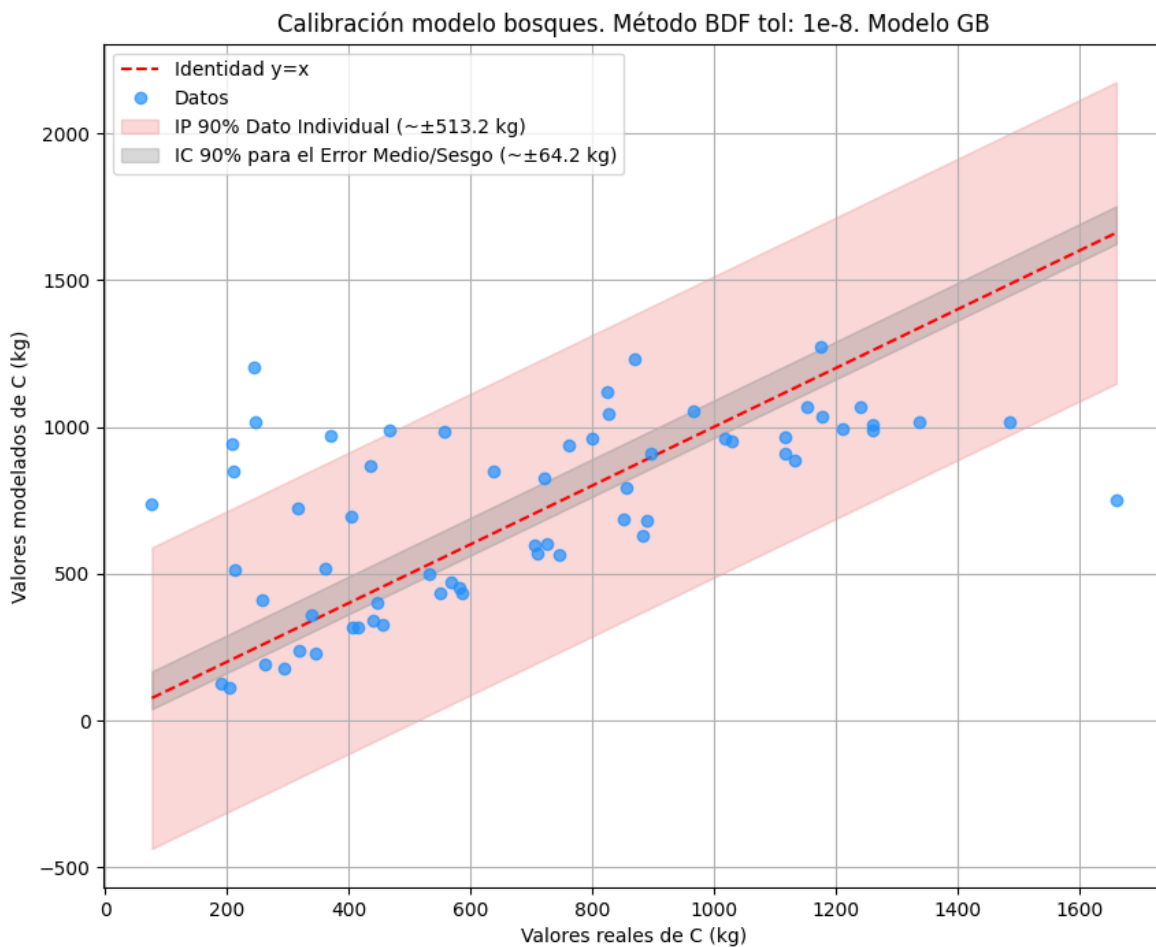


Figura 13: Calibración final del modelo de bosques.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

Tabla 4: Parámetros finales de la calibración. Modelo de bosques.

Parámetro calibrado	Valor
k'_f	1.0588 ± 0.331
m'_f	0.0123 ± 0.0003
n'_f	-0.0052 ± 0.0002
k_{LW}	0.0743 ± 2.5514
k_1	0.2625 ± 7.5343
k_D	1.0892 ± 21.6385

Tabla 5: Métricas del error para la calibración final. Modelo de bosques.

Métricas	Valor
RMSE	303.69 kg
MAE	234.39
Sesgo (Error medio)	26.64
IC para el error medio. Confianza al 90%.	(-37.52, 90.80)
Margen de predicción	+513.24 kg

CONCLUSIONES Y SIGUIENTES PASOS

El modelo de bosques constituye una formulación teórica que describe, de manera general, los principales procesos asociados al crecimiento de biomasa en bosques esclerófilos. La calibración realizada muestra que el modelo es estable y robusto, lo que sugiere que el modelo puede tener un buen comportamiento para la estimación de NPP y carbono.

El modelo ya se encuentra implementado en la plataforma desarrollada por el equipo, y quedará sujeto a futuras mejoras que puedan optimizar su desempeño.

Actualmente, nos encontramos en el proceso de validación externa, comparando los resultados del modelo con otras herramientas, como la estimación de NPP mediante CASA NASA, con el fin de contar con una referencia adicional sobre el desempeño de la herramienta.

NOMENCLATURA MODELO DE BOSQUES

Tabla 6: Tasas de reacción. Modelo de bosques.

Tasas de reacción modelo de bosques	Descripción	Unidades de medida
r_f	Tasa de crecimiento de la biomasa por medio de la fotosíntesis. Reacción de tipo Monod.	$\frac{kg}{m^2 mes}$
r_{LW}	Tasa de generación de madera muerta o caída de hojarasca. Reacción de primer orden.	$\frac{kg}{m^2 mes}$
r_D	Tasa de descomposición de madera muerta y hojarasca. Reacción de tipo Monod.	$\frac{kg}{m^2 mes}$

Tabla 7: Variables del modelo de bosques.

Variables del modelo	Descripción	Unidades de medida
A_p	Área de la región de interés a analizar.	$[m^2]$
PAR_{norm}	Valor normalizado de la proporción de luz utilizada por los organismos para el proceso de fotosíntesis (PAR). La normalización se realiza entre los valores máximos y mínimos posibles del PAR (0-700) entregados por el satélite.	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$NDVI[-1, 1]$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Permite estimar la cantidad y desarrollo de vegetación a partir de imágenes satelitales.	
$B^* = \frac{B}{A_p}$	Biomasa específica.	$\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
$LW^* = \frac{LW}{A_p}$	Madera muerta y hojarasca específica.	$\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
$S^* = \frac{S}{A_p}$	SOM específica.	$\left[\frac{kg}{m^2}\right]$

Tabla 8: Parámetros para calibrar del modelo de bosques.

Parámetros para calibrar modelo bosques	Reservorio al que pertenece
k_f'	B
m_f'	B
n_f'	B
k_{LW}	LW
r_D^{max}	S
k_D	S

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

proceso de respiración, mientras que en capas donde este es limitado, organismos desnitrificadores oxidan el carbono.

- Además, el DOC puede ser transformado en metano a través de bacterias metanogénicas.

Con lo anteriormente descrito, es posible calcular el carbono total del suelo (C_{soil}) presente en el humedal y desde el cual se puede calcular el stock total de carbono.

