UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

IGAC
INSTITUTO GEOGRÁFICO
AGUSTÍN CODAZZI
CIAF Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica

DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

CASO DE ESTUDIO: MUNICIPIO DE PESCA, BOYACÁ

PRESENTADO POR:
CHRISTOPHER PHILIPP EICHHORN
GIZELA ANDREA GUZMAN LUGO
JULIO CESAR HURTADO VASQUEZ

ESPECIALIZACIÓN. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).

CONVENIO INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI Y LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

BOGOTA D.C.

2018

DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES
CASO DE ESTUDIO: MUNICIPIO DE PESCA, BOYACÁ

PRESENTADO POR:
CHRISTOPHER PHILIPP EICHHORN
GIZELA ANDREA GUZMAN LUGO
JULIO CESAR HURTADO VASQUEZ

DIRECTOR:

Mg (c). Oswaldo Ibarra Ortiz

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de:

ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

ESPECIALIZACIÓN. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).
CONVENIO INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI Y LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

BOGOTÁ D.C.

2018

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

(*Especialización en Sistemas de Información Geográfica en convenio con el IGAC*)

FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA: ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN CONVENIO CON EL IGAC- 2018
ACTA DE SUSTENTACIÓN Nº 003

Fecha : 7 Noviembre de 2018

Lugar : CIAF

TRABAJO DE GRADO: METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO EN ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

PRESENTADO POR :

INTEGRANTES	CÓDIGO UD
JULIO CÉSAR HURTADO VÁSQUEZ	20181094028
GIZELA ANDREA GUZMÁN LUGO	20181094042
CHRISTOPHER PHILIPP EICHHORN	20181094036

NOTA : 4.5

CARÁCTER : APROBADO

Docente Evaluador

Director

Docente Evaluador

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 11

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14

3 JUSTIFICACIÓN 16

4 OBJETIVOS 19

4.1 OBJETIVO GENERAL 19

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19

5 MARCO TEÓRICO 20

5.1 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA 20

5.2 CAPTURA DE CARBONO 20

5.3 ANTECEDENTES 20

5.4 ÁREA DEESTUDIO 22

6 METODOLOGÍA 24

6.1 ESTIMACIÓN DE ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN ECOLOGICA 25
6.1.1 Información de entrada 26
6.1.2 Procesos 26

6.2 ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO ACTUAL 27
6.2.1 Procesamiento de imágenes satelitales 27
6.2.2 Calculo de NDVI 29
6.2.3 Clasificación de coberturas supervisada 30
6.2.4 Levantamiento de información de biomasa 31
6.2.5 Regresión matemática de biomasa en bosque natural 34
6.2.6 Calculo de biomasa actual 34
6.2.7 Calculo de captura de carbono 35

6.3 ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO A FUTURO 35
6.3.1 Regresión matemática año vs captura de carbono 35
6.3.2 Estimación de captura de carbono para AIRE 37

7 RESULTADOS 38

7.1 ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN **38**

7.2 ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO ACTUAL **39**
7.2.1 Procesamiento imágenes satelitales 39
7.2.2 Clasificación de coberturas 39
7.2.3 Regresión matemática de biomasa en bosque natural 41
7.2.4 Biomasa actual 43
7.2.5 Captura de carbono actual 43

7.3 PROYECCIÓN DE CAPTURA DE CARBONO **44**
7.3.1 Regresión matemática año vs captura de carbono 44
7.3.2 Proyección de captura de carbono para AIRE 46

8 DISCUSION **47**

9 CONCLUSIONES **51**

10 RECOMENDACIONES **53**

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **54**

ANEXOS **61**

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Frecuencia de métodos usados para la predicción de biomasa superficial. ...22
Ilustración 2. Área de estudio: Municipio de Pesca, Departamento de Boyacá.....23
Ilustración 3. Esquema metodología estimación de captura de carbono en AIRE 24
Ilustración 4. Modelo para la estimación de AIRE.....27
Ilustración 5. Ajuste de contraste.....28
Ilustración 6. Mejoramiento espacial 29
Ilustración 7. Medición de individuos en campo.....33
Ilustración 8. Regresión matemática para estimar biomasa en bosque natural 42
Ilustración 9. Mapa de captura de carbono actual 44
Ilustración 10. Regresión matemática año vs captura de carbono 45
Ilustración 11. Mapa de contenido de carbono por encima del suelo de bosques naturales con muestreo simple. Fuente: Autores.....49
Ilustración 12. Mapa de contenido de carbono por encima del suelo de bosques naturales con muestreo simple. Fuente: Clerici et al. (2016).....49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información entrada estimación de AIRE 26
Tabla 2. Relación de valores de biomasa por cobertura 33
Tabla 3. Áreas de la capa AIRE por municipio 38
Tabla 4. Resultados de comparación-matriz de confusión 40
Tabla 5. Grado de acuerdo del Índice Kappa.....40
Tabla 6. Relación biomasa- NDVI.....41
Tabla 7. RMSE datos biomasa bosque natural 42
Tabla 8. Biomasa actual por cobertura 43
Tabla 9. Resultados de biomasa y carbono de acuerdo a la edad de crecimiento 45
Tabla 10. Captura de carbono a futuro de las AIRE.....46

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Parcelas de campo 61
Anexo 2. Áreas restauradas en ecosistemas boscosas.....62
Anexo3. Áreas ideales de restauración ecológica en Boyacá 63
Anexo 4. Áreas ideales de restauración ecológica en Pesca, Boyacá.....64
Anexo 5. Mosaico del municipio de Pesca, Boyacá 65
Anexo 6. NDVI del Municipio de Pesca, Boyacá 66
Anexo 7. Clasificación supervisada de coberturas del Municipio de Pesca, Boyacá 67
Anexo 8. Matriz de confusión, clasificación de coberturas 68
Anexo 9. Contenido de biomasa área actual.....69
Anexo 10. Captura de carbono actual.....70
Anexo 11. Captura de carbono estimado en 5 años.....71
Anexo 12. Captura de carbono estimado en 10 años 72
Anexo 13. Captura de carbono estimado en 15 años 73
Anexo 14. Captura de carbono estimado en 20 años 74
Anexo 15. Ficha técnica imágenes PlanetScope 75
Anexo 16. Ficha técnica imágenes Landsat 76

SIGLAS ACRONIMOS Y CONVENCIONES

AIRE: Áreas Ideales de Restauración Ecológica

AFOLU: Agriculture Forestry and Other Land Use

BA: Biomasa Aérea

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

EICDGB: Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GPS: Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System)

