

## ARTÍCULO CORTO DE INVESTIGACIÓN

DOI 10.47864/SE(52)2022p51-70\_156

Sociedad Colombiana  
de la Ciencia del Suelo

## INCORPORACIÓN DE LA EVALUACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (CAPTURA DE CARBONO Y APORTE POTENCIAL DE NITRÓGENO) COMO PARTE DE LA PLANIFICACIÓN DEL USO EFICIENTE DEL SUELO

Gabriel Eduardo Paramo<sup>1</sup>✉, Heidy Soledad Rodríguez<sup>1</sup>, Ricardo Fabian Siachoque<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Unidad de Planificación Rural agropecuaria, UPRA. Calle 28 No.13-22 Torre C, piso 3 Edificio Palma Real, Bogotá ✉ .gabriel.paramo@upra.gov.co.

**RESUMEN**

*El enfoque socioecosistémico dentro de las estrategias de gestión y planificación considera la dinámica tanto en las diferentes escalas de la organización ecológica, como en las relaciones e interacciones entre los sistemas ecológicos y sociales. Existe una estrecha relación entre el ciclo del C y el del N debido a su acumulación en la materia orgánica del suelo. El presente trabajo tiene como objetivo especializar los efectos ambientales de las actividades agropecuarias sobre la dinámica de estos elementos, mediante la evaluación de aptitud para los cultivos de café, soya y maíz tradicional, haciendo uso de técnicas de sensores remotos y modelamiento espacial. La estimación del contenido de carbono se fundamentó en el cálculo de su cantidad en la biomasa vegetal aérea, subterránea y del suelo, para posteriormente realizar el balance, mediante la estimación de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente capturado por hectárea de los cultivos frente a la cobertura existente. Identificando las áreas en donde puede existir una mayor cantidad de carbono almacenado o pérdida por emisiones en comparación con la cobertura actual. Por otro lado, la absorción potencial de nitrógeno evaluado para soya se determinó a partir del NDVI azul que corresponde a un indicador de la concentración de nitrógeno en plantas y se realizó la diferencia entre el valor de NDVI Azul total de las coberturas actuales y el NDVI para el cultivo de soya, a fin de identificar el impacto del cultivo sobre el potencial de nitrógeno de la cobertura actual. A partir de esta modelación se obtuvo la cartografía de aptitud para carbono y nitrógeno..*

**Palabras claves:**

Biomasa aérea, NDVI azul, SWIR, sensores remotos, CO<sub>2</sub> capturado, Potencial de nitrógeno

## INCORPORATION OF THE ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES (CARBON CAPTURE AND POTENTIAL INPUT OF NITROGEN) AS PART OF EFFICIENT LAND USE PLANNING

**Keywords** Aerial biomass, blue NDVI, SWIR, remote sensing, CO<sub>2</sub> captured, nitrogen potential

**ABSTRACT**

*The socio-ecosystemic approach within management and planning strategies considers the dynamics both at the different scales of ecological organization and in the relationships and interactions between ecological and social systems. There is a close relationship between C and N cycling due to its accumulation in soil organic matter. The objective of this work is to spatialize the environmental effects of agricultural activities on the dynamics of these elements through the evaluation of suitability for coffee, soybean, and traditional corn crops, using remote sensing techniques and spatial modeling. The estimation of carbon content was based on the calculation of the amount of carbon in the aerial, subway, and soil plant biomass, in order to subsequently make the balance by estimating the tons of CO<sub>2</sub> equivalent captured per hectare of the crops compared to the existing cover. Identifying the areas where there may be a greater amount of carbon stored or lost due to emissions compared to the current cover. On the other hand, the potential nitrogen uptake evaluated for soybean was determined from the blue NDVI, which corresponds to an indicator of the concentration of nitrogen in plants, and the difference between the total blue NDVI value of the current cover and the NDVI for the soybean crop was made, in order to identify the impact of the crop on the nitrogen potential of the current cover. From this modeling, the carbon and nitrogen suitability mapping were obtained.*

Rec : 07/08/2021

Acep : 20/10/2021



## INTRODUCCIÓN

Desde el año 2013, la UPRA ha realizado la zonificación de aptitud para la implementación de diversos usos agropecuarios para Colombia, mediante la adaptación del esquema de evaluación de tierras (Framework for Land Evaluation), (FAO, 1976); al cual se le han incorporado criterios socioecosistémicos (evaluación de bienes y servicios ecosistémicos), y socioeconómicos (referidos a la competitividad socioeconómica de las áreas), integrando los componentes edafoclimáticos (normalmente evaluados en la metodología de evaluación de tierras), con el componente socioecosistémico y el socioeconómico a través de un análisis multicriterio (UPRA 2014, Eastman et al. 1998).

Dentro de la metodología desarrollada para la zonificación de componente ecosistémico, se contempla la evaluación y cartografía de una serie de criterios y variables, en los cuales se hace referencia a los factores fundamentales de sostenibilidad ecológica y ambiental que debe tener un determinado uso agropecuario para evitar o disminuir los efectos negativos en el territorio, así como para valorar la posibilidad de aumento o mantenimiento en la prestación de los diferentes servicios ecosistémicos generados.

Teniendo este punto de partida, se definen los servicios ecosistémicos como “todos los bienes y servicios de los cuales goza la humanidad que dependen de las múltiples e intrincadas transformaciones de materiales y los flujos de energía que ocurren en los ecosistemas. El mantenimiento de estos bienes es la base de nuestra subsistencia, así como del desarrollo económico y social. Los servicios ecosistémicos, por lo tanto, se

definen como los procesos mediante los cuales los ecosistemas soportan y satisfacen la vida del hombre” (Montes, 2007).

Una de las principales funciones de los ecosistemas es la regulación del clima del planeta mediante el almacenamiento de carbono y la eliminación de los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera. Los ecosistemas contribuyen a la regulación de CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través del almacenamiento del carbono en la biomasa y el suelo, siendo quizás éste el más reconocido de todos los servicios de los ecosistemas (IPCC 2006, Stern 2007, Canadell & Raupach 2008, Capoor & Ambrosi 2008). Por tanto, la estimación de biomasa aérea y por consiguiente el CO<sub>2</sub> capturado, es relevante debido a su efecto sobre las condiciones climáticas del planeta puesto que es un gas de larga permanencia (Solomon et al., 2007). Adicionalmente esta estimación y cuantificación es de importancia para la planificación y gestión sostenible de los ecosistemas al permitir caracterizar el papel de la vegetación en el ciclo del carbono, siendo la información espectral una herramienta útil para su determinación aproximada (Marabel-García, 2016).