BALANCES DE MASA – CARBONO EN EL SUELO

Para obtener el stock de carbono en el suelo, se realizan dos balances de masa por cada capa del humedal, uno asociada al carbono orgánico particulado y el otro al carbono orgánico disuelto. La definición de cada uno de los parámetros se encuentra en la sección “NOMENCLATURA MODELO DE HUMEDALES”

BALANCE DE MASA A LA COLUMNA DE AGUA

En la Figura 15 se muestra el esquema del proceso por el cual carbono particulado pasa en la capa de columna de agua (C_{P_w}). Las flechas punteadas representan los flujos de carbono que ingresan y salen del sistema a analizar, mientras que las flechas sólidas simbolizan tasas de generación o consumo que describen los cambios generados por medio de reacciones.

En particular, el aumento de C_{P_w} dependerá del carbono entregado por la biomasa aérea, la subterránea y del proceso de resuspensión de C_{P_w} desde la capa de sedimento aerobia. Su consumo, por otro lado, estará determinado por su hidrólisis en carbono orgánico disuelto (C_{D_w}) y su decantamiento hacia la capa del humedal directamente inferior a la capa de agua. En la Ecuación 15 se muestra el balance de masa que representa la dinámica anteriormente descrita y la explicación de cada uno de sus términos se muestra a continuación.

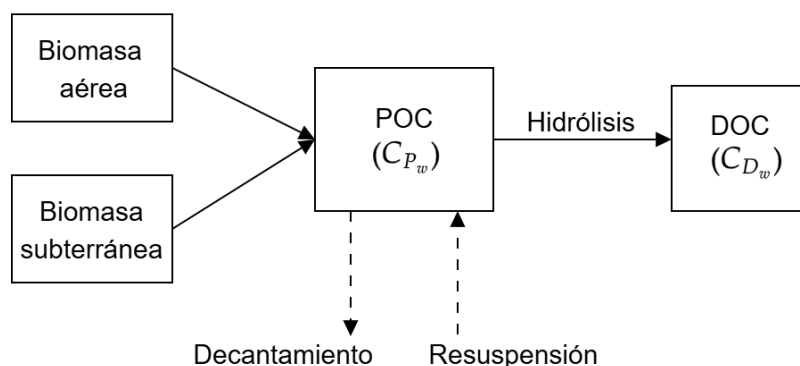


Figura 15: Esquema del balance de masa al carbono particulado disuelto en la columna de agua C_{P_w} .

$$\frac{dC_{P_w}}{dt} = \frac{P_{P_a}}{V_w} a + \frac{P_{P_b}}{V_w} b - k_P C_{P_w} - \frac{v_s A}{V_w} C_{P_w} + \frac{v_r A}{V_w} C_{P_1} - \frac{dV_w}{dt} C_{P_w}$$

Ecuación 15: Balance de masa al carbono particulado disuelto en la columna de agua.

1. $\frac{P_{P_a}}{V_w} a + \frac{P_{P_b}}{V_w} b$: Corresponde a los términos de ingreso en el balance de masa, asociados a la biomasa aérea (a) o a la biomasa subterránea (b). V_w es el volumen de agua del humedal y los parámetros P_{P_a} y P_{P_b} incluyen, en su definición, componentes biológicas relevantes, tales como: la tasa de muerte de plantas libres flotantes y de plantas bentónicas y enraizadas; la ratio de carbono a clorofila-a en algas; la porosidad efectiva en la superficie del humedal; y la fracción de carbono C_{P_w} y C_{D_w} generados por la muerte o pérdida de plantas libres, algas, vegetación enraizada y bentónica.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

2. $-k_P C_{P_w}$: Corresponde a la tasa de consumo de C_{P_w} por hidrólisis. Se asume una reacción de primer orden.
3. $-\frac{v_s A}{V_w} C_{P_w} + \frac{v_r A}{V_w} C_{P1}$: Estos términos representan la tasa de decantamiento de C_{P_w} hacia capas más profundas en el humedal $\left(-\frac{v_s A}{V_w} C_{P_w}\right)$ y la tasa de resuspensión de material particulado $\left(+\frac{v_r A}{V_w} C_{P1}\right)$ desde dichas capas. Estos valores dependerán de la tasa efectiva de decantamiento y resuspensión de materia orgánica en el agua (v_s y v_r , respectivamente).
4. $-\frac{dV_w}{dt} \frac{C_{P_w}}{V_w}$: Este término es resultado de resolver la derivada del problema original. Tiene relevancia matemática, pues no se puede asumir que el volumen de un humedal permanece constante. De esta forma, este valor puede interpretarse como el efecto en C_{P_w} , dadas las variaciones en el volumen de agua presente en el humedal.

El esquema y balance de masa para el carbono orgánico disuelto (C_{D_w}) en la columna de agua se muestran en la Figura 16 y Ecuación 16. El C_{D_w} se acumula según la cantidad de oxígeno disuelto que se genere desde la biomasa aérea, la subterránea y por hidrólisis desde el C_{P_w} . Por otro lado, se consume a través del proceso de respiración y desnitrificación, que producen CO_2 . Además, existe un fenómeno de transferencia de masa mediada por la difusión de C_{D_w} entre la capa de agua y la capa de sedimento aeróbica.

Los términos nuevos, asociados a este balance se explican a continuación. Los términos de ingreso de C_{D_w} a través de biomasa aérea, subterránea e hidrólisis son análogos a los explicados anteriormente. También lo es el término derivativo de la expresión $\left(-\frac{dV_w}{dt} \frac{C_{P_w}}{V_w}\right)$.

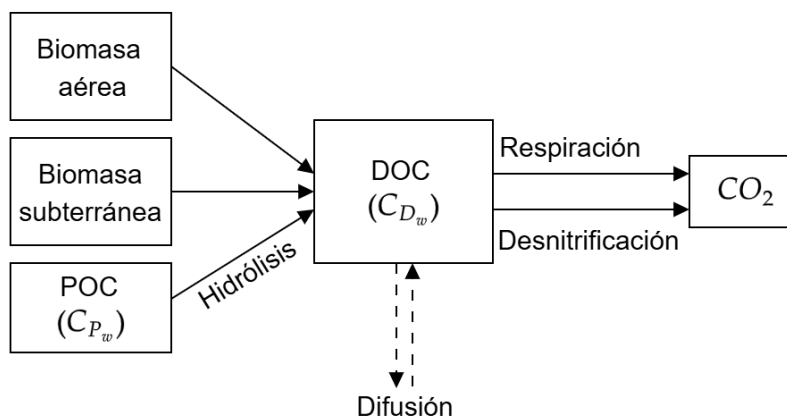


Figura 16: Esquema de balance de masa al carbono orgánico disuelto en la capa de agua.

$$\frac{dC_{D_w}}{dt} = \frac{P_{D_a}}{V_w} a + \frac{P_{D_b}}{V_w} b + k_P C_{P_w} + \frac{\beta_{D1} A}{V_w} (C_{D1} - C_{D_w}) - k_{D1} C_{D_w} - \frac{K_o^{in}}{O_w + K_o^{in}} k_{D2} C_{D_w} - \frac{dV_w}{dt} \frac{C_{D_w}}{V_w}$$

Ecuación 16: Balance de masa al carbono orgánico disuelto en la columna de agua.