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)

IRC: Infrarrojo Cercano

LULUCF: Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) (Land Use, Land Use change and Forestry)

MSAVI: Índice de vegetación modificado ajustado al suelo (Modified soil adjusted vegetation index)

ND: Niveles Digitales

NDVI: Índice de vegetación normalizado (Normalized Difference Vegetation Index)

NCD: Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC por sus siglas en inglés)

PNR: Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas

PSA: Pagos por Servicios Ambientales

REDD: Reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques

REAA: Registro único de Ecosistemas y Áreas Ambientales

RMSE: Error cuadrático medio (Root Mean Square Error)

RVI: Ratio vegetation index

1 INTRODUCCIÓN

La destrucción de los bosques ha recibido atención mundial debido a que estas coberturas tienen un papel importante en términos ecológicos, diversidad en funciones que proveen y, sobretodo, la incesante amenaza a su existencia, con efectos directos sobre las emisiones netas de carbono debidas a la deforestación y degradación (Houghton, 2012). La pérdida de bosques se debe principalmente, a procesos relacionados con la producción agrícola (Kissinger, 2011; Olander*et al*., 2007). Dicha perdida de bosques conlleva a una contribución significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, siendo la segunda fuente antropogénica más grande de estos gases (van der Werf*et al*., 2009). Se estima que la deforestación a nivel global contribuye en un 6–17% a las emisiones de CO_2 (van der Werf*et al*., 2009). A causa de estas emisiones el sector forestal tiene también un potencial muy alto para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. A través de una implementación rigurosa del acuerdo de Paris de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se estima que en el sector LULUCF (LandUse, Land Use Change and Forestry) puede reducir emisiones de alrededor de 2 Gt CO_2 /año, convirtiendo dicho sector de una fuente neta de emisiones a un sumidero neto de carbono (Grassi *et al*, 2017).

Sin embargo, la conservación no es la única manera para frenar las emisiones provenientes del sector forestal. Ya no basta conservar y proteger áreas representativas, sino que se debe aprender a restaurar paisajes, ecosistemas, comunidades y poblaciones de plantas y animales, para garantizar sustentabilidad de

sistemas naturales, seminaturales y sociales en grandes extensiones, y de esta forma garantizar la disponibilidad de servicios ambientales como producción de agua, fijación de CO_2, ciclos de materia, productividad del suelo, biodiversidad, control de erosión, etc. (Vargas, 2011). Actualmente, procesos de restauración de bosques tropicales capturan alrededor de 1.6 ± 0.5 PgC/año, compensando parcialmente las emisiones provenientes de la deforestación tropical (2.9 ± 0.5 Pg/año) (Pan *et al*., 2011).

En Colombia la deforestación aumentó en un 23% entre el año 2016 y 2017 sumando 178.587 ha de bosques perdidos (MADS, 2017). Por eso se hace necesario que se tomen medidas urgentes para la prevención y mitigación de la deforestación. El manejo de ecosistemas a través de conservación y restauración ecológica toma fuerza cada día como solución para revertir procesos de degradación de ecosistemas y pérdida acelerada de biodiversidad.

Por tanto, en el presente proyecto se busca encontrar las áreas ideales para restauración ecológica partiendo de información suministrada por el REAA (Registro único de Ecosistemas y Áreas Ambientales) y el PNR (Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas,) calcular el potencial de captura de carbono a través de imágenes satelitales y construir una metodología para estimar la captura de carbono en zonas ideales a restaurar, para así estandarizar los pasos necesarios para dicho análisis e incrementar el conocimiento sobre los beneficios de las actividades de restauración ecológica, orientado hacia la

financiación de proyectos en zonas de importancia ambiental.

Como área de estudio se seleccionó el municipio de Pesca en el departamento de Boyacá, vinculando la información geográfica del REAA, con las áreas susceptibles a restauración ecológica de MinAmbiente que hacen parte del PNR para encontrar las áreas ideales para la restauración ecológica. Luego se procede a calcular la biomasa de los bosques secundarios, a través de una correlación entre datos de biomasa de campo y los valores de los pixeles NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de imágenes satelitales de alta resolución espacial (PlanetScope) con el fin de estimar el contenido de carbono capturado actualmente en bosque natural, para las demás coberturas se obtiene a partir de información secundaria. Y por último a través de un análisis multitemporal del crecimiento de ecosistemas boscosos restaurados, utilizando imágenes satelitales, se obtiene una regresión matemática que relaciona año de vegetación, con la cual se obtiene el valor potencial de almacenamiento de carbono en áreas ideales de restauración en escenarios futuros.

Finalmente, se elabora una metodología de todo el proceso para facilitar una replicación del ejercicio en todo el territorio colombiano, lo que puede ser de interés para cualquier institución comprometida con la restauración de los ecosistemas del país.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial la tasa de deforestación anual suma alrededor de 17 millones de hectáreas, usando datos de cambio de coberturas entre los años 2000 y 2012. En total, en el mismo periodo de tiempo, 230 millones ha de bosque se ha perdido mientras solamente 80 millones ha fueron establecidos (Hansen, 2013). En términos de carbono estas pérdidas equivalen a emisiones netas en los países trópicos de 425.2 ±92.0 TgC /año (Baccini *et al.*, 2017).

Por su parte, Colombia borró de su territorio 178.587 ha de bosque en el 2016, la mayor pérdida de bosque en 25 años (MADS, 2017) reflejando un aumento de la deforestación en un 44% respecto a la cifra reportada para 2015 (124.035 ha).La razón principal responde a la necesidad de limpiar espacios de bosque para la ganadería, agricultura, construcción de carreteras, industria de madera y papel, explotación de recursos, minerales, entre otros (MADS, 2017).

Según los Contribuciones Nacionalmente Determinadas (Nationally Determined Contribution - NDC por sus siglas en inglés) de Colombia, el país reconoce que la gran parte de sus GEI proviene del sector AFOLU (Agriculture Forestry and Other Land Use) sumando 130.36 Mt CO_2eq en el año 2010. Además, el país se comprometió a reducir sus emisiones de GEI en un 20% con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030. Siendo así, los sectores agrícolas y forestales tienen un rol fundamental para el cumplimiento de dichos propósitos (Gobierno de Colombia, 2015).