En los sistemas vegetales, la firma espectral de una planta o cultivo se relaciona directamente con sus características fenológicas, fisiológicas y morfológicas, por lo tanto, una perturbación en la planta reflejara cambios en su reflectancia (Lass & Callihan 1997, Schmidt & Skidmore 2003). Especialmente en la región

espectral comprendida entre 350y 2500 nm, sobre la cual se han desarrollado varios estudios (Smith & Curran 1996, Kokaly & Clark 1999), relacionados con variables biofísicas como la celulosa entorno a los 1215 nm o 2359 (Curran, 1989), o la lignina entorno a los 1660 nm (Thenkabail et al., 2014) las cuales están directamente relacionadas con la biomasa aérea (Marabel-Garcia, 2016).

Para el caso específico de este trabajo, se tenía como objetivo estimar el contenido de carbono (C) capturado por la biomasa y el suelo por los cultivos de café (*Coffea arabica* L.), maíz tradicional (*Zea maíz* L.) y soya (*Glycine max* L.), haciendo uso de imágenes de satélite, posibilitando la incorporación de elementos de competitividad ambiental y económica en la zonificación de la aptitud de uso, pues ello permite articular estos estudios a los esfuerzos nacionales e internacionales de reducción de gases de efecto invernadero, los cuales pretenden disminuir la huella de carbono.

Adicionalmente, existe una estrecha relación entre el ciclo del C y el del nitrógeno (N), debido a su acumulación en la materia orgánica del suelo (Neff et al. 2002, Conant et al. 2005). La dinámica de estos elementos resume e integra el funcionamiento ecosistémico en gran proporción (Piñeiro, 2006), siendo el nitrógeno el nutriente que comúnmente limita la productividad de los ecosistemas terrestres (Burke et al. 1998, Johnson & Matchett 2001).

La estimación del aporte potencial de nitrógeno en los agroecosistemas se evaluó para el cultivo de soya (*Glycine max* L.), cuya planta presenta una alta acumulación de nitrógeno de forma sostenida en todo su ciclo vegetativo (García & Ciampitti, 2009), debido a la relación simbiótica con bacterias de los

géneros *Bradyrhizobium spp.* y *Sinorhizobium spp.* pertenecientes a la familia Rhizobiaceae, las cuales le permiten la formación de nódulos que aumentan su capacidad de fijación de nitrógeno (González, 2015).

Por consiguiente, los objetivos de la presente investigación se enfocan en la espacialización de los efectos ambientales de las actividades agropecuarias sobre la dinámica de la captura o emisión de CO<sub>2</sub> para los cultivos de café, soya y maíz tradicional, realizando un balance por las mismas acciones sobre la cobertura actual, haciendo uso de técnicas de sensores remotos y modelamiento espacial. Adicionalmente se busca la identificación del impacto del cultivo de soya sobre el potencial de absorción de nitrógeno atmosférico comparado con la cobertura actual, a través de la utilización del NDVI azul de imágenes MODIS, como un indicador de la concentración de nitrógeno. A partir de la información obtenida, por último, se busca desarrollar los mapas de aptitud para el establecimiento de los cultivos de café, maíz tradicional y soya, según la prestación de estos bienes y servicios ecosistémicos para la zona continental colombiana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo desarrollado para este trabajo se fundamenta en la estimación del contenido de carbono, calculado como el balance resultante entre captura y emisiones de CO<sub>2</sub> que se generarían por el desarrollo de cultivos de café y maíz tradicional en diferentes zonas con aptitud potencial para su implementación en el país. Así como, la estimación y la realización del balance entre el nitrógeno acumulado por el suelo y la potencial absorción y fijación biológica de

nitrógeno, a través de los mecanismos simbióticos generados entre las bacterias de la familia Rhizobiaceae y las plantas de soya cultivada.

### 1. *Estimación del contenido de carbono:*

De acuerdo con Bolaños et al., (2017) y lo planteado por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, en los ecosistemas el carbono se distribuye en cinco depósitos: biomasa viva por encima del suelo (biomasa aérea), biomasa viva por debajo del suelo (biomasa subterránea), madera muerta sobre el suelo, mantillo y carbono orgánico del suelo” (IPCC 2006).

#### 1.1. *Contenido estimado de carbono en la biomasa aérea, subterránea y el suelo:*

La metodología empleada para la estimación y el balance de carbono (Figura 1), se fundamentó en la utilización de técnicas de interpretación de sensores remotos (imágenes MODIS), y modelamiento espacial en ArcGIS 10.4.1. Para ello inicialmente, se estimó la cantidad de carbono contenido en la biomasa vegetal aérea y subterránea de las diferentes coberturas vegetales del país (UPRA 2021, Páramo & Garcés 2018), y del carbono almacenado en el suelo (Gardi et al., 2014).

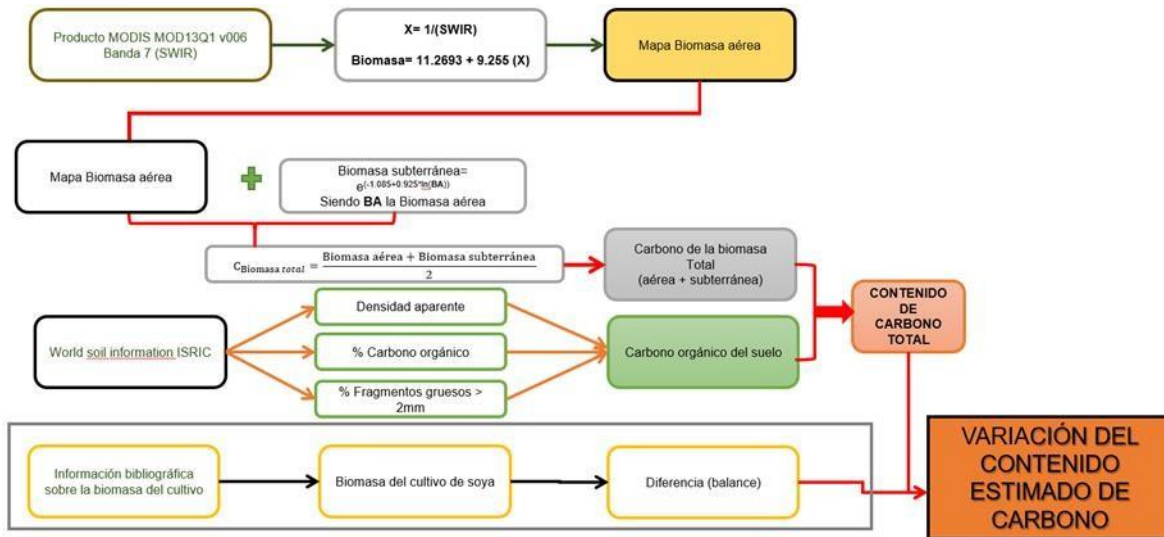
Para la estimación de la biomasa vegetal aérea se partió del producto MODIS (MOD13Q1 v006 banda 7 SWIR) de la plataforma modis.gsfc.nasa.com, cuyas

imágenes fueron sometidas a correcciones radiométricas y de georreferenciación necesarias. Una vez obtenida y ajustada la imagen referenciada, se procedió a la estimación de los valores de carbono equivalente de la biomasa de las coberturas actuales y de los tipos de suelo del país.