1. $+\frac{\beta_{D1}A}{V_w}(C_{D1} - C_{Dw})$: Corresponde al término difusivo de la transferencia de masa entre las capas de agua y sedimento aeróbico. El parámetro β_{D1} corresponde a la tasa de difusividad de la transferencia de masa entre las capas anteriormente mencionadas. La difusividad dependerá de la diferencia entre las concentraciones de carbono orgánico disuelto entre ellas.
2. $-k_{D1}C_{Dw}$: Es la expresión que modela el proceso de respiración para la formación de CO_2 . Se asume, al igual que el proceso de hidrólisis, una reacción de primer orden.
3. $-\frac{K_o^{in}}{O_w + K_o^{in}}k_{D2}C_{Dw}$: Este término representa la desnitrificación. Al tratarse de un proceso enzimático, es descrito a través de la cinética de reacción de Michaelis-Menten¹. El parámetro K_o^{in} describe el coeficiente de inhibición de oxígeno y k_{D2} representa la tasa máxima de utilización de carbono orgánico disuelto para la desnitrificación. O_w representa la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua y que corresponde al factor de inhibición de la desnitrificación.

BALANCE DE MASA A LA CAPA AERÓBICA DE SEDIMENTO

El balance de masa al carbono particulado en la capa de sedimento aeróbica (C_{P1}) se muestra en la Figura 17 y Ecuación 17. La acumulación de C_{P1} está determinada por los siguientes factores: ingreso de C_{P1} mediante el efecto de biomasa subterránea y el decantamiento de este desde la capa superior de agua; consumo de C_{P1} mediante hidrólisis para la producción de carbono orgánico disuelto en esta capa (C_{D1}); salida a través de la resuspensión de carbono particulado hacia la capa de agua y enterramiento del carbono particulado hacia capas más profundas (capa de sedimento anaeróbico).

Los términos del balance de masa son análogos a los descritos anteriormente, con excepción de los procesos de resuspensión, decantación y enterramiento, que se describen a continuación.

¹ Michalis-Menten describe la cinética enzimática a través de la siguiente ecuación: $V = \frac{k_2 e_0 a}{K_s + a} = V_{max} \frac{a}{K_s + a}$, en donde V es la velocidad inicial de reacción, V_{max} es la velocidad máxima, a es la concentración de sustrato y K_s es el valor de la concentración de sustrato para el cual la velocidad de reacción es igual a la mitad de la velocidad máxima (Alberto A. Herrera Becerra, 2019).

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

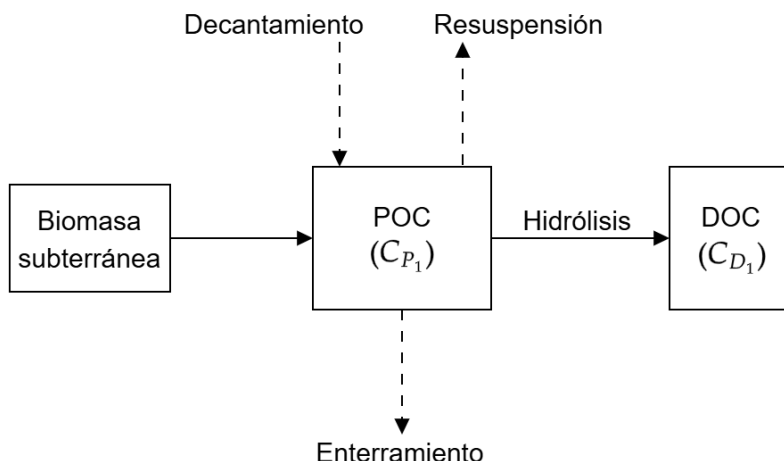


Figura 17: Esquema de balance de masa al carbono orgánico particulado en la capa de sedimento aeróbica.

$$\frac{dC_{P1}}{dt} = \frac{P_{P1}}{V_{s1}} b - k_P C_{P1} + \frac{S_1 A}{V_{s1}} C_{p_w} - \frac{R_1 A}{V_{s1}} C_{P1} - \frac{v_b A}{V_{s1}} C_{P1}$$

Ecuación 17: Balance de masa al carbono particulado en la zona aeróbica.

1. $+\frac{S_1 A}{V_{s1}} C_{p_w}$: Este término describe el proceso de decantación. Esta expresión considera el término S_1 que corresponde al coeficiente de transferencia integrado al POC desde la capa de agua hacia la capa de sedimento anaeróbico.
2. $-\frac{R_1 A}{V_{s1}} C_{P1}$: Corresponde al proceso de resuspensión que considera el coeficiente integrado de transferencia de masa desde la capa de la capa de sedimento aeróbica hasta la capa de agua (R_1).
3. $-\frac{v_b A}{V_{s1}} C_{P1}$: Corresponde al proceso de enterramiento, en donde el C_{P1} pasa desde la capa de sedimento aeróbico a la capa anaeróbica. v_b es la velocidad de enterramiento y V_{s1} es el volumen de la capa de sedimento aeróbico.

La cantidad de C_{D1} dependerá de la cantidad de C_{D1} que ingrese mediante la biomasa subterránea y la hidrólisis generada desde el C_{P1} . Por otro lado, el carbono disuelto difundirá desde la capa aeróbica hacia la capa de agua y el sedimento anaeróbico. Finalmente, la piscina de DOC se consumirá mediante el proceso de respiración y enterramiento. El proceso se muestra en Figura 18 y la Ecuación 18. Los términos en el balance de masa, son análogos a los anteriormente explicados.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

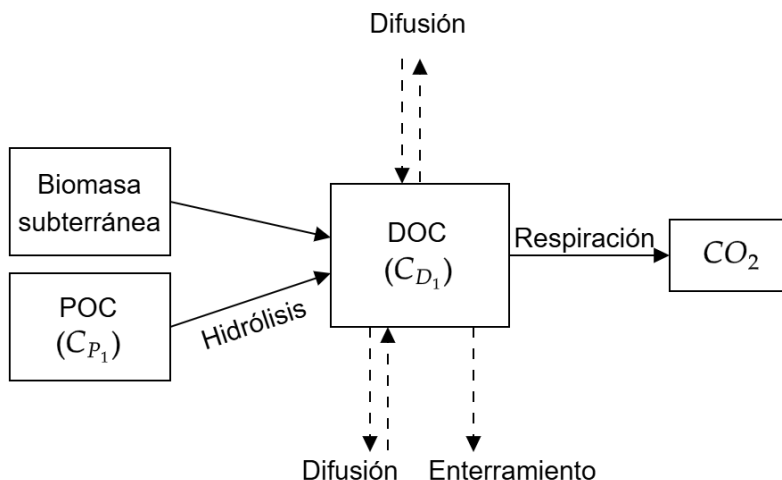


Figura 18: Esquema de balance de masa al carbono orgánico disuelto en la capa de sedimento aeróbica.

$$\frac{dC_{D1}}{dt} = \frac{P_{D1}}{V_{s1}\phi} b + \frac{k_p}{\phi} C_{P1} - \frac{b_{D1}A}{V_{s1}\phi} (C_{D1} - C_{Dw}) - \frac{\beta_{D2}A}{V_{s1}\phi} (C_{D1} - C_{D2}) - k_{D1}C_{D1} - \frac{v_bA}{V_{s1}} C_{D1}$$

Ecuación 18: Balance de masa al carbono orgánico disuelto en la zona aeróbica.