A pesar de que existe un programa nacional para el control de la deforestación con aportes de fondos internacionales llamada “REDD+”, y la Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques (EICDGB), los avances en materia de control están siendo insuficientes. El futuro de los bosques depende cada vez más de la distribución, extensión, dinámica y conservación de los fragmentos remanentes (Daily *et al.*, 1995; Guevara *et al*., 2004). Por ello, es necesario evaluar la permanencia de estos fragmentos y el papel que juegan en los procesos de sucesión y restauración ecológica en campos degradados (Laurance y Bierregaard, 1997; Chazdon, 2003).

A medida que avanza la deforestación, también lo hace el cambio climático, pues faltan cada vez más árboles para capturar el excesivo dióxido de carbono de la atmósfera. Y al mismo tiempo, los efectos del cambio climático se hacen visibles en sequías y agravación de incendios. En este sentido la restauración ecológica juega un rol central para la mitigación del cambio climático, así como para la adaptación de ecosistemas a los efectos que ya se están viviendo en muchas partes del mundo (Alexander *et al*., 2011). Por tanto, la restauración ecológica de bosques ayudaría a prevenir los efectos del cambio climático, y al mismo tiempo, a adaptarse a los efectos que ya son irreversibles, haciendo necesario estimar la captura del carbono para dimensionar los beneficios que la restauración podría generar en términos de mitigación del cambio climático. Sin embargo, los beneficios climáticos que trae la restauración no son las únicas ventajas que tiene dicha actividad, se pueden además recuperar muchos otros servicios ecosistémicos relacionados con la biodiversidad, reducción de la erosión y la provisión de agua, entre otros (Alexander *et al.*,2011; Benayas, *et al*, 2009).

3 JUSTIFICACIÓN

El cálculo exacto de biomasa es un componente crítico en la cuantificación de reservas de carbono en la biomasa terrestre (Kumar y Mutanga, 2017). Según IPCC (Eggleston, *et al*, 2006) la biomasa terrestre superficial es la más visible, dinámica e importante y cuenta con el 30 % del carbono total almacenado en la biomasa terrestre. La estimación del almacenamiento especialmente de biomasa forestal ha venido ganando terreno en las últimas décadas por una creciente conciencia sobre el calentamiento global y el rol de la biosfera en la emisión y la secuestración de los GEI (Kumar y Mutanga, 2017). Además, las estimaciones de carbono son la base principal para inventarios de carbono y sistemas de comercialización de las emisiones de carbono. Programas internacionales para la conservación de los bosques tropicales como REDD+ dependen fundamentalmente de dichas estimaciones de carbono (Kumar y Mutanga, 2017). Mientras la biomasa superficial abarca alrededor de 70 – 90% de la biomasa forestal total (Cairns, *et al*, 1997) y aproximadamente el 50% de la biomasa vegetal seca es carbono (Houghton, *et al*, 2009), estimaciones locales más exactas son indispensables para la implementación de políticas para la valoración de los servicios ambientales de los ecosistemas nacionales. Estos datos no solamente sirven para la implementación de esquemas internacionales de valorización y compensación de carbono sino también para esquemas nacionales en Colombia como "BanCo2".

Sin embargo, se necesita cálculos exactos y económicos para cumplir con los requerimientos de información que pueden servir para la cuantificación de carbono en convenios de comercio de carbono. Los sensores ópticos de alta resolución son muy aptos

para estimaciones de biomasa superficial y carbono, dado que hay una alta disponibilidad de imágenes satelitales de bajos costos y los índices de vegetación, como el NDVI se correlacionan muy bien con la biomasa medida en campo. Aunque las mediciones de campo de parcelas de biomasa son un factor significativo en los costes de dichos procedimientos, son indispensables para las regresiones matemáticas que se usan para obtener datos de biomasa a escala más grande. Aunque esta investigación se enfoca en el cálculo actual y futuro de carbono de bosques, incluimos también otras coberturas vegetales para tener una visión más completa del carbono en el paisaje y deducir el potencial de captura de carbono en un escenario de restauración a futuro usando valores de carbono de coberturas sin bosque como línea base.

La estimación de las áreas ideales para la restauración ecológica tiene el propósito de invertir fondos públicos de manera más eficiente. Con el uso de los datos geográficos del REAA y del PNR como insumos, se busca enfocar los esfuerzos en las áreas en donde se espera los beneficios más altos por la restauración de los ecosistemas degradados.

Se seleccionó el municipio de Pesca, Boyacá, como área de estudio por su localización en zonas donde existen estudios puntuales de biomasa y carbono, que son necesarios para relacionar niveles digitales (ND) de índices de vegetación con parcelas de biomasa en campo. Además, se seleccionó este municipio por presentar información cartográfica adecuada sobre proyectos de restauración ecológica realizados y por estar en uno de los departamentos en donde se adelanta un piloto del REAA.

Por último, resulta pertinente destacar que la restauración ecológica no solamente es favorable por su captura de carbono y su resultante mitigación del cambio climático sino también por sus demás servicios ecosistémicos. La acumulación de biomasa a través de la reforestación puede reducir la erosión, capturar agua, mejorar condiciones bioclimáticas, reducir la lixiviación de nutrientes y aumentar la complejidad estructural del ecosistema proveyendo hábitat para la fauna de la región (Silver, *et al*, 2000). Como lo señala la Directora del Departamento Forestal de la FAO, los árboles y los bosques contribuyen a lograr múltiples objetivos en toda la Agenda 2030 y deben incorporarse en las estrategias para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (FAO, 2018).

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Suministrar procedimientos y metodologías para la estimación del potencial de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un documento metodológico estandarizado que oriente los procedimientos necesarios para estimar el potencial de captura de carbono a futuro en áreas ideales de restauración ecológica.
- Realizar la aplicación y validación del diseño metodológico para la estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica a partir de imágenes satelitales en el Municipio de Pesca, Boyacá.
- Realizar un análisis espacial para encontrar las áreas ideales para la restauración ecológica en el municipio de Pesca, Boyacá.
- Estimar el contenido de carbono actual de las coberturas vegetales presentes en el municipio usando imágenes satelitales de sensores ópticos.
- Determinar el potencial de captura de carbono de las áreas ideales para la restauración ecológica a través de imágenes satelitales en el municipio Pesca, Boyacá.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

La restauración ecológica está definida como un proceso de *"restablecer el ecosistema degradado a una condición similar al ecosistema predisturbio respecto a su composición, estructura y funcionamiento. Además, el ecosistema resultante debe ser un sistema autosostenible y debe garantizar la conservación de especies, del ecosistema en general, así como de la mayoría de sus bienes y servicios"* (MADS, 2015).