La estimación de la biomasa vegetal aérea (BA) se realizó a partir de la ecuación propuesta por Páramo (2011), obtenida de la regresión de datos de biomasa reportados para diferentes tipos de vegetación de Colombia y los valores de reflectancia de la banda SWIR, con un R2 de 0.92:

$$\text{Biomasa (BA)} = 11.2693 + 9.255 (X)$$

Donde X corresponde a la inversa de la banda 7 de imágenes MODIS, definida por el rango del espectro electromagnético de infrarrojo de onda corta (SWIR), teniendo en cuenta que la banda SWIR (2105 a 2155 nm) responde a la detección de nitrógeno, factores de estrés hídrico y biomasa debido a su relación con la absorción de lignina y celulosa (Mao et al., 2022).



**Figura 1.** Diagrama de la metodología empleada para la estimación del balance del contenido estimado de carbono

La estimación de la biomasa subterránea se efectúa de acuerdo con los fundamentos planteados por Cairns *et al.* (1997) y Brown & Lugo (1992), según la siguiente ecuación:

$$\text{Biomasa vegetal subterránea} = e^{(-1,085 + 0,925 \times \ln(BA))}$$

Donde BA corresponde a la Biomasa aérea (ton/año) de las coberturas

De igual manera, se calculó el mapa de carbono en biomasa subterránea de acuerdo con IPCC (2006), mediante la ecuación:

$$C(\text{biomasa subterránea}) = \text{Biomasa subterránea} / 2$$

Posteriormente, mediante la suma de los mapas obtenidos de carbono en biomasa

aérea y de carbono en biomasa subterránea, se calculó el mapa de carbono total contenido en la biomasa.

El contenido de carbono en el suelo se estimó mediante modelamiento espacial (álgebra de mapas) a partir de la información suministrada por ISRIC Soil World information, (2015), relacionada con las capas de porcentaje de C orgánico en el suelo, densidad aparente y porcentaje de fragmentos de más de 2 mm (organic carbon, bulk density, coarse fragments > 2 mm), a 30 cm de profundidad, aplicando la ecuación propuesta por Gardi *et al.*, (2014):

$$\text{Carbono orgánico suelo} = \% \text{ Carbono orgánico} \times \text{densidad aparente} \times \text{profundidad}(0,3 \text{ m}) \times (1 - \% \text{ fragmentos gruesos})$$

Finalmente, el mapa de carbono total se generó a partir de la suma de los mapas de carbono acumulado por la biomasa vegetal aérea y subterránea y el de carbono orgánico en el suelo.

### 1.2. Contenido estimado de carbono capturado por los cultivos (café, maíz tradicional y soya)

La estimación del carbono capturado por los cultivos tratados en el presente trabajo, se llevó a cabo mediante el cálculo de la biomasa producida por una planta (café, soya o maíz según el caso específico), el cual fue llevado a toneladas por hectárea realizando el producto de la biomasa de una planta por la densidad del cultivo en una hectárea; este valor posteriormente se dividió en 2 para así obtener el carbono almacenado en una hectárea por el cultivo, según lo indicado por el IPCC (2006).

Para el caso específico del café, se estima que las toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente capturado por hectárea del cultivo de café de acuerdo con lo reportado por Arias *et al.*, (2013), es de aproximadamente 184.24 CO<sub>2</sub> eq t/ha/año, para una densidad de siembra de 5232 plantas/ha con un ciclo de 6 años. Para maíz tradicional se estimó según reportes de UPME *et al.* (SF) unos valores de biomasa entre 3.32 y 9.08 ton/ha, según el departamento en el cual se cultiva (Tabla 1), lo cual corresponde a un contenido que varía entre 1.66 y 4.54 toneladas de C equivalente, según el área geográfica de ubicación de los cultivos. Finalmente, para soya se estima una biomasa por hectárea del cultivo correspondiente a 3.47 t/ha/año (Barrios *et al.*, 2014) y el carbono capturado en t/ha/año asociado a 1.735 t/ha/año.

Tabla 1. Biomasa por hectárea y carbono capturado en t/ha/año, asociado al cultivo de maíz para cada departamento de Colombia. (Fuente: UPME *et al.* SF).

Departamento	Área sembrada	Cantidad de residuo (t/año)	producción frutos t/ha/año	Cantidad de residuo (t/ha/año)	Biomasa Total (t/ha/año)	Carbono capturado (t/ha/año)
Antioquia	50079	128612	2	2.57	4.57	2.28
Atlántico	11584	28091	2	2.42	4.42	2.21
Bolívar	78093	218782	2	2.80	4.80	2.40
Boyacá	15181	32638	2	2.15	4.15	2.07
Caldas	3017	12483	2	4.14	6.14	3.07
Caquetá	7410	9632	2	1.30	3.30	1.65
Cauca	7540	19290	2	2.56	4.56	2.28
Cesar	52455	146078	2	2.78	4.78	2.39
Córdoba	70741	292420	2	4.13	6.13	3.07
Cundinamarca	27635	88184	2	3.19	5.19	2.60
Chocó	8445	19766	2	2.34	4.34	2.17
Huila	29749	101608	2	3.42	5.42	2.71
La Guajira	13279	27761	2	2.09	4.09	2.05
Magdalena	29618	46907	2	1.58	3.58	1.79

Meta	22565	110473	2	4.90	6.90	3.45
Nariño	18140	39988	2	2.20	4.20	2.10
Norte de Santander	9468	18038	2	1.91	3.91	1.95
Quindío	1532	3871	2	2.53	4.53	2.26
Risaralda	2459	13101	2	5.33	7.33	3.66
Santander	24645	88004	2	3.57	5.57	2.79
Sucre	19348	55209	2	2.85	4.85	2.43
Tolima	24569	117654	2	4.79	6.79	3.39
Valle del Cauca	31568	223472	2	7.08	9.08	4.54
Arauca	16765	40517	2	2.42	4.42	2.21
Casanare	3224	7720	2	2.39	4.39	2.20
Putumayo	16994	28921	2	1.70	3.70	1.85
Guaviare	7689	15424	2	2.01	4.01	2.00
Guainía	46	98	2	2.13	4.13	2.07
Vaupés	610	807	2	1.32	3.32	1.66
Vichada	335	929	2	2.77	4.77	2.39