BALANCE DE MASA A LA CAPA ANAERÓBICA DE SEDIMENTO

La dinámica del carbono orgánico particulado para la capa de sedimento anaeróbico (C_{P2}) se observa en la Figura 19. Los procesos que intervienen en su acumulación son ingreso por biomasa subterránea y decantamiento desde la capa de sedimento aeróbico. Por otro lado, existe consumo de C_{P2} por hidrólisis y este sale del sistema dados los procesos de resuspensión y enterramiento. El balance de masa, con expresiones análogas a lo descrito anteriormente, se observan en la Ecuación 19.

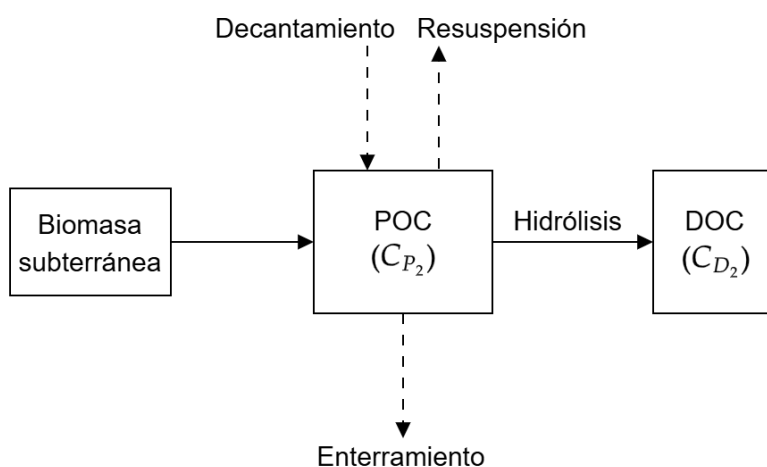


Figura 19: Esquema de balance de masa al carbono orgánico particulado en la capa de sedimento anaeróbica.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

$$\frac{dC_{P2}}{dt} = \frac{P_{P2}}{V_{s2}}b - k_P C_{P2} + \frac{S_2 A}{V_{s2}} C_{P_w} - \frac{R_2 A}{V_{s2}} C_{P2} - \frac{v_b A}{v_{s2}} (C_{P2} - C_{P1})$$

Ecuación 19: Balance de masa al carbono particulado en la zona anaeróbica.

Finalmente, para la generación de carbono disuelto en el sedimento anaeróbico (C_{D2}) los procesos son iguales a los mencionados en los balances de masa anteriores, a excepción de la metanogénesis y la desnitrificación (Ver Figura 20 y Ecuación 20). A continuación, se describen estos últimos términos del modelo de humedales.

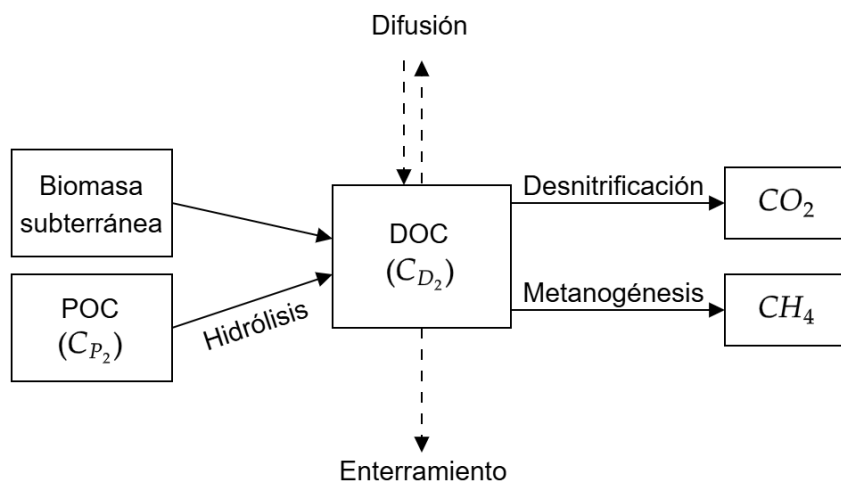


Figura 20: Esquema de balance de masa al carbono orgánico disuelto en la capa de sedimento anaeróbica.

$$\frac{dC_{D2}}{dt} = \frac{P_{D2}}{\phi V_{s2}}b + \frac{k_P}{\phi} C_{P2} - \frac{\beta_{D2} A}{\phi V_{s2}} (C_{D2} - C_{D1}) - \frac{v_b A}{V_{s2}} (C_{D2} - C_{D1}) - k_{D2} C_{D2} - k_{D3} C_{D2}$$

Ecuación 20: Balance de masa al carbono orgánico disuelto en la zona anaeróbica.

1. $-k_{D2} C_{D2} - k_{D3} C_{D2}$: Corresponden a los términos de desnitrificación y metanogénesis, respectivamente. En ambas se asumen reacciones de primer orden. Para el caso de la desnitrificación, no se utiliza la ecuación de Michalis Menten (con inhibición de oxígeno), porque las rutas metabólicas de los organismos desnitrificadores, en este tipo de ambiente, crecen en ausencia de este.

CARBONO TOTAL DEL SUELO

Finalmente, el carbono total del suelo se calcula como la suma de los tipos de carbono (Ecuación 21) que se obtienen luego de la resolución del sistema de EDOs.

$$C_{soil} = C_{P_w} + C_{D_w} + C_{P1} + C_{D1} + C_{P2} + C_{D2}$$

Ecuación 21: Carbono total del suelo en humedales.

OBTENCIÓN DE DATA SATELITAL

En la siguiente sección se explican los cálculos asociados a la utilización de datos satelitales para estimar el volumen de agua (V_W), la biomasa aérea (a), biomasa subterránea (b) y oxígeno disuelto (O_W), necesarios para el cálculo de carbono en el suelo y carbono total en el humedal.

VOLUMEN DE AGUA

El volumen del humedal se calcula con la Ecuación 22. Para determinar el área de la región en donde el humedal contiene agua, se utiliza el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), que sirve para detectar cuerpos de agua (Gao, 1996). El índice, permite clasificar los píxeles que contienen agua ($NDWI > 0$) para los que se calculará el volumen (Ecuación 23).

$$V_W = A \cdot h$$

Ecuación 22: Volumen de agua.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} = \frac{B3 - B8}{B3 + B8}$$

Ecuación 23: Cálculo de NDWI con data satelital.