5.2 CAPTURA DECARBONO

Los ecosistemas boscosos se consideran de vital importancia no solo por los bienes que ofrecen, sino también de los servicios que prestan para hacer frente al cambio climático. En los últimos años la transformación de los bosques ha hecho que los ecosistemas presentan efectos negativos sobre su biodiversidad y se comporten como importantes fuentes de emisión de carbono (Phillips *et al.* 2011). De esta forma, las actividades que reduzcan las altas tasas de deforestación, incrementen la reforestación y mejoren el potencial de captura de carbono de las coberturas forestales, especialmente las naturales, son buenas alternativas para mitigar las emisiones potenciales de GEI.

5.3 ANTECEDENTES

En Colombia existen instrumentos políticos que tienen como objetivo incentivar la restauración ecológica de la mano del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; el más importante es el Plan Nacional de Restauración Ecológica, que busca contribuir con la mitigación del cambio climático y la provisión de servicios ecosistémicos. Otro instrumento es el manual de compensaciones por pérdida de

biodiversidad, que considera que para todas las actividades que causen deterioro a los recursos naturales se debe imponer tareas de prevención, mitigación y compensación. En ese marco entidades ambientales de toda índole, han adelantado labores de restauración ecológica de los cuales Murcia y Guariguata (2014) han documentado 119 proyectos en el territorio nacional.

Las técnicas de mediciones de biomasa y carbono en Colombia han venido desarrollándose con avances rápidos en la exactitud de las mediciones. Publicaciones nacionales del IDEAM se enfocaron en la estimación de biomasa y carbono usando sensores remotos (incluso datos tipo "LIDAR"), datos de biomasa de campo y procedimientos estadísticos como "randomforest" (Galindo *et al*., 2011). Sin embargo, se necesita procedimientos más económicos con una exactitud satisfactoria que sean replicables para un alto rango de usuarios. La presente investigación tiene grandes ventajas en cuanto a la sencillez de sus procedimientos y la asequibilidad de los insumos de datos de información geográfica, alcanzando resultados de alta calidad en términos de exactitud de cálculo de captura de carbono.

Con el fin de relacionar los valores de índice de vegetación (e.g. NDVI) con carbono se debe establecer una correlación entre los valores del índice de vegetación y valores de carbono (biomasa) levantados en campo. Con base en mediciones de campo se puede extrapolar estos datos de pequeña escala a mapas de gran escala y elaborar mapas locales, regionales y nacionales de carbono. El método más común para establecer este modelo estadístico, el mismo que se usa en este estudio, es la regresión lineal (véase

ilustración 1) elaborada a partir de datos de biomasa de campo e índices de vegetación (Thenkabail, 2015).

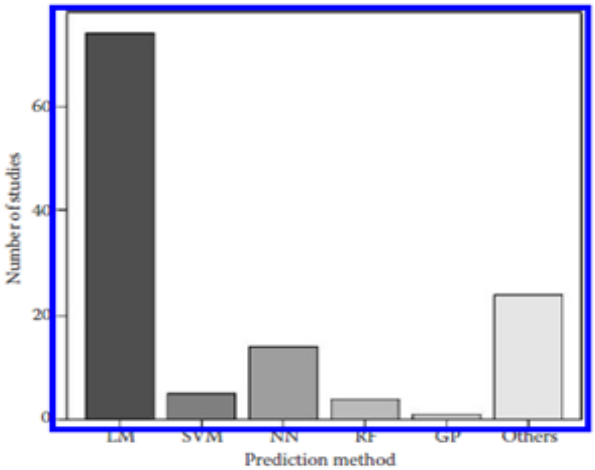


Ilustración 1. Frecuencia de métodos usados para la predicción de biomasa superficial. LM = linear regression model; SVM = support vector machines; NN = nearest neighbor-based methods; RF = random forest; GP = Gaussian processes. Fuente: (Thenkabail, 2015)

5.4 ÁREA DE ESTUDIO

Se localiza en el Municipio de Pesca, el cual se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental al oriente de la capital del Departamento de Boyacá. Hidrográficamente se encuentra entre la cuenca del río Chicamochay la subcuenca del río Pesca; posee altitudes que van desde los 2.600 hasta los 4.000 metros sobre el nivel del mar; es uno de los municipios que más cuenta con proyectos de restauración ecológica (pasiva y activa), y cuenta con extensas zonas de ecosistema de bosque alto andino, que es igualmente, el ecosistema donde más se reportan actividades de restauración ecológica(Alcaldía -Pesca, 2018); por estas características, y la situación bioclimática (fría-húmeda y semi-humeda), que coincide con las zonas climáticas del estudio sobre el que se apoya esta investigación (Clerici *et al.* 2016), fueron las

determinantes para la selección del municipio.