### 1.3. Balance entre el contenido estimado de carbono capturado por los cultivos (café, maíz tradicional y soya) y el carbono capturado por la biomasa y los suelos y definición de rangos de aptitud

El balance del contenido de carbono capturado por la biomasa de las coberturas actuales y los suelos vs. la captura estimada de cada uno de los cultivos evaluados se llevó a cabo con el valor de referencia estimado de carbono capturado (valor del píxel o de la unidad de análisis espacial), con el fin de obtener el mapa de diferencia en carbono total frente al cultivo, mediante la siguiente ecuación aplicada espacialmente a través del álgebra de mapas:

$$\Delta CEC = \frac{C_{COBERTURA} - C_{Cultivo}}{C_{COBERTURA}}$$

De esta forma, dependiendo de la cobertura existente, el establecimiento de los cultivos puede representar una mayor cantidad de carbono almacenado en comparación con la cobertura actual, en cuyo caso el reemplazo representa una ganancia en términos de la captura (t de carbono/ha año). En otras circunstancias

de cobertura actual, el reemplazo puede representar una cantidad capturada semejante o incluso, en otras condiciones, puede significar una menor cantidad de carbono, en cuyo caso se constituye una pérdida en la acumulación neta por modificación de la cobertura, lo cual se traduce en emisiones de carbono a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>.

Por último, la definición de las categorías de aptitud para los cultivos de café, maíz tradicional y soya (Tabla 2) se basó en el método de optimización de Jenks, también conocido como cortes naturales de Jenks o "Natural breaks", cuyas clases se basan en agrupaciones naturales inherentes a los datos, en donde cada clase se crea a través de la agrupación de valores similares maximizando las diferencias entre clases (Smith et al. 2018).

Tabla 2. Categorías de aptitud asociadas a la retención de carbono para los cultivos de café, maíz tradicional y soya.

Descripción	Variación del contenido estimado de carbono (%)	Aptitud
El cultivo es sumidero de carbono	< 0	Alta (A1)
El cultivo está en equilibrio entre emisión y captura de carbono	0-10	Media (A2)
El cultivo es fuente de emisión de carbono	> 10	Baja (A3)

## 2. *Potencial de aporte de nitrógeno a los agroecosistemas por el cultivo de soya*

La producción de cultivos se encuentra fuertemente ligada al nitrógeno, debido a que la cantidad de este elemento en las hojas responde a la intensidad del proceso fotosintético (Salvagiotti et al., 2009). Por tanto, este elemento es un limitante en el crecimiento y rendimiento de diversos agroecosistemas (Gordillo, 2018). La medición de nitrógeno en las diferentes coberturas requiere de análisis químicos destructivos que emplean materia orgánica proveniente de las plantas (Balanzategui, 2018). En suelos es también un elemento difícil de monitorear debido a su alta movilidad (Jaramillo, 2002). Teniendo en cuenta que el contenido de nitrógeno se relaciona fuertemente con la tasa de fotosíntesis (Cabrera-Bosquet, 2007), y esta responde a la captura de luz por el dosel y el contenido de este elemento en la hoja (Lemaire et al., 2007), el uso de índices de vegetación basados en análisis espectral de imágenes de satélite permite analizar la concentración de nitrógeno en la cobertura actual y la variación de este por la entrada de un cultivo como la soya.

Los índices de vegetación son calculados a partir de valores de reflectancia

espectral de distintas longitudes de onda, con el fin de estimar el crecimiento de plantas (Ruiz et al., 2011). Comúnmente estas repuestas espectrales son evaluadas en el rango espectral visible e infrarrojo cercano (NIR), especialmente en el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que se basa en las bandas del rojo y NIR, utilizado para la evaluación indirecta de la biomasa y rendimiento de cultivos (Prasad et al., 2007). EINDVI azul ha sido probado por Gordillo (2018), como un indicador de la concentración de nitrógeno en plantas, facilitando así el monitoreo de este elemento en los diferentes ecosistemas.

El modelo utilizado para la estimación del potencial de aporte de nitrógeno (Figura 2), se basó en el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada azul (NDVI Azul), haciendo uso de la fórmula propuesta por Gordillo (2018):

$$NDVI\ Azul = \frac{(NIR - BLUE)}{(NIR + BLUE)}$$

Basados en las imágenes MODIS que cubren el territorio nacional, asociadas al producto MYD09A1, se realizó un mosaico de las bandas 2 (NIR) y 3 (Azul) correspondientes a



marzo de 2021 y se aplicó mediante la utilización de la calculadora raster del software ArcGis 10.4.1, la ecuación para el cálculo del NDVI azul:

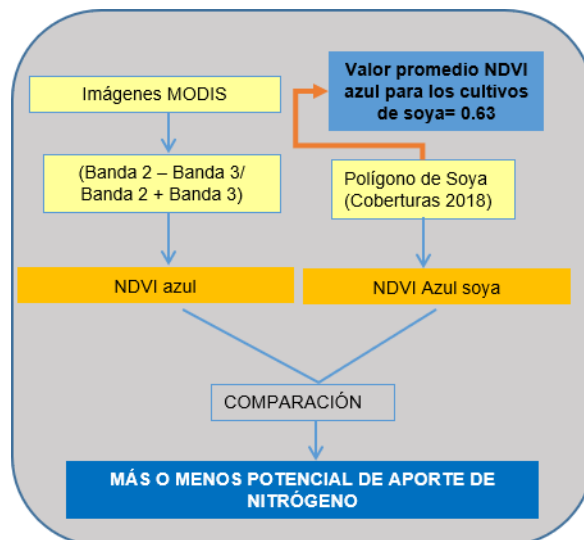
$$NDVI\ Azul = \frac{(Banda\ 2 - Banda\ 3)}{(Banda\ 2 + Banda\ 3)}$$

Una vez calculado el índice, se determinó el valor de NDVI azul para el cultivo de soya, utilizando como áreas de entrenamiento, el promedio de reflectancia al NDVI azul de las áreas con cultivos de soya presentes en la capa de coberturas Corine Land Cover (IDEAM, 2021). A partir de este ejercicio, se obtuvo un valor de 0.63. Posteriormente se realizó la diferencia entre el valor de NDVI Azul total y el NDVI para el cultivo de soya, a fin de identificar el impacto del

cultivo sobre el potencial de nitrógeno de la cobertura actual, es decir, identificar las áreas del territorio nacional en el cual un cultivo de soya podría mejorar la absorción de nitrógeno atmosférico por la relación de simbiosis con organismos bacterianos de la familia Rhizobiaceae, o por el contrario, aquellas áreas en donde podría verse comprometida la cantidad de nitrógeno

absorbida.