La profundidad del humedal (h) se obtiene con un modelo digital de elevación (DEM) que viene de SRTM (USGS/SRTMGL1_003). La elevación más baja dentro de la región de interés (ROI) se asume como la elevación del fondo del humedal. La profundidad se calcula como la diferencia absoluta entre la elevación de cada píxel y este valor mínimo. Las estimaciones de profundidad se limitan a 6 metros para reducir la influencia de errores del modelo digital de elevación (DEM) y de valores anómalos. Cuando no se detectan píxeles de agua válidos, el volumen se define como cero.

El V_W de la región se obtiene al sumar el producto entre h y A de todos los píxeles sobre la extensión de agua detectada. El procedimiento se realiza con data satelital mensual que genera una serie temporal de doce volúmenes mensuales por año. El valor correspondiente al mes en estudio se utiliza como entrada (V_W) en el sistema de ecuaciones diferenciales.

BIOMASA AÉREA

La biomasa aérea es calculada, utilizando el NDVI (Ecuación 7) como input en la relación de la Ecuación 24. En donde, T es el valor del total de biomasa viva ($\frac{g \text{ peso seco}}{m^2}$).

Para calcular el total de biomasa aérea, es necesario hacer la conversión de la Ecuación 25, multiplicando el área de la región de interés (A).

$$NDVI = 0.149 + 0.096 \ln(T)$$

Ecuación 24 Cálculo de Biomasa Viva usando NDVI (Hardisky, 1983).

$$a = \frac{T \cdot A}{1000}$$

Ecuación 25: Total de biomasa aérea.

BIOMASA SUBTERRÁNEA

Con la obtención de la biomasa aérea total, se calcula la biomasa subterránea a través de la expresión alométrica (Fourqurean, 2019) de la Ecuación 26. En donde b representa la biomasa subterránea en gramos de peso seco.

$$\ln(b) = 0.718 \ln(a \cdot 1000) + 2.646$$

Ecuación 26: Cálculo de biomasa subterránea.

OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto se calcula a través de la Ecuación 27, en donde B_4 y B_5 son los valores de la banda roja y banda del borde rojo, respectivamente.

$$DO = -39.2556 + \frac{0.8061}{B_4} + 4288.3263 \cdot (B_4 \cdot B_5) + 19.4829 \cdot \left(\frac{B_4}{B_5}\right)$$

Ecuación 27: Expresión para el cálculo de oxígeno disuelto (Padilla-Mendoza, 2023).

El resultado de esta expresión se entrega en miligramos por litro, por lo que es necesario realizar conversiones para la obtención de O_W ($\frac{kg}{m^3}$).

CARBONO TOTAL – MODELO DE HUMEDALES

Una vez obtenido los valores del carbono del suelo, la biomasa aérea y biomasa subterránea, el carbono total se calcula a través de la expresión de la Ecuación 28

$$C_{tot} = C_{soil} + 0.441 \cdot a + 0.415 \cdot b$$

Ecuación 28: Ecuación de stock de carbono total en humedales.

CALIBRACIÓN DEL MODELO DE HUMEDALES

La calibración de humedales sigue una lógica similar al ajuste del modelo de bosques: se resuelve un problema mayor, en el que los parámetros varían sus valores hasta encontrar una configuración que minimice el error cuadrático entre la simulación del modelo y los datos medidos en campo. El ajuste, además, incluye la decisión de fijar o no los valores de algunos de estos parámetros, con el objetivo de mejorar la parametrización y generar una calibración estable y robusta.

En función de lo anterior, el modelo de humedales tiene las siguientes variables.

- Variables independientes (Tabla 9): correspondientes al espacio (parcelas) y tiempo de medición de datos (fechas de medición).
- Variables dependientes del simulador (Tabla 10): son aquellas variables relativas a la región de interés y el tiempo en el que se quiere calcular el carbono en humedales. Estas deben ser obtenidas desde la región de interés (como por ejemplo datos satelitales) y que permiten que el modelo de humedales se ejecute. Para efectos de la calibración, estas variables se fijan en los puntos de obtención de data de campo.
- Variables dependientes del modelo (Tabla 11): corresponden a las variables fundamentales del modelo de humedales y que serán modificadas para la realización del ajuste. En particular, hablamos de los parámetros del modelo a calibrar y de los valores de carbono modelados que deben ser acercados a los valores reales obtenidos en campo.

En la calibración, los parámetros del modelo se dividen en dos grupos: parámetros libres (θ) y parámetros fijos (θ_{fixed}). Los parámetros libres son aquellos que se ajustarán para que el modelo se acerque a los valores reales de carbono. Los parámetros fijos, serán determinados en el proceso de calibración, de forma que el proceso mejore la estabilidad del modelo su robustez y el ajuste persé. La selección de estos parámetros no es un proceso predeterminado, sino una **variable de decisión** intrínseca a la calibración, ya que se define qué parámetros fijar (y cuáles no) en función de la minimización del error cuadrático medio.

Tabla 9: Variables independientes. Modelo de humedales.

Variables independientes	Descripción	Unidad de medida
P	Corresponden a las parcelas (regiones de interés) desde donde se extraen los datos satelitales.	—
t_P	Corresponden a los tiempos de medición desde donde se toman los datos satelitales para cada una de las parcelas.	mes

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

Tabla 10: Variables dependientes del simulador. Modelo de humedales.

Variables dependientes del simulador	Descripción	Unidad de medida
$DO_p(t)$	Valor de oxígeno disuelto calculado con las bandas satelitales B_4 y B_5 para una parcela p en un tiempo t .	$\frac{kg}{m^3}$
$DEM_p(t)$	Valores de elevación de terreno, obtenidas desde data satelital para una para una parcela p en un tiempo t .	m
$NDVI_p(t)$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada obtenido desde data satelital para una parcela p en un tiempo t	—
$NDWI_p(t)$	Índice de Diferencia Normalizada de Agua obtenida desde data satelital, para una parcela p en un tiempo t .	—
$C_{p,t}^d$	Datos de carbono (C) medidos en la parcela p para un tiempo t .	kg
C_p^i	Condición inicial de carbono para la parcela p .	kg
A_p	Área de la parcela p .	m^2

Tabla 11: Variables dependientes. Modelo de humedales.

Variables dependientes del modelo	Descripción	Unidades de medida
θ	Corresponde al vector de parámetros que serán modificados para ajustar el modelo a valores cercanos de $C_{p,t}^d$.	—
θ_{fixed}	Corresponde al vector de parámetros que serán fijados para mejorar el ajuste del modelo.	—
$C_{p,t}^m$	Valores de carbono entregados por el modelo de humedales para una parcela p en un tiempo t .	kg

METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN

La calibración se realizó en dos etapas que permiten encontrar los valores iniciales de los parámetros y las condiciones iniciales de carbono para inicializar la optimización y el modelo de humedales, respectivamente.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

En la primera, se ejecuta una secuencia de optimizaciones en las que se utilizaron las estimaciones de parámetros obtenidas en el paso anterior como nuevos valores iniciales para la optimización. Para cada iteración, las variables de estado del carbono se reiniciaron siempre con $C_{P_w} = C_{D_w} = C_{P_1} = C_{D_1} = C_{P_2} = C_{D_2} = 0.1$. Este proceso se repitió varias veces hasta observar la convergencia de los valores de los parámetros. El conjunto de parámetros resultante se consideró una configuración tentativa de la adivinanza inicial de parámetros.