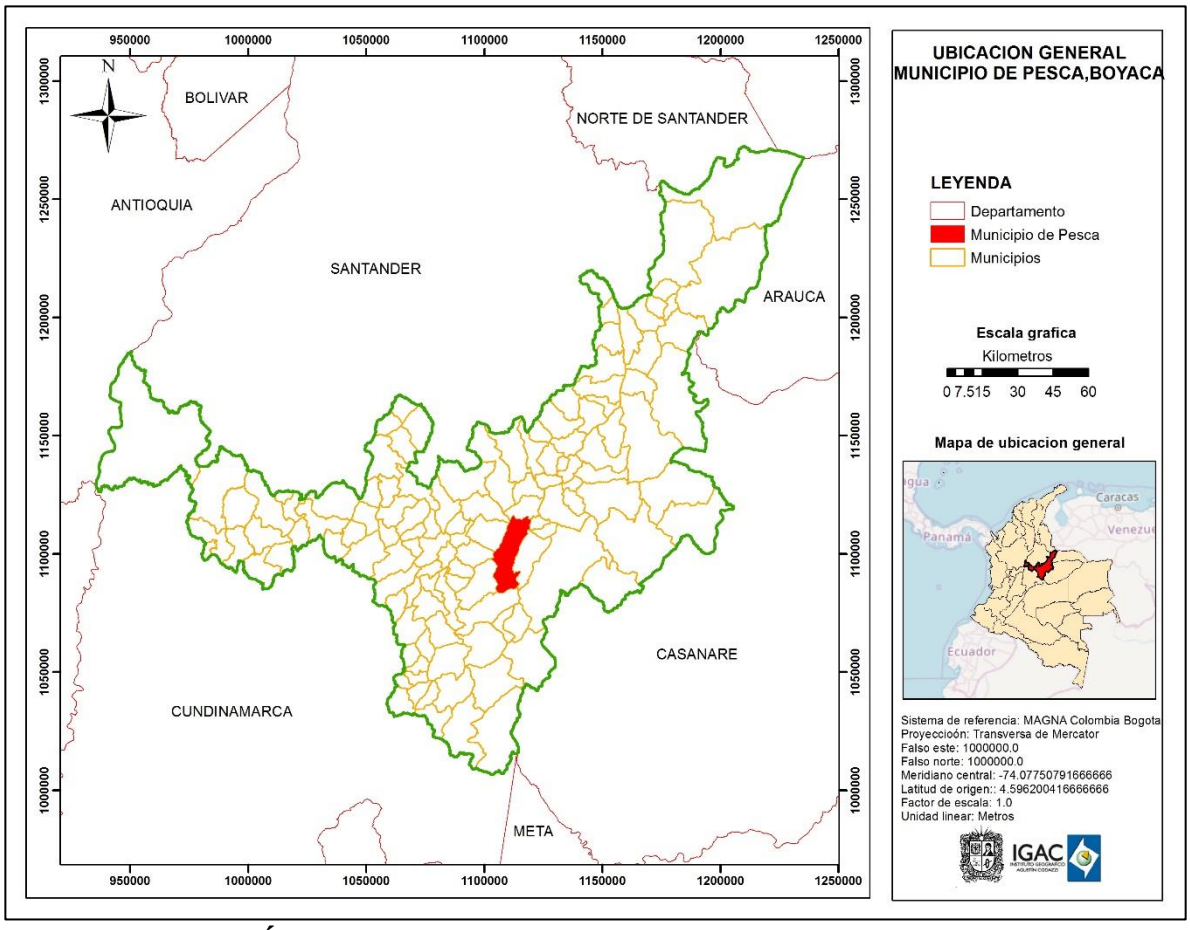


Ilustración 2. Área de estudio: Municipio de Pesca, Departamento de Boyacá

6 METODOLOGÍA

El proceso de estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica en el municipio de Pesca, se realizó siguiendo el diseño metodológico propuesto, el cual se presenta en la ilustración3 y se anexa como documento de apoyo que describe detalladamente el procedimiento que se adelantó para la consecución de los resultados expuestos.