Finalmente, se realizó una reclasificación de los resultados a partir de la definición de las categorías de aptitud con base al método de optimización de Jenks o "Natural breaks" (Smith et al. 2018) definidos en ArcGis 10.4.1.



**Figura 2.** Diagrama metodológico de la estimación del balance de absorción de nitrógeno del cultivo de la soya vs. las coberturas actuales

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*Contenido estimado de carbono capturado por los cultivos (café, maíz tradicional y soya)*

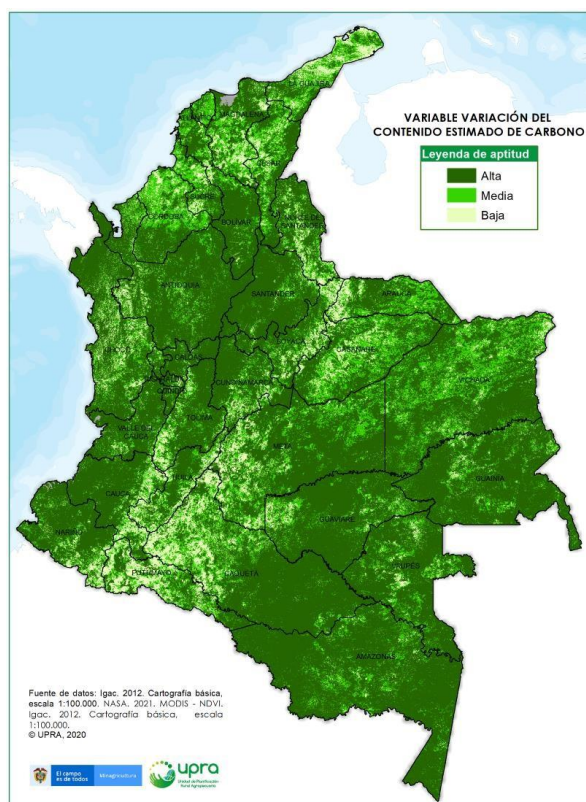
La figura 3, permite observar el carbono de la biomasa total el cual incluye la suma

del carbono contenido en la biomasa aérea de las coberturas actuales, la biomasa subterránea y el carbono del suelo. Es decir, nos refleja

el estado actual del carbono en el territorio nacional. De acuerdo con Crist & Cicone (1984), el uso de la banda SWIR

permite la discriminación de coberturas terrestres, y su producción neta de biomasa (Xiao et al., 2019), debido a que en el rango espectral de 2000 a 2200 nm la materia orgánica induce cambios en la

forma espectral y valores de absorción, relacionados con las vibraciones de los enlaces OH y CH vinculados a la lignina y la celulosa (Ben-Dor et al., 1997), es decir la banda SWIR refleja la absorción de lignina y celulosa (Mao et al., 2022).



**Figura 3.** Carbono de la biomasa total expresado en categorías de aptitud.

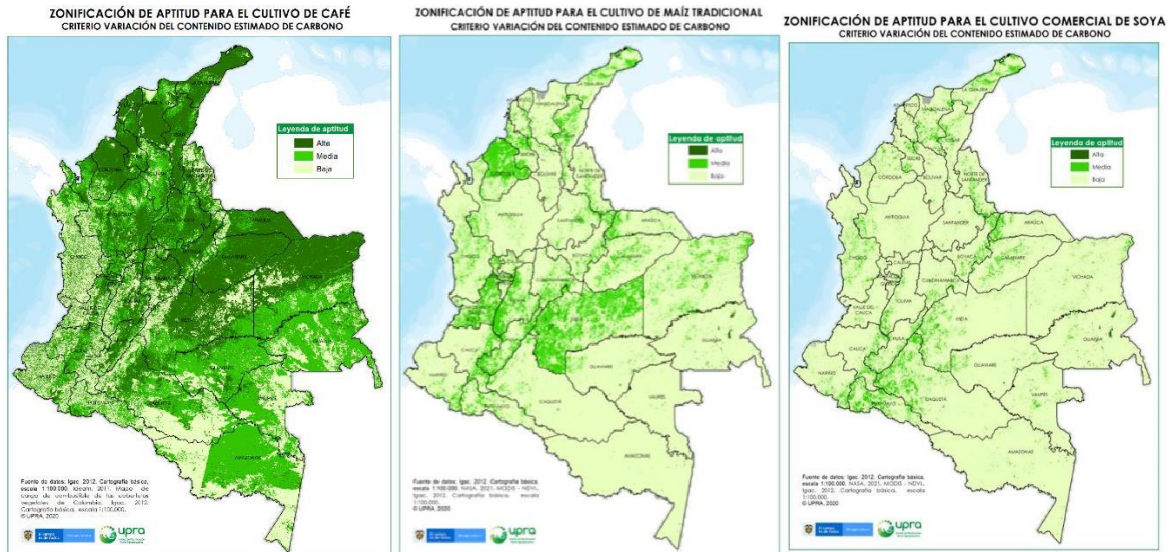
La repuesta del modelo de captura de carbono por parte de las coberturas vegetales que cubren el territorio nacional observada en la Figura 3, indica que las zonas con mayor concentración de carbono se localizan en la amazonia, pacifico, departamentos de Cundinamarca, Tolima, Santander, Antioquia y Bolívar, evidenciando que no solo las coberturas naturales presentan una retención considerable de carbono, las zonas de mayor actividad agrícola también aportan en esta retención, puesto que los suelos agrícolas tienen un potencial considerable para almacenar carbono adicional (Wiesmeier et al.,

2013), debido a que las tierras bajo conversión de diferentes cultivos favorecen el secuestro de carbono por la mecanización de los suelos que permite reactivar la actividad de las bacterias circundantes que aprovechan el carbono liberado, por tanto, la actividad agrícola favorece la variación de los compuestos orgánicos que llegan al suelo (Kirsten et al., 2021).

La evaluación de la “Variación del Contenido Estimado de Carbono”, dentro de la zonificación de la aptitud, se fundamenta en el cálculo y la cartografía del balance entre el contenido de carbono estimado en la biomasa (aérea y subterránea) de la cobertura vegetal actual y el suelo para usos agrícolas y de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub>, en lo referente a actividades pecuarias frente a un potencial cambio de las coberturas actuales para el establecimiento de nuevas actividades agropecuarias. Esto permite determinar la sostenibilidad ambiental de un territorio en términos de la prestación del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono.