En la segunda etapa, el conjunto de parámetros tentativo se utilizó para generar nuevas condiciones iniciales de variables de estado que representaran correctamente las condiciones iniciales de carbono en el humedal. El modelo se simuló un mes antes del mes objetivo en estudio, de forma que los reservorios de carbono resultantes se usaron como condiciones iniciales para el proceso de calibración, y los parámetros tentativos se emplearon como valores iniciales. Luego, la optimización se reinició y el proceso se repitió de forma iterativa, de modo que cada optimización alimentara a la siguiente, hasta que las estimaciones de los parámetros se estabilizaron y se obtuvo un ajuste satisfactorio.

Para los resultados de los parámetros se examinó su identificabilidad y se realizó un análisis de correlación de parámetros para estimar si era necesario fijar ciertos parámetros o reducirlos. En la Figura 21 se muestra la metodología del procedimiento de calibración.

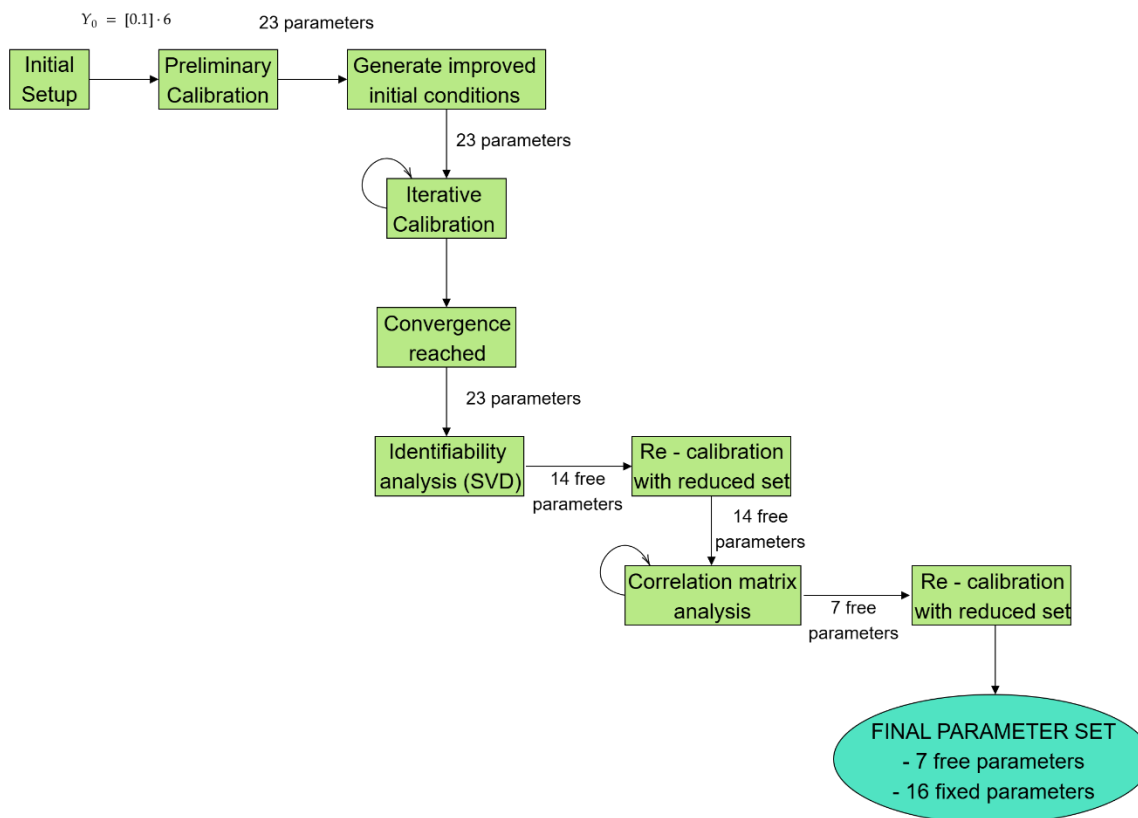


Figura 21: Diagrama del procedimiento para la obtención de condiciones iniciales.

RESULTADOS CALIBRACIÓN

Los resultados de la calibración se muestran a continuación. En la Figura 22 se muestran los resultados de la calibración, en donde se observa que la mayoría de los puntos de calibración se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95% y próximos a la línea de referencia (curva de identidad). Los puntos de datos que se ubican fuera de los límites de confianza podrían estar relacionados con **condiciones específicas del sitio o incertidumbres de medición**, aspectos que podrían abordarse mediante una calibración más refinada o con datos adicionales. Finalmente, se considera que con ese procedimiento se obtiene un buen desempeño en los valores del modelo.

La validación del modelo se realiza con los valores de parámetros ajustados obtenidos desde la calibración y con un conjunto de 5 datos de medición en terreno que no fueron utilizados en el proceso de calibración. La Figura 23 muestra que los puntos de validación se encuentran cerca de la curva de identidad y la mayoría se encuentra dentro del intervalo de confianza del 95%, lo que indica un buen desempeño.

Si bien los datos para calibrar y validar fueron escasos en el ajuste del modelo, los resultados entregan evidencia alentadora de la capacidad predictiva del modelo.

Finalmente, en la Tabla 12, se muestran los valores de los parámetros del modelo de humedales, obtenidos luego del proceso de calibración. En la tabla se presentan cuáles fueron los parámetros que quedaron libres para ajustar el modelo y cuáles fueron fijados para la obtención de resultados más precisos.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

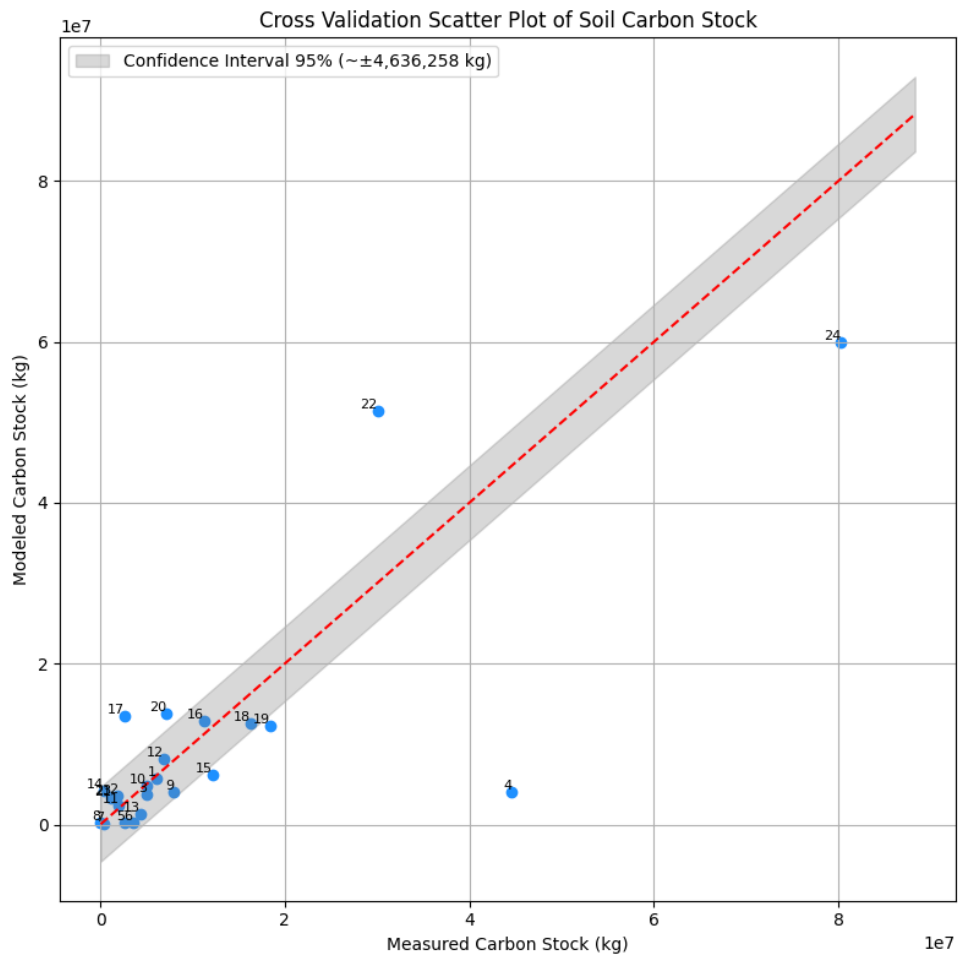


Figura 22: Diagrama de dispersión de la calibración final por mínimos cuadrados.

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

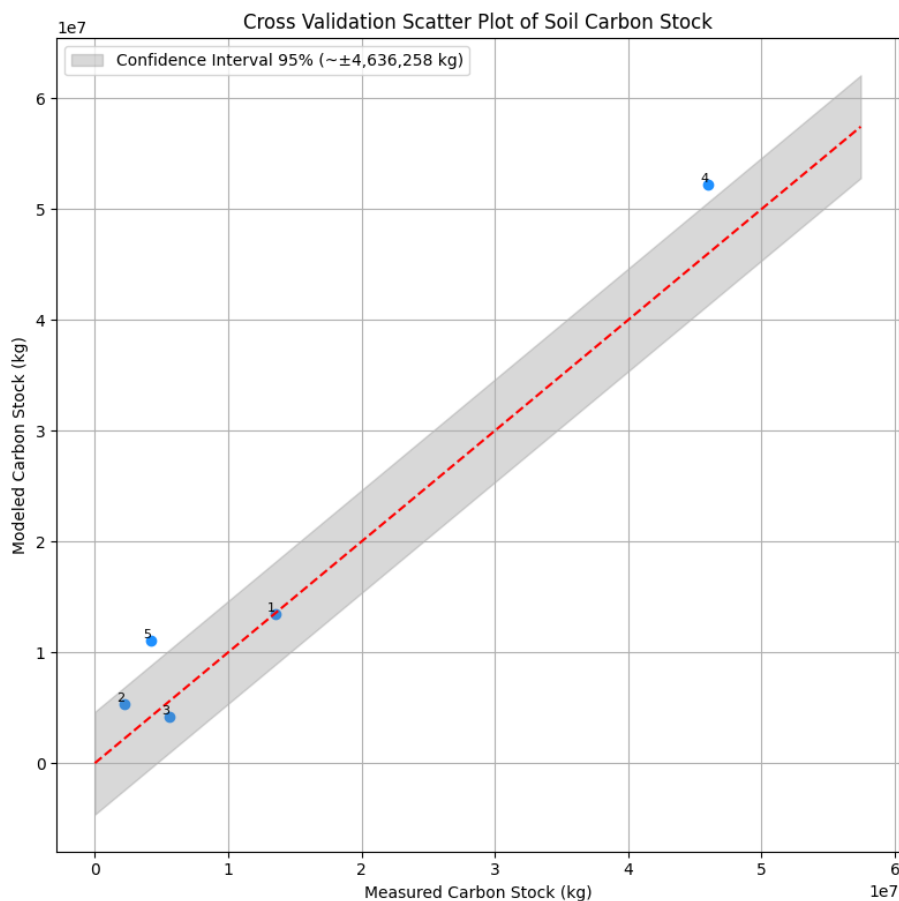


Figura 23: Diagrama de validación del modelo de humedales.

Tabla 12: Valores de parámetros finales. Modelo de humedales.

Parámetro	Estado	Valor	Unidad de medida
P_{Pa}	Fijo	1.1241	$\frac{1}{mes}$
P_{Pb}	Fijo	0.2956	$\frac{1}{mes}$
k_P	Libre	4.8909 ± 5.6875	$\frac{1}{mes}$
v_s	Fijo	906.8321	$\frac{m}{mes}$
v_r	Libre	0.5147 ± 0.6839	$\frac{m}{mes}$
P_{Da}	Fijo	684.989	$\frac{1}{mes}$
P_{Db}	Fijo	0.4289	$\frac{1}{mes}$
β_{D1}	Libre	4.696 ± 2.9543	$\frac{m}{mes}$
P_{P1}	Fijo	4.036	$\frac{1}{mes}$

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

S_1	Libre	1.2371 ± 2.1959	$\frac{m}{mes}$
R_1	Fijo	64.518	$\frac{m}{mes}$
v_b	Fijo	400.3227	$\frac{m}{mes}$
P_{D_1}	Libre	0.6513 ± 2.0484	$\frac{1}{mes}$
β_{D_2}	Fijo	44.3028	$\frac{m}{mes}$
k_{D_1}	Fijo	3.2545	$\frac{1}{mes}$
k_{D_2}	Libre	5.5273 ± 3.3054	$\frac{1}{mes}$
P_{P_2}	Libre	$0.0008 \pm 2.1668\}$	$\frac{1}{mes}$
S_2	Fijo	39.8779	$\frac{m}{mes}$
R_2	Fijo	7.3867	$\frac{m}{mes}$
P_{D_2}	Fijo	5.9453	$\frac{1}{mes}$
k_{D_3}	Fijo	573.1766	$\frac{1}{mes}$
b_{D_1}	Fijo	23.8441	$\frac{m}{mes}$
K_O^{in}	Fijo	68.1628	$\frac{kg}{m^3}$

CONCLUSIONES Y SIGUIENTES PASOS

El modelo de humedales muestra resultados alentadores para la estimación de carbono utilizando remote sensing, sin embargo, es necesario obtener más datos de campo para que la validación del modelo sea mucho más representativa.

A pesar de lo anterior, y con los datos disponibles, el modelo muestra un comportamiento estable y la metodología de calibración es robusta. El modelo logra obtener resultados confiables de carbono que fueron comparados con la herramienta WetQual-C y que entregaron resultados muy positivos en términos su desarrollo y funcionamiento.

El modelo de humedales está siendo actualmente implementado en el explorador y prontamente se realizarán pruebas para analizar su ejecución.

NOMENCLATURA MODELO DE HUMEDALES

Tabla 13: Variables del modelo de humedales.

Variables	Descripción	Unidad de medida
C_{P_w}	Carbono orgánico particulado en la columna de agua.	$\frac{kg}{m^3}$
C_{D_w}	Carbono orgánico disuelto en la columna de agua.	$\frac{kg}{m^3}$
C_{P_1}	Carbono orgánico particulado en la capa de sedimento aeróbica.	$\frac{kg}{m^3}$
C_{D_1}	Carbono orgánico disuelto en la capa de sedimento aeróbica.	$\frac{kg}{m^3}$
C_{P_2}	Carbono orgánico particulado en la capa de sedimento anaeróbica.	$\frac{kg}{m^3}$
C_{D_2}	Carbono orgánico disuelto en la capa de sedimento anaeróbico.	$\frac{kg}{m^3}$
C_{soil}	Carbono orgánico total del suelo.	kg
C_{tot}	Stock de carbono total (Carbono del suelo + carbono de la biomasa.)	kg
a	Biomasa aérea.	kg
b	Biomasa subterránea.	kg
B_a	Biomasa aérea utilizada para el cálculo del carbono total.	kg
B_b	Biomasa subterránea para el cálculo de carbono total.	kg
A	Área del humedal	m^2
V_w	Volumen de agua asociada al área del humedal.	m^3
V_{s1}	Volumen de la capa de sedimento aeróbico.	m^3
V_{s2}	Volumen de la capa de sedimento anaeróbico.	m^3
O_w	Concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua.	$\frac{kg}{m^3}$

Tabla 14: Parámetros del modelo de humedales.

Parámetros	Descripción	Unidades de medida
P_{P_a}	Coeficiente integrado para el aporte de POC desde la biomasa aérea de plantas flotantes libres y adheridas.	$\frac{1}{mes}$
P_{P_b}	Coeficiente integrado para el aporte de POC desde la biomasa subterránea de plantas enraizadas.	$\frac{1}{mes}$
k_P	Tasa de hidrólisis del POC.	$\frac{1}{mes}$
v_s	Tasa efectiva de sedimentación del material orgánico en el agua.	$\frac{m}{mes}$

CarbonSink – Chile. Informe metodológico.

v_r	Tasa efectiva de resuspensión del material orgánico en el agua.	$\frac{m}{mes}$
P_{D_a}	Coeficiente integrado para el aporte de DOC desde la biomasa aérea de plantas flotantes libres y adheridas.	$\frac{1}{mes}$
P_{D_b}	Coeficiente integrado para el aporte de DOC desde la biomasa subterránea de plantas enraizadas.	$\frac{1}{mes}$
β_{D_1}	Tasa de transferencia másica difusiva de DOC entre el agua superficial y la capa sedimentaria aerobia, ajustada por la porosidad ϕ_w	$\frac{m}{mes}$
k_{D_1}	Tasa máxima de utilización de DOC para respiración aerobia.	$\frac{1}{mes}$
K_o^{in}	Coeficiente de inhibición por oxígeno tipo Michaelis-Menten.	$\frac{kg}{m^3}$
k_{D_2}	Tasa máxima de utilización de DOC para desnitrificación.	$\frac{1}{mes}$
P_{P_1}	Coeficiente integrado para el aporte de POC desde la biomasa subterránea hacia la capa sedimentaria aerobia.	$\frac{1}{mes}$
S_1	Coeficiente integrado de transferencia por sedimentación de POC desde el agua superficial hacia la capa sedimentaria aerobia.	$\frac{m}{mes}$
R_1	Coeficiente integrado de transferencia por resuspensión de POC desde la capa sedimentaria aerobia hacia el agua superficial.	$\frac{m}{mes}$
v_b	Velocidad de enterramiento.	$\frac{m}{mes}$
P_{D_1}	Coeficiente integrado para el aporte de DOC desde la biomasa subterránea hacia la capa sedimentaria aerobia.	$\frac{1}{mes}$
b_{D_1}	Tasa de transferencia másica difusiva de DOC entre el agua del humedal y la capa del suelo aerobia.	$\frac{m}{mes}$
β_{D_2}	Tasa de transferencia másica difusiva de DOC entre el agua del humedal y la capa del suelo anaerobia.	$\frac{m}{mes}$
P_{P_2}	Coeficiente integrado para el aporte de POC desde la biomasa subterránea hacia la capa sedimentaria anaerobia.	$\frac{1}{mes}$
S_2	Coeficiente integrado de transferencia por sedimentación de POC desde el agua superficial hacia la capa sedimentaria anaerobia.	$\frac{m}{mes}$
R_2	Coeficiente integrado de transferencia por resuspensión de POC desde la capa sedimentaria anaerobia hacia el agua superficial.	$\frac{m}{mes}$
P_{D_2}	Coeficiente integrado para el aporte de CO desde la biomasa subterránea hacia la capa sedimentaria anaerobia.	$\frac{1}{mes}$
k_{D_3}	Tasa efectiva de utilización de DOC para metanogénesis bajo condiciones inhibidas por nitrato.	$\frac{1}{mes}$
ϕ	Porosidad del sedimento.	-

Bibliografía

- Alberto A. Herrera Becerra, R. P. (2019). Cinética enzimática y el modelo de Michaelis-Menten. Una revisión crítica. *SOMI XXXIV: Congreso de instrumentación*.
- EOS DATA ANALYTICS. (07 de 07 de 2025). Obtenido de NDVI: Cómo Funciona El Índice Y Uso En La Agricultura: <https://eos.com/es/blog/indice-de-vegetacion-de-diferencia-normalizada-o-ndvi/>
- Fourqurean, J. J. (2019). Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves. *Tidal Salt Marshes and Seagrass Meadows*. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372868>
- Gao, B.-c. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Hardisky, M. K. (1983). Remote sensing salt marsh biomass and. *Advances in Space Research*, 2, 219-229. doi:[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(82\)90243-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(82)90243-5)
- McCree, K. ((1981)). Photosynthetically Active Radiation. En O. N. Lange, *Physiological Plant Ecology I. Encyclopedia of Plant Physiology* (Vol. vol 12 , págs. 41-55). Springer, Berlin, Heidelberg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8_3
- Monod, J. (1949). THE GROWTH OF BACTERIAL CULTURES. *Annual Review of Microbiology*, 371-394.
- Padilla-Mendoza, C. T.-B.-D.-M. (2023). Potential of sentinel images to evaluate physicochemical parameters concentrations in. *Water*, 15. doi:<https://doi.org/10.3390/w15040789>
- Sharifi, A. K. (2013). Carbon dynamics and. *Ecological Modelling*, 263, 196-210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.023>
- Wang, D. (05 de 11 de 2024). *MODIS/Terra+Aqua Photosynthetically Active Radiation Daily/3-Hour L3 Global 1km SIN Grid V062 [Data set]*. Obtenido de NASA Land Processes Distributed Active Archive Center.: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD18A2.062>