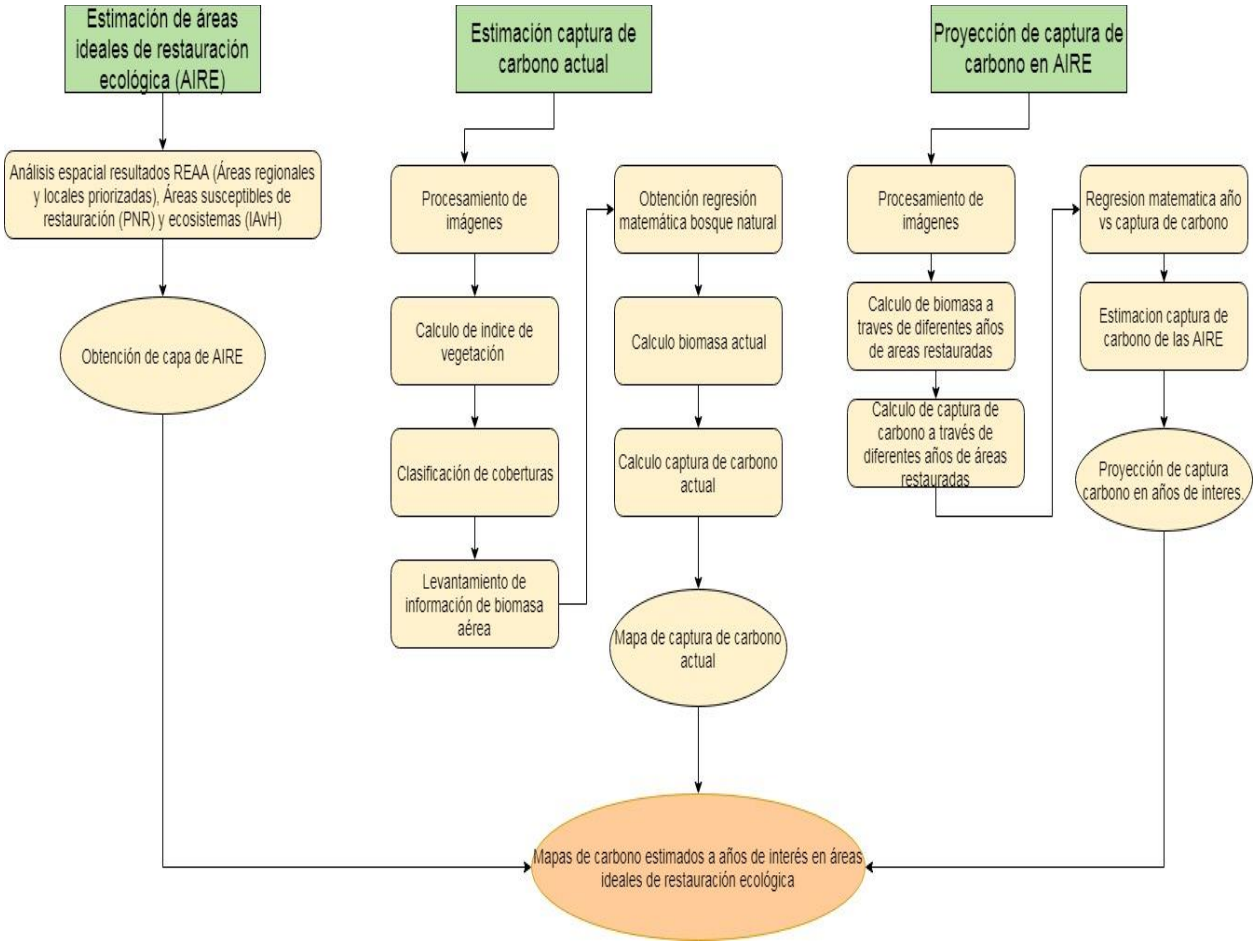


Ilustración 3. Esquema metodología estimación de captura de carbono en AIRE

6.1 ESTIMACIÓN DE ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN ECOLOGICA

Las Áreas Ideales de Restauración Ecológica (en adelante AIRE) surgen como una iniciativa que busca vincular los resultados del piloto del Registro único de Ecosistemas y Áreas Ambientales –REAA- (que identifica y prioriza ecosistemas y áreas ambientales del territorio nacional en las que se podrán implementar Pagos por Servicios Ambientales (PSA) y otros incentivos y/o instrumentos orientados a la conservación) de Boyacá, junto con las áreas susceptibles a restauración ecológica de MinAmbiente que hacen parte del Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas (PNR), (que tiene como objetivo orientar y promover procesos integrales de restauración ecológica que busquen recuperar las condiciones de los ecosistemas como su estructura, su composición o sus funciones y garantizar la prestación de servicios ecosistémicos en áreas degradadas de especial importancia ecológica para el país). Esta iniciativa identifica a las áreas regionales y locales priorizadas del REAA como territorios con grandes potencialidades para ofrecer servicios ecosistémicos. Por su parte las áreas susceptibles a restauración ecológica son incluidas por presentar de los cambios en las coberturas vegetales, conflicto en los usos y el manejo de las mismas, donde deberían desarrollarse procesos ecológicos, servicios ecosistémicos, y mayor presencia de biodiversidad.

El cruce de información determina las AIRE, que tiene como propósito invertir fondos públicos de manera más eficiente. Con el uso de los datos geográficos del REAA y del PNR como insumos, se busca enfocar los esfuerzos en las áreas en donde se espera los beneficios más altos por la restauración de los ecosistemas degradados.

6.1.1 Información de entrada

A continuación, en la tabla 1 se pueden observar los insumos necesarios para la estimación de lasAIRE.Es importante mencionar que la escala resultado es 1:25.000 debido a que la zonificación sobre la cual parten las AIRE es el REAA, siendo las Áreas Susceptibles a Restauración Ecológica, los ecosistemas nacionales y municipios insumos para la delimitación correcta de las áreas del REAA.

Tabla 1. Información entrada estimación de AIRE

NOMBRE		**FUENTE**	**ESCALA**
REAA	Áreas regionales y locales priorizadas	IGAC-MinAmbiente	1:25000
Ecosistemas Nacionales		IDEAM	1:100000
Áreas Susceptibles a Restauración Ecológica		MinAmbiente	1:100000
Municipios		IGAC	1:25000

Fuente: Autores

6.1.2 Procesos

Se inicia con la incorporación de las áreas regionales y locales priorizadas a ser incluidas en el REAA, considerando aquellas con importancias moderada, alta y muy alta. Para la eliminación de categorías distintas se realizó un proceso de *set null*, eliminando dichas clases.

Por su parte las áreas susceptibles a restauración ecológica del PNR, provienen de una fuente que incluye categorías que no son relevantes para el desarrollo de la metodología, para un manejo más sencillo se deben seleccionar únicamente las categorías *"áreas susceptibles de restauración y recuperación ecológica*".

El resultado es un cruce entre las dos capas, previamente depuradas. Este resultado se convierte a un formato vectorial con el fin de calcular áreas y cruzarse con el área de

interés; dichas áreas serán el insumo donde se realizará la estimación de captura de carbono.

A continuación se representa el modelo desarrollado en *model builder* que se realizó para encontrar las AIRE de la jurisdicción de Corpoboyacá.

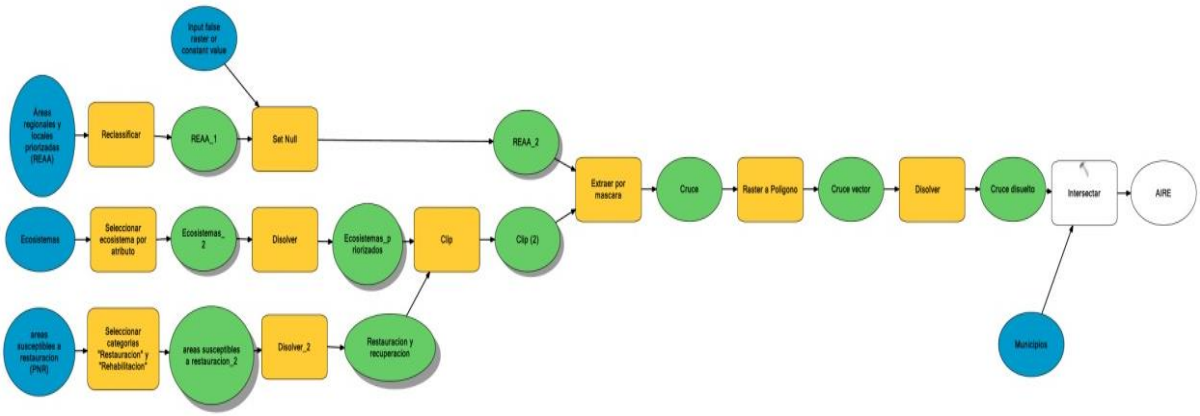


Ilustración 4. Modelo para la estimación de AIRE

Además, es necesario realizar una validación para comprobar que las Áreas Ideales de Restauración Ecológica no se encuentren en áreas protegidas del SINAP, ni con coberturas boscosas.

6.2 ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO ACTUAL

6.2.1 Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales que fueron usadas provienen del satélite PlanetScope ,del año 2017, (ver ficha técnica, anexo 13), las cuales presentan resolución espacial de 3 metros, lo que representa mayor nivel de detalle y menor nivel de incertidumbre, además cuentan con corrección geométrica y atmosférica realizada previamente; luegose procede a

seleccionar las mejores imágenes que cubren el área de estudio, con menor porcentaje de nubes, sombras y bruma, realizando el mosaico de toda la zona, para este caso se realizó a través del software de PCI geomática desde el módulo *orthoengine.*

Al resultado obtenido se le aplican mejoras radiométricas con el fin de realzar los contrastes y algunas características particulares de las imágenes para optimizar el proceso de la interpretación visual, las cuales se realizaron desde el software Erdas Imagine desde la extensión *Radiometric*, a continuación, se pueden visualizar en la ilustración 5 en la región espacial de la vereda la Carbonera. Es importante mencionar que la escala resultado es 1:25.000 según la resolución mínima de la imagen satelital, en este caso 3 metros