Ahora bien, la entrada de cultivos como café, maíz tradicional y soya (Figura 4), podría generar una emisión de carbono a la atmosfera por pérdida en la

acumulación neta debida a la modificación de la cobertura, especialmente cultivos como maíz tradicional y soya, que generan un menor aporte de biomasa, afectando claramente las áreas en donde se localiza vegetación natural de tipo arbóreo y arbustivo. Por el contrario, un cultivo de porte arbustivo como el café, genera un impacto menor sobre la retención de carbono actual, observándose incluso un mayor secuestro en zonas de la costa caribe y la Orinoquia. De acuerdo con Lapeyre et al. (2004), los sistemas permanentes y con crecimiento mayor presentan los valores más altos de acumulación de carbono, cuyos valores se van a ver reducidos drásticamente con la llegada de cultivos anuales que localizados en las mismas áreas aportarían valores muy bajos de captura.



**Figura 4.** variación del contenido estimado de carbono para los cultivos de café, maíz tradicional y soya.

Con base en lo anterior, uno de los ejes de atención corresponde a los efectos ambientales de las actividades agropecuarias sobre la dinámica de captura y emisión de carbono; y de ahí la importancia de incorporar la variación del contenido estimado de carbono en los procesos de zonificación de aptitud para el establecimiento de los cultivos comerciales y de actividades pecuarias.

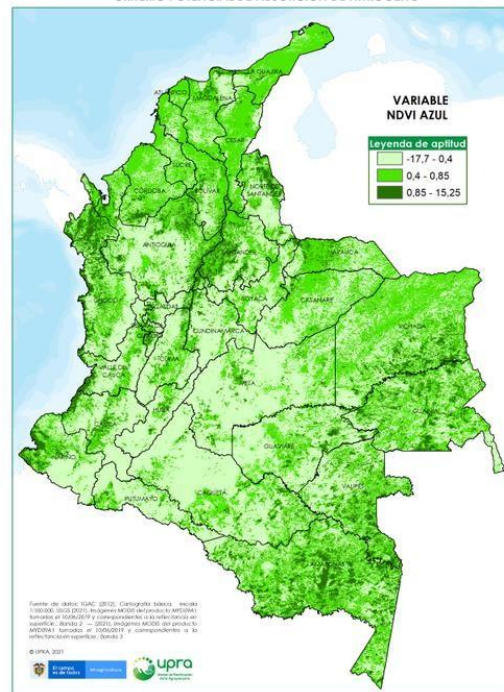
#### *Potencial de aporte de nitrógeno a los agroecosistemas por el cultivo de soya*

La figura 5 evidencia el valor del NDVI azul de las coberturas actuales, el cual de acuerdo con Sulik & Long (2016), es un indicador del contenido de nitrógeno basado en la respuesta de la clorofila, en donde las regiones con valores más bajos se localizan en los departamentos de Nariño, Putumayo, Meta, Caquetá, Cundinamarca, Caldas y parte de Antioquia y Valle del Cauca, y en general se observan valores medios en el restante territorio nacional, solo en

algunas zonas de Amazonia, Vichada, Guainía, Choco y Santander se observan los valores más altos. De acuerdo con Gordillo (2018), la absorción de nitrógeno por parte de la cobertura vegetal se interpreta en relación con su masa, presentándose una disminución de la concentración de este elemento en la planta al aumentar la masa (Lemaire & Meynard, 1997). Para Farrugia et al. (2004), el contenido de nitrógeno en la capa superior del dosel es más estable (Gates 1980 Citado por Gordillo, 2018), lo que explica los valores más altos en algunas áreas boscosas.

Es importante señalar que la sensibilidad de una variable como el nitrógeno dificulta la certeza del método, puesto que este elemento presenta una alta movilidad y volatilidad, dificultando su monitoreo (Jaramillo, 2002), adicionalmente es una variable que presenta una sensibilidad alta a la presencia de nubosidad, dificultando la determinación del NDVI azul.

ZONIFICACIÓN DE APTITUD PARA EL CULTIVO COMERCIAL DE SOYA  
CRITERIO POTENCIAL DE ABSORCIÓN DE NITRÓGENO



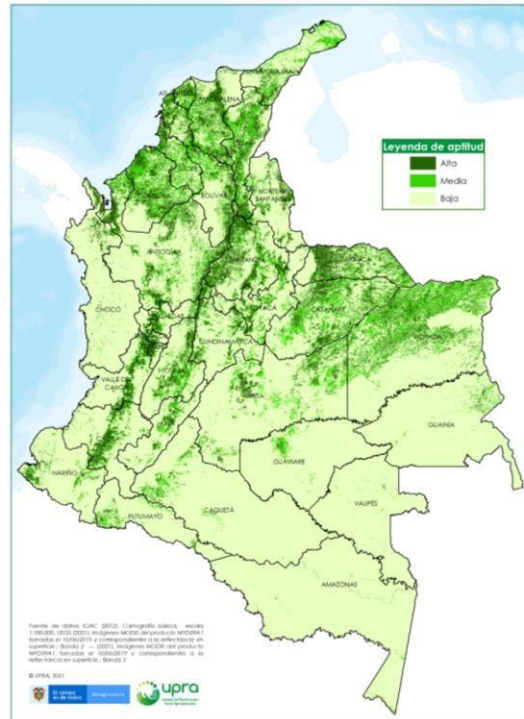
**Figura 5.** NDVI azul de las coberturas vegetales.

El reemplazo de las coberturas actuales por un cultivo de soya, observado en la figura 6, señala una mejora en el aporte de nitrógeno en la costa caribe, Valles interandinos, Casanare, Arauca y Vichada, sin embargo, es importante aclarar que las áreas por fuera de la frontera agrícola definida por la UPRA (2021), se califican con aptitud baja como principio de precaución, a fin de evitar incentivar el cultivo en zonas con coberturas boscosas naturales.

De acuerdo con García & Ciampitti (2009), la soya tiene una alta acumulación de nitrógeno que se mantiene constante en todo su ciclo vegetativo, debido al aumento de la capacidad de fijación del elemento que otorgan las bacterias de la familia Rhizobiaceae (González, 2015) como ocurre en un gran número de especies pertenecientes a la familia Fabaceae, lo cual se refleja en la Figura 6, en donde se observan las zonas que podrían tener una mejora en el aporte de nitrógeno por la entrada de este cultivo. Johnson & Matchett (2001) señalan la importancia del nitrógeno en la productividad de los ecosistemas, puesto que responde a la velocidad de crecimiento de la planta

(Truong, 2017), por lo cual frecuentemente se hace uso de fertilizantes que suplan con la necesidad de este elemento y la constante preocupación por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados que representan una recurrente amenaza a los ecosistemas (Salvador et al., 2020), lleva a pensar en estrategias que permitan minimizar este tipo de prácticas y sus efectos negativos, como la implementación de cultivos como la soya y el monitoreo del contenido de nitrógeno de la cobertura vegetal, el cual puede facilitarse mediante índices espectrales sensibles a la clorofila que permiten estimar los niveles de nitrógeno (Balanzategui, 2018), como lo es el NDVI azul.

ZONIFICACIÓN DE APTITUD PARA EL CULTIVO COMERCIAL DE SOYA  
CRITERIO POTENCIAL DE APOORTE DE NITRÓGENO A LOS AGROECOSISTEMAS



**Figura 6.** Diferencia de NDVI azul total Vs. NDVI promedio del cultivo de Soya.

## CONCLUSIONES

Cultivos como maíz tradicional y Soya, en relación a la variación del contenido

estimado de carbono deben restringirse al interior de la frontera agrícola, puesto que su inclusión en áreas con presencia de coberturas boscosas naturales puede generar una emisión de carbono en forma

de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. Es importante pensar este tipo de cultivos como arreglos agroforestales con el fin de incentivar la captura de carbono.

El cultivo de café, por el contrario, mejora la captura de carbono en zonas asociadas a la costa caribe y Orinoquia, debido a su porte arbustivo y adicionalmente si el cultivo se maneja como un arreglo agroforestal, podría mejorar considerablemente el secuestro de CO<sub>2</sub> atmosférico e incentivar a la mitigación al cambio climático.

Cultivos como soya, a pesar de no presentar un aporte considerable en el secuestro de carbono, es evidente la importancia del cultivo para el aporte de nitrógeno a los agroecosistemas, ayudando a la reducción de fertilizantes nitrogenados.

Las metodologías propuestas otorgan un acercamiento a las cantidades de promedio de nitrógeno y carbono de la cobertura vegetal nacional y permiten estimar escenarios futuros de actividades agrícolas sobre los servicios ecosistémicos.

## AGRADECIMIENTO

Los autores expresamos nuestro agradecimiento especial a los Ingenieros Forestales Jaime Unriza y Alejandra Castrillón de la oficina TIC de la UPRA, por su gran colaboración en el modelamiento espacial y la producción cartográfica de este artículo.

## REFERENCIAS

Arias, J., Riaño, N. & M. Aristizábal. 2013. Balance de energía basado en la contabilidad del carbono en tres sistemas productivos cafeteros. *Cenicafé*, 64(2):7-16. 2013.

Balanzategui, J. 2018. Una herramienta para la estimación de concentración de Nitrógeno a partir de imágenes Sentinel. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de

Grado, [E.T.S. de Ingenieros Informáticos \(UPM\)](https://oa.upm.es/51598/), Madrid, España.  
<https://oa.upm.es/51598/>

Barrios, M., Buján, A., Debelis, S., Sokolowski, A., Blasón, A., Rodríguez, H., López, S., Grazia, J., Mazo, C. y M. Gagey. 2014. Relación de raíz/biomasa total de Soja ( *Glycine max* ) en dos sistemas de labranza. *Terra Latinoam* vol.32 no.3 Chapingo jul./sep. 2014

Ben-Dor, E., Inbar, Y. & Y. Chen. 1997. The reflectance spectra of organic matter in the visible near infrared and short wave infrared region (400–2,500 nm) during a control decomposition process *Remote Sens. Environ.*, 61 (1997), pp. 1-15

Bolaños, Y; M, Bolaños y Paz, F. 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoam* vol.35 no.1 Chapingo ene./mar. 2017

Brown, S. & Lugo, A. (1992). Above ground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. En: *Interciencia* 17:8-18.

Burke, I. C., Lauenroth, W., Vinton, M., Hook, P., Kelly, R., Epstein, H., Aguiar, M., Robles, M., Aguilera, M., Murphy, K. & R. A. Gill. 1998. Plant-soil interactions in temperate grasslands. *Biogeochemistry* 42:121-143.



Cabrera-Bosquet, L. (2007) El efecto combinado del déficit hídrico constante y el suministro de nitrógeno en WUE, NUE y  $\Delta 13 C$  en plantas de maceta de trigo duro. *Annals of applied biology*. Vol.151. No.3 . . <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00195.x>

Cairns, M.; Brown, S.; Helmer, E. & Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. En: *Oecologia* 111:1-11. EUA: Springer-Verlag.

Canadell, J. & Raupach, M. (2008). Managing Forests for Climate Change Mitigation. En: *Science* 320:1456-1457.

Capoor, K. & Ambrosi, P. (2008). *State and trends of the carbon market 2008*. Washington, D.C.: World Bank Institute.

Conant, R. T., Paustian, K., Del Grosso, S. & W. J. Parton. 2005. Nitrogen pools and fluxes in grassland soils sequestering carbon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71:239-248.

Curran, P. 1989. Remote sensing of foliar chemistry: review *Remote Sens. Environ.*, 30 (1989), pp. 271-278.

Eastman, J. R., Weigen, J., Kyem, P., & Toledano, J. (1995). Raster Procedures for Multi- Criteria/Multi Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Massachusetts: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*.

Farrugia, A., Gastal, F. & D. Scholefield. 2004. Assessment of nitrogen status of grassland. *Grass Forage Sci.* 59, 113-120.

FAO. 1976. A framework for land evaluation. (FAO, Ed.) Obtenido de FAO AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Soils bulletin* 32. Rome

1976:

<http://www.fao.org/3/x5310e/x5310e00.htm>

FAO.2019. Global Soil Organic Carbon Map. GLOSIIS - GSOCmap (v1.5.0)

García, F. & I. Ciampitti I. 2009. La nutrición del cultivo de soja. In 'Manual de manejo del cultivo de soja' (Eds. Garcia F.O, Ciampitti I.A. & Baigorri H.E.) pp. 33. Argentina

Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñoz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas. 2014. Atlas de Suelos de América Latina y el Caribe. Dirección General de Cooperación Internacional y Desarrollo (Comisión Europea), FAO Fiat Panis, Instituto de Medio Ambiente y Sostenibilidad (Centro Común de Investigación).

<https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/7e06def6-10cf-4c8f-90f4-b981f410ef68>

González, N. 2015. Fijación de nitrógeno en soja, uso de inoculantes. Apuntes de cátedra, Cereales y Oleaginosas.

Gordillo, V. 2018. Evaluación del estado del nitrógeno y estimación de biomasa en el cultivo de trigo, usando sensores remotos y vehículos aéreos no tripulados (UAV). Tesis de doctorado. Colegio de postgraduados. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Campus Montecillo. Postgrado en

Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, México.

IDEAM. (2021). *Mapa nacional de cobertura de la tierra, imágenes 2018-2020, escala 1:100.000*. Bogotá: Ideam.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Vol. 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Eggleston, H.; Buendía, L.; Miwa, K.; Ngara T. & Tanabe K. (Eds). Japón: IGES. Recuperado de <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>>.

ISRIC - World Soil Information (2015). *SoilGrids: An Automated System for Global Soil Mapping*. Recuperado de: <<http://soilgrids1km.isric.org>>.

Jaramillo, D. 2002. Introducción a la Ciencia del suelo. Universidad Nacional De Colombia. Facultad De Ciencias. Medellín.

Johnson, L. C. & J. R. Matchett. 2001. Fire and grazing regulate belowground processes in tallgrass prairie. *Ecology* 82:3377-3389.

Kirsten, M., Mikkuta, R., Vogel, C., Thompson, A., Mueller, C., Kimaro, D., Bergsma, H., Feger, K. & K. Kalbitz. 2021. Iron oxides and aluminous clays selectively control soil carbon storage and stability in the humid tropics. *Scientific Reports* | (2021) 11:5076

Kokaly, R. F. & R. N. Clark. 1999. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 67, 267–287.

Lapeyre, T., Alegre, J. & L. Arévalo.

2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecol. apl.*, Lima, v. 3, n. 1-2, p. 35-44, enero 2004.

Lass, L. W. & R. H. Callihan. 1997. The effect of phenological stage on detectability of yellow hawkweed (*Heiracium pratense*) and oxeye daisy (*Chrysanthemum leucanthemum*) with remote multispectral digital imagery. *Weed Tech.* 11:248 -256

Lemaire, G., Oosterom, E., Sheehy, J., Jeuffroy, M.H., Massignam, A. & L. Rossato. 2007. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crop. Res.* 100, 91–106.6

Lemaire, G. & J. Meynard. 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In: G. Lemaire (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 45–5

Marabel-Garcia, M. 2016. Estimación de la biomasa aérea de herbáceas con sensores aerotransportados de alta resolución. Tesis de doctorado. Universidad de León. España.

Mao, P., Ding, J., Jiang, B., Qin, L. & G. Yu. 2022. How can UAV bridge the gap between ground and satellite observations for quantifying the biomass of desert shrub community?. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 192 (2022) 361–376.

MODIS WEB. (2021). [modis.gsfc.nasa.com](http://modis.gsfc.nasa.com)

Montes, C. 2007. Del desarrollo sostenible a los servicios de los ecosistemas. *Revista Ecosistemas* 16 (3): 1-3.

Neff, J. C., Townsend, A., Gleixner, G.,

Lehman, S., Turnbull, J. & W. D. Bowman. 2002. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature* 419:915 - 917.

Páramo, G & E. Garcés. 2018. BALANCE DEL CONTENIDO ESTIMADO DE CARBONO EN LAS ZONAS DE APTITUD PARA EL CULTIVO DE LA PAPA EN COLOMBIA, Revista Papa. No. 46. Diciembre. Pp. 28-32. FEDEPAPA. Bogotá

Páramo, G. 2011. Susceptibilidad de las coberturas vegetales de Colombia al fuego. In. Incendios de la cobertura vegetal en Colombia. Tomo I. Alvaro del Campo Parra (Ed). Pp. 73-142. Universidad Autónoma de Occidente, PNUMA, Cali

Piñeiro, G. 2006. Biogeoquímica del carbono y nitrógeno en los pastizales pastoreados del Río de la Plata: Un análisis basado en modelos de simulación, sensores remotos y experimentos a campo. Tesis de doctorado. Escuela Para Graduados "Alberto Soriano". Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

Prasad, B., Carver, B.F., Stone, M.L., Babar, M.A., Raun, W.R. & A. Klatt. 2007. Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under great plains conditions. *Crop Sci.* 47, 1426–1440.

Ruiz, J., Tijerina, L., Mejia, E., Sandoval, M., Sánchez, P., Vaquera, H. & M. Colinas. 2011. Índices de vegetación para estimar el crecimiento de plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) estresadas por

deficiencia de agua y nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, Volumen 29, número 1, 2011.

Salvagiotti, F., Capurro, J. & J. Enrico. 2009. El manejo de la nutrición nitrogenada en soja. Para Mejorar la producción 42. INTA EEA OLIVEROS. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-nutricion\\_nitrogenada.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-nutricion_nitrogenada.pdf)

Salvador, J., Bolaños, M., Palacios, E., Palacios, L., López, A. & J. Muñoz. 2020. Estimación de la fracción de cobertura vegetal y contenido de nitrógeno del dosel en maíz mediante sensores remotos. *Terra Latinoamericana*, vol. 39, e899, 2021. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Schmidt, K. S. & A. Skidmore. 2003. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 85, pp. 92 - 108.

Smith, G. & P. Curran. 1996. The signal-to-noise ratio (SNR) required for the estimation of foliar biochemical concentrations. *Int. J. Remote Sens.* 17:1031–1058.

Smith, J., Goodchild, M. & P. Longley. 2018. *Geospatial Analysis. A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools.* 6th edition, 2018. Issue version: 2018-2

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton,

R.A. Wood & D. Wratt. 2007. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge y New York: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller ed. Pp, 25.

Stern, N. 2007. *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Inglaterra: Cambridge University Press.

Sulik, John J. & Dan. Long. 2016. Spectral considerations for modeling yield of canola. *Remote Sensing of Environment* 184 (2016) 161–174

Thenkabail, P. S., Gumma, M. K., Teluguntla, P. & I. A. Mohammed. 2014. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation and Agricultural Crops. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 80(8), 697–709.

Truong, K. 2017. The Effects of Nitrogen and Potassium on the Growth of Brassica rapa. *Best Integrated Writing*, Volume 4.

UPME, Universidad Industrial de Santander (UIS) e Ideam. (SF). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Biblioteca digital UPME. Recuperado de: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>>.

UPRA. 2021. Zonificación de aptitud para el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) escala 1:100.000, en Colombia. Memoria técnica. Imprenta Nal. de Colombia. Bogotá

UPRA. 2014. Zonificación para las plantaciones forestales con fines comerciales. Escala 1:100000. Memoria técnica. Imprenta Nal. de Colombia. Bogotá.

Wiesmeier, M., Hubner, R., Barthold, F. ET AL. 2013. Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). *Agriculture Ecosystems & Environment*, 176,39–52

Xiao, J., Chevallier, F., Gomez, C., Guanter, L., Hicke, J., Huete, A., Ichii, K., Ni, W., Pang, Y., Rahman, A., Sun, G., Yuan, W., Zhang, L. & X. Zhang. 2019. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment* 233 (2019) 111383.