

Descripción general de la metodología de los modelos de estimación de carbono

A continuación se muestra la metodología utilizada por el simulador para la estimación de flujo y almacenamiento de carbono. Puede acceder a la documentación con la descripción del problema y la metodología detallada en el siguiente [link](#).

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 (Ver Figura 1). 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.

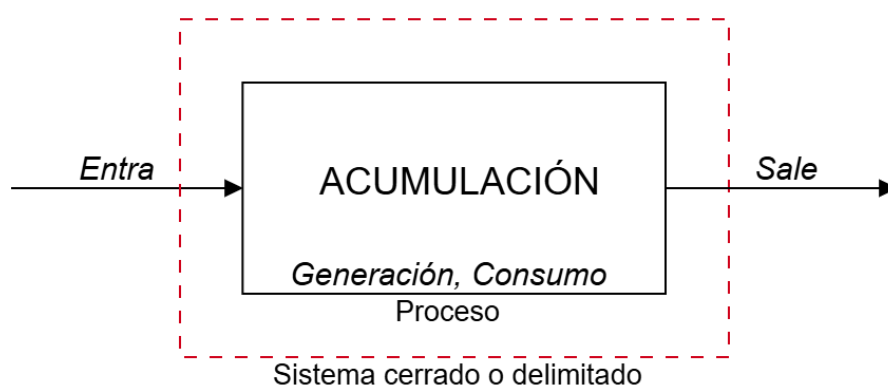


Figura 1

Matemáticamente, este principio se representa a través de la ecuación que se muestra a continuación. Cada una de las expresiones de *Entrada*, *Salida*, *Generación* y *Consumo* serán representadas de diferente forma en los modelos, de manera que las características inherentes a los sistemas naturales, sean expresadas correctamente.

$$Acumulación = Entrada - Salida + Generación - Consumo$$

Metodología de bosques

El modelo de bosques estima el NPP y stock de carbono en los bosques esclerófilos a través de balances de masa generados a los principales reservorios de carbono del ecosistema (biomasa viva (B), madera muerta y hojarasca (LW), y materia orgánica del suelo (SOM)). 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.

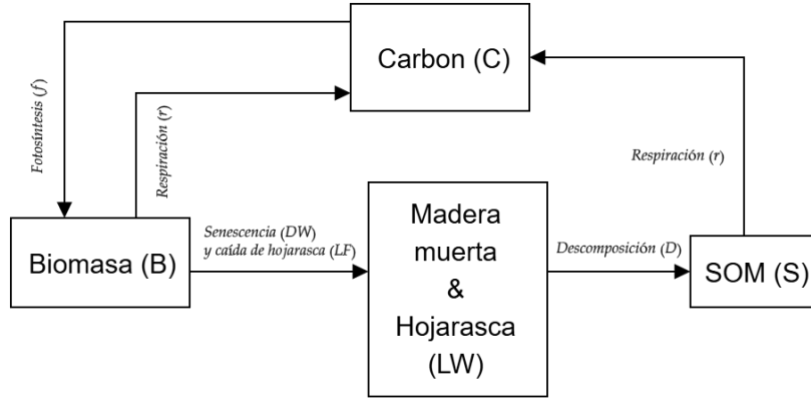


Figura 2

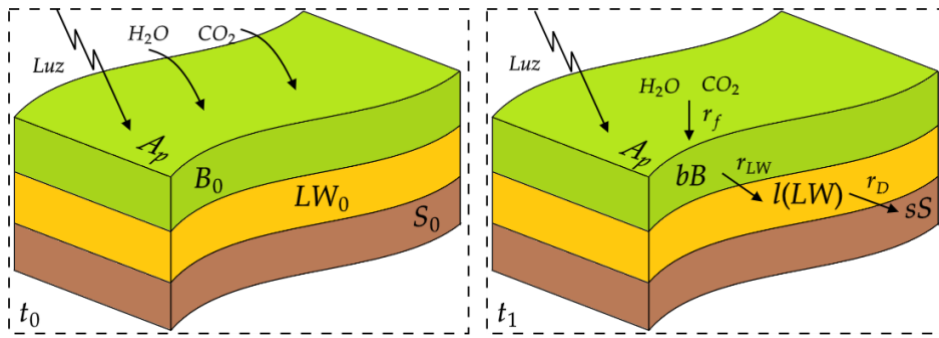


Figura 3

El crecimiento de B, depende de la tasa de generación de fotosíntesis (r_f) y su pérdida estará representada por la caída de hojarasca o madera muerta (r_{LW}). Por otro lado, el cambio en el estado del SOM depende de la tasa de descomposición (r_D) de la materia orgánica presente en el suelo. Finalmente, la cantidad de hojarasca y madera muerta que exista en el sistema, dependerá de la tasa de caída de biomasa viva (r_{LW}) y la descomposición de sí mismo (r_D).

$$\frac{dB}{dt} = (r_f - r_{LW}) \cdot A_p = \left(\frac{\overline{PAR_p(t)}}{k'_f + \overline{PAR_p(t)}} \cdot (m'_f NDVI_p(t) + n'_f) - k_{LW} B^* \right) \cdot A_p$$

$$\frac{dLW}{dt} = \left(\frac{l}{b} r_{LW} - r_D \right) \cdot A_p = \left(\frac{l}{b} k_{LW} B^* - k_1 \cdot \left(\frac{S}{k_D + S} \right) \cdot LW^* \right) \cdot A_p$$

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{s}{l} r_D \right) \cdot A_p = \left(\frac{s}{l} k_1 \left(\frac{S}{k_D + S} \right) \cdot LW^* \right) \cdot A_p$$

Con la masa de cada uno de los reservorios, es posible calcular el NPP, como la variación del stock de carbono en el tiempo, a través de una conversión que mide la cantidad de carbono presente en cada uno de los reservorios. Con una condición inicial, es posible resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales para obtener el stock de carbono final.

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

$$C_B = x_b \cdot B$$

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

$$C_S = x_s \cdot S$$

Uso de data satelital

El estado de la biomasa es estimado a través de la linearización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), calculado por la ecuación que es muestra a continuación. La cantidad de luz solar utilizada por las plantas para el proceso de fotosíntesis es medido a través de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR por sus siglas en inglés), que es el rango de luz solar (400-700 nm) para el cual la vegetación puede utilizar la energía en el proceso de fotosíntesis.

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

Metodología de humedales

El modelo de humedales calcula el NPP y stock de carbono considerando el modelamiento del carbono del suelo y la estimación satelital de la biomasa aérea y subterránea a través de la siguiente ecuación.

$$C_{total} = C_{suelo} + 0.441 \cdot B_{aerea} + 0.415 \cdot B_{subterranea} [1]$$

A continuación se muestra la metodología empleada para calcular cada uno de los componentes anteriormente mencionados.

Biomasa aérea y subterránea

El NDVI, definido anteriormente, se utiliza para estimar el valor de la biomasa aérea a través de la siguiente ecuación:

$$NDVI = 0.149 + 0.96 \ln(T) [2]$$

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

Donde T es el valor de la biomasa viva y a es el valor de la biomasa aérea.

Por otro lado, la biomasa subterránea se calcula a través de la expresión que se muestra a continuación:

$$\ln(b) = 0.718 \ln(a \cdot 1000) + 2.646 [3]$$

Modelo de carbono de suelo (C_{suelo})

El modelo de carbono de suelo es un modelo derivado del WetQual-C (Sharifi, 2013), que compartimentaliza la distribución de carbono en diferentes capas dentro del humedal. Para efectos de este modelo, se asume una estructura simplificada a la de WetQual-C, en donde el humedal se divide en tres capas: columna de agua, capa de sedimento aeróbico y capa de

sedimento anaeróbico. En cada una de ellas, se consideran dos piscinas de carbono: la piscina de carbono orgánico particulado (POC) y la piscina de carbono orgánico disuelto DOC. La configuración queda representada en Figura 4.

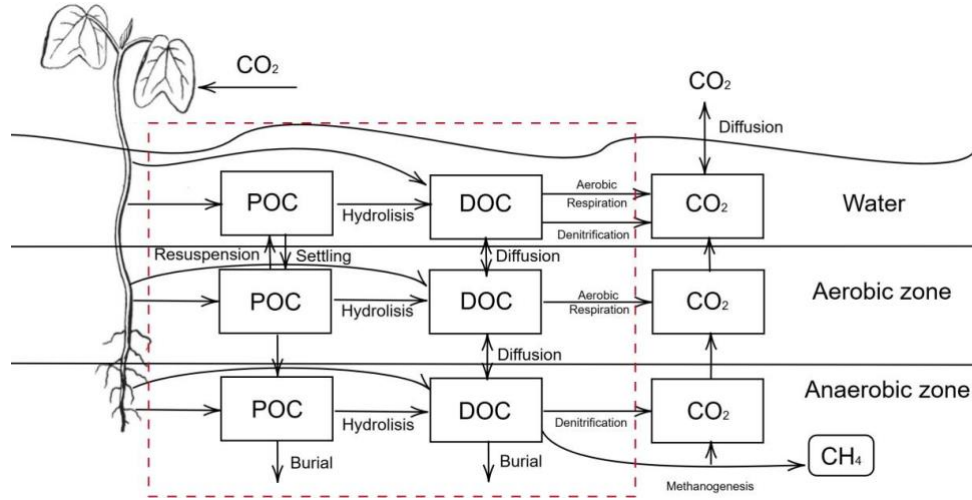


Figura 4

Para cada una de las capas del modelo se realizan balances de masa, considerando los siguientes procesos:

- El carbono orgánico, fijado desde las plantas y organismos como algas, hojas y macrófagos, se disuelve rápidamente para formar la piscina de DOC, mientras que el resto se queda, según su biodegradabilidad, como parte del POC.
- Los microorganismos presentes en el humedal transforman por medio de hidrólisis, el carbono orgánico particulado a carbono orgánico disuelto.
- El DOC se transforma, gradualmente, en compuestos inorgánicos (principalmente CO_2). La oxidación del carbono dependerá del tipo de capa a analizar. En las zonas donde el oxígeno está disponible, microorganismos heterótrofos participan del 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.

A continuación, se muestran los balances de masa a cada una de las capas

Capa de agua

$$\frac{dC_{Pw}}{dt} = \underbrace{\frac{P_{Pa}}{V_w}a}_{\text{Input from aboveground biomass}} + \underbrace{\frac{P_{Pb}}{V_w}b}_{\text{Input from belowground biomass}} - \underbrace{k_P C_{Pw}}_{\text{Hydrolysis}} - \underbrace{\frac{v_s A}{V_w} C_{Pw}}_{\text{Settling}} + \underbrace{\frac{v_r A}{V_w} C_{P1}}_{\text{Resuspension}} - \underbrace{\frac{dV_w}{dt} C_{Pw}}_{\text{Product derivative rule term}}$$

$$\frac{dC_{Dw}}{dt} = \underbrace{\frac{P_{Da}}{V_w}a}_{\text{Input from aboveground biomass}} + \underbrace{\frac{P_{Db}}{V_w}b}_{\text{Input from belowground biomass}} + \underbrace{k_P C_{Pw}}_{\text{Hydrolysis}} + \underbrace{\frac{\beta_{D1} A}{V_w} (C_{D1} - C_{Dw})}_{\text{Diffusion water-aerobic zone}} - \underbrace{k_{D1} C_{Dw}}_{\text{Aerobic respiration}} - \underbrace{\frac{K_o^{in}}{O_w + K_o^{in}} k_{D2} C_{Dw}}_{\text{Denitrification}} - \underbrace{\frac{dV_w}{dt} C_{Dw}}_{\text{Product derivative rule term}}$$

Capa de sedimento aeróbico

$$\frac{dC_{P1}}{dt} = \underbrace{\frac{P_{P1}b}{V_{s1}}}_{\text{Input from belowground biomass}} - \underbrace{k_P C_{P1}}_{\text{Hydrolysis}} + \underbrace{\frac{S_1 A}{V_{s1}} C_{Pw}}_{\text{Settling}} - \underbrace{\frac{R_1 A}{V_{s1}} C_{P1}}_{\text{Resuspension}} - \underbrace{\frac{v_b A}{V_{s1}} C_{P1}}_{\text{Burial}}$$

$$\frac{dC_{D1}}{dt} = \underbrace{\frac{P_{D1}b}{V_{s1}\phi}}_{\text{Input from belowground biomass}} + \underbrace{\frac{k_P}{\phi} C_{P1}}_{\text{Hydrolysis}} - \underbrace{\frac{b_{D1}A}{V_{s1}\phi} (C_{D1} - C_{Dw})}_{\text{Diffusion water-aerobic zone}} - \underbrace{\frac{\beta_{D2}A}{V_{s1}\phi} (C_{D1} - C_{D2})}_{\text{Diffusion aerobic-anaerobic zones}} - \underbrace{k_{D1} C_{D1}}_{\text{Aerobic respiration}} - \underbrace{\frac{v_b A}{V_{s1}} C_{D1}}_{\text{Burial}}$$

Capa de sedimento anaeróbico

$$\frac{dC_{P2}}{dt} = \underbrace{\frac{P_{P2}b}{V_{s2}}}_{\text{Input from belowground biomass}} - \underbrace{k_P C_{P2}}_{\text{Hydrolysis}} + \underbrace{\frac{S_2 A}{V_{s2}} C_{Pw}}_{\text{Settling}} - \underbrace{\frac{R_2 A}{V_{s2}} C_{P2}}_{\text{Resuspension}} - \underbrace{\frac{v_b A}{V_{s2}} (C_{P2} - C_{P1})}_{\text{Burial}}$$

$$\frac{dC_{D2}}{dt} = \underbrace{\frac{P_{D2}b}{\phi V_{s2}}}_{\text{Input from belowground biomass}} + \underbrace{\frac{k_P}{\phi} C_{P2}}_{\text{Hydrolysis}} - \underbrace{\frac{\beta_{D2}A}{\phi V_{s2}} (C_{D2} - C_{D1})}_{\text{Diffusion aerobic-anaerobic zones}} - \underbrace{\frac{v_b A}{V_{s2}} (C_{D2} - C_{D1})}_{\text{Burial}} - \underbrace{k_{D2} C_{D2}}_{\text{Denitrification}} - \underbrace{k_{D3} C_{D2}}_{\text{Methanogenesis}}$$

Uso de data satelital

Los datos satelitales utilizados para el modelo de carbono del suelo, son el Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI por sus siglas en inglés) y Modelo Digital de Elevación (DEM), para el cálculo del volumen del humedal. Por otro lado, las bandas B₄ y B₅ de Sentinel-2 se emplean para el cálculo del oxígeno disuelto.

El NDWI clasifica la capa de agua del humedal, definiendo su área, y el DEM nos entrega la profundidad del humedal para calcular su volumen $V_w = A(NDWI) \cdot h(DEM)$.

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Por otro lado, el oxígeno disuelto es calculado a través de la siguiente expresión:

$$DO = -39.2556 + \frac{0.8061}{B_4} + 4288.3263 \cdot (B_4 \cdot B_5) + 19.4829 \left(\frac{B_4}{B_5}\right) \quad [5]$$

Referencias

- [1] Alongi, D., "Carbon balance in salt marsh and mangrove ecosystems: A global synthesis", *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, p. 767, 09 2020, doi:10.3390/jmse8100767.
- [2] Hardisky, M. K. (1983). Remote sensing salt marsh biomass and. *Advances in Space Research*, 2, 219-229. doi:doi:[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(82\)90243-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(82)90243-5)
- [3] 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>
- [4] Sharifi, A. K. (2013). Carbon dynamics and. *Ecological Modelling*, 263, 196-210. doi:doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.023>
- [5] Padilla-Mendoza, C. T.-B.-D.-M. (2023). Potential of sentinel images to evaluate physicochemical parameters doi:doi:10.3390/w15040789