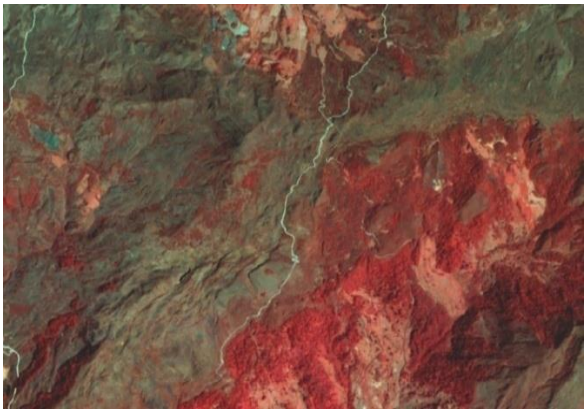
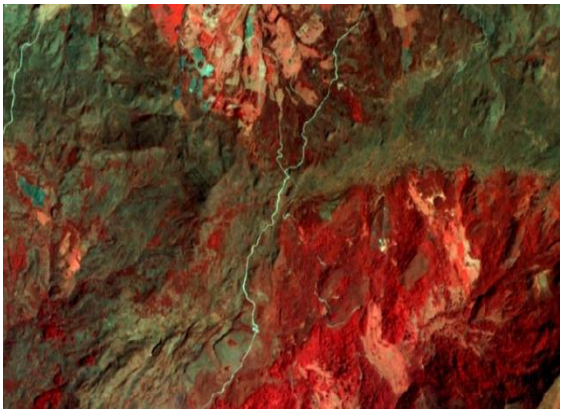
Antes	**Después**
	

Ilustración 5.Ajuste de contraste

Además, se realiza el mejoramiento visual a través de filtros, que involucra la transformación de los valores de píxeles individuales con base en sus vecinos, modificando de esta manera la distribución de la frecuencia espacial de la imagen, dicho mejoramiento se puede observar como ejemplo en la ilustración 6, en un sector de la vereda Butaga.

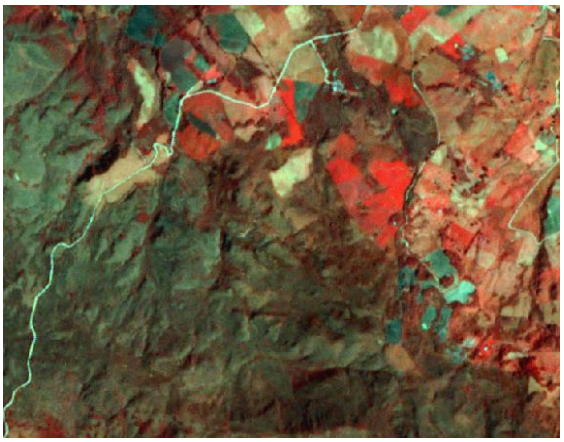
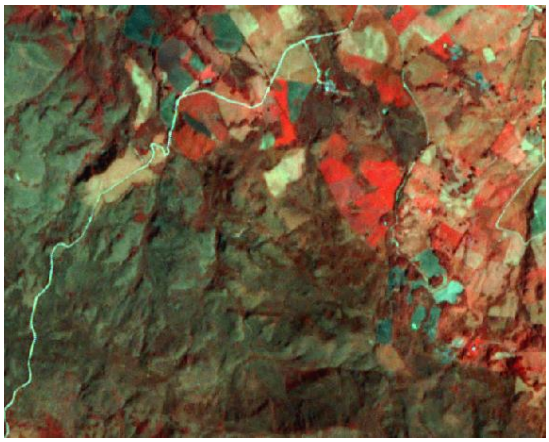
Antes	Después
	

Ilustración 6.Mejoramiento espacial

6.2.2 Calculo de NDVI

Con el mosaico que cubre toda la zona se procede a calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual se obtiene a partir de la relación de la máxima reflexión de la banda del infrarrojo cercano (IRC) y la absorción de la banda del rojo (R), es el índice más usado, y su rango está entre -1 a 1 con el cero como un valor aproximado de no vegetación. Valores negativos representan superficies sin vegetación, mientras valores cercanos a 1 contienen vegetación densa; a través de software ArcGis desde la extensión de *ráster calculator* se calcula usando la siguiente ecuación.

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Donde:

IRC: Banda de infrarrojo cercano

R: Reflectancia de la Banda del rojo

6.2.3 Clasificación de coberturas supervisada

Se procede a realizar una clasificación supervisada para diferenciar las coberturas, ya que cada una tiene un comportamiento en cuanto al contenido de biomasa y carbono, este proceso consiste en la conversión de una imagen continua a otra categorizada temáticamente, a partir de agrupación de los niveles digitales (ND) espectralmente similares. El proceso se basa en la elección de las bandas espectrales de la imagen a clasificar, definición de numero de clases espectrales, selección de los criterios de similitud y algoritmos de agrupación de los ND (Posada, 2004).

Se realizó la clasificación del mosaico obtenido a través del software Erdas Imagine desde la extensión *supervised classfication*, teniendo en cuenta como coberturas de interés, bosques naturales, bosques plantados, pastizales, cultivos y paramos, porque como lo señala el protocolo de biomasa-carbono de Yepes *et al*., IDEAM (2011), cada una de estas coberturas tiene un comportamiento diferente en cuanto a la cantidad de biomasa y por ende captura de carbono; por otro lado se tuvieron en cuenta las coberturas ocupadas por sombras, nubes y agua, para eliminar estas áreas del análisis. Una vez obtenida la clasificación de las coberturas de interés, se procedió a realizar una validación de exactitud temática, para asegurar la confiabilidad del proceso realizado; por medio de una matriz de confusión, teniendo como referencia la clasificación de coberturas de la tierra del IDEAM (2010-2012).

Con los resultados obtenidos de la matriz de confusión se procede a calcular el índice Kappa (K) que permite validar la proporción de coincidencias obtenidas en el

producto cartográfico, es decir entre la capa de clasificación obtenida y la capa clasificada por el IDEAM.

$$K = \frac{P_o - P_C}{1 - P_C}$$

Donde:

Po: confiabilidad global

Pc: Confiabilidad resultante al azar.

6.2.4 Levantamiento de información de biomasa

De las coberturas del municipio, se tiene que el bosque es la cobertura que mayor contenido de biomasa posee y por ende, mayor contenido de carbono captura, teniendo una alta variabilidad de contenidos debido a la heterogeneidad propia de la cobertura. Por lo tanto, se hace necesario hacer muestreos de la biomasa en mediciones de campo.

Antes de realizar el trabajo de campo fue necesario conocer la cantidad de parcelas a muestrear, se empleó la ecuación:

$$n = \frac{n0}{1 + (\frac{n0}{\frac{Th}{Tp}})}$$

Donde:

n= Numero de parcelas a realizar (9 para este caso de estudio)

n0= Tamaño de la muestra aproximado (126400)

Th= Total del área de la cobertura a muestrear en hectáreas (5056 ha)

Tp= Tamaño de las parcelas en hectáreas (0.04 ha)

$$n0 = \frac{Z^2 * V}{E}$$

Donde:

Z= Valor Z para un alfa de 0,05 o probabilidad del 95%. (Valor de 1)

V= Varianza de la variable (en caso de desconocerla se aplica teoría de probabilidades con un p=0.5 y un q= 0.5, teniendo una varianza de 0.25)

E= Corresponde al error de muestreo máximo (15%)

Las parcelas se localizan aleatoriamente en la cobertura deseada, teniendo en cuenta las restricciones de acceso. Una vez en campo, con apoyo de equipo GPS, se levantan parcelas de 20 m * 20 m, donde se mide en cada árbol el diámetro a la altura de pecho, teniendo en cuenta solo los individuos de diámetro mayor a 5 cm, como se observa en la ilustración 7. Según la *Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia* (Álvarez *et al.* IDEAM, 2011), la siguiente ecuación es la que mayor precisión tiene para el ecosistema del área de estudio (Bosque altoandino):

ln (BA) = -2,41 + 2,41 ln D (Ovington y Olson, 1970)

Dónde:

BA: Biomasa aérea

D: Diámetro a la altura del pecho

Una vez seleccionada la ecuación se estima la biomasa aérea de las parcelas levantadas en campo, usando los datos de diámetro a la altura del pecho.

Ilustración 7. Medición de individuos en campo.
Fuente: Autores

Para completar el total de parcelas a muestrear y robustecer el modelo matemático es útil contar con información del Inventario Forestal Nacional que adelanta el IDEAM y datos de biomasa de revisiones en literatura. Para este caso se emplearon los datos la investigación de Clerici *et al.* (2016), considerando que se encontraban en la misma zona climática y ecosistémica, además de tener cercanía al área de estudio, las cuales se pueden ver representadas espacialmente en el anexo 1.

Considerando el bajo aporte de biomasa para las demás coberturas, se realiza una consulta bibliográfica del valor de biomasa promedio, obteniendo los siguientes datos, compilados en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación de valores de biomasa por cobertura

COBERTURA	BIOMASA (t/ha)	FUENTE
Paramo	6.5	Albán y Granda, 2013
Pastos	3.7	Anaya, 2009
Cultivos	10	Anaya, 2009
Bosque natural	Biomasa=479.59*(NDVI)-128.99	Clerici *et al*., y Autores (2016, 2018)
Bosque plantado	191.5	Quintero, 2016

Fuente: Autores

6.2.5 Regresión matemática de biomasa en bosque natural

Con la obtención de los datos de biomasa, se procede a realizar la relación matemática con los valores de NDVI por parcela y de esta manera obtener una regresión matemática que explique el contenido de biomasa del bosque natural de acuerdo al NDVI. Para ello se realiza una extracción de valor promedio de NDVI que cubre cada parcela a partir de la herramienta *Zonal Statistics as table* del software ArcGIS y se contrasta con los valores medidos de biomasa.

Es necesario evaluar la variación de los datos en la regresión empleando los estadísticos r^2, que determina la calidad del modelo para replicar los resultados; y el error cuadrático medio (RMSE) que cuantifica cuan diferentes fueron los valores obtenidos de biomasa respecto a los estimados con el modelo, de esta forma se realiza una adecuada validación estadística.

6.2.6 Calculo de biomasa actual

Para realizar el mapa de biomasa actual es necesario separar los bosques naturales del mapa de coberturas, debido a las diferentes formas de estimación de biomasa (ver Tabla 2). Esta separación se realiza mediante una selección de todas las coberturas exceptuando a los bosques naturales, posteriormente se exportan los resultados en un nuevo archivo. Haciendo uso de los valores de biomasa por cobertura de la Tabla 2, se procede a registrarlos en la tabla de atributos, teniendo precaución de trabajar con datos disueltos.

Dado que es necesario obtener resultados en formato *raster* para la estimación futura, se realiza la conversión de formato con la herramienta *vector to raster* de ArcGIS, estableciendo el mismo tamaño de pixel de la imagen original, finalmente se multiplica el valor de biomasa de cada cobertura por el total de hectáreas correspondientes, encontrando el valor final de biomasa actual.

Por su parte, el bosque natural tiene un procedimiento especial. Una vez se conoce el modelo estadístico para la estimación de biomasa, se procede a usar la herramienta *ráster calculator* sobre el mapa de NDVI, ingresando la ecuación del modelo matemático. Una vez más se emplea la herramienta *Zonal Statistics as Table*, pero únicamente sobre la extensión del bosque natural, encontrando así el valor promedio de biomasa aérea, que se multiplica por la cantidad de área de dicha cobertura, encontrando así el valor total de biomasa.

6.2.7 Calculo de captura de carbono

Se asume que el carbono sobre el suelo es de 0.471*Biomasa, basado en el contenido promedio de Carbono utilizando 134 especies de angiospermas tropicales (Thomas y Martin, 2012). Con esta relación, finalmente se desarrolla un mapa de captura de carbono para el área de estudio.

6.3 ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO A FUTURO

6.3.1 Regresión matemática año vs captura de carbono

Se realiza la comparación de biomasa de áreas que han sido restauradas en

ecosistemas boscosos, y cómo ha sido el comportamiento de éstas a través de los años, obteniendo así la captura de carbono; para ello se seleccionan áreas de restauración dentro y/o cerca al municipio de estudio que cuente con la misma región bio-climática que hayan sido restauradas en periodos cercanos a los 20 años, ya que luego de este periodo el crecimiento de biomasa disminuye sustancialmente, las cuales se pueden ver representadas en el anexo 2.

Posteriormente se realiza el cálculo de biomasa en diferentes periodos, para lo cual se requieren imágenes satelitales multitemporales, para este caso se usaron las imágenes Landsat con una resolución espacial de 30 metros, debido a que es un satélite que cuenta con información en un rango temporal amplio (ver ficha técnica, anexo 16). Es importante mencionar que la escala resultado es 1:100.000 según la resolución mínima de la imagen satelital.

El cálculo de biomasa se realiza con la relación entre la edad y la reflectancia del infrarrojo cercano encontrada por Zheng*et al*. (2004) la cual aplica para todo tipo de ecosistemas:

$$BA=48.8*(IRC/red) +2.3*Año-4.54*MSAVI-38$$

$$\mathrm{MSAVI} = \frac{(\mathrm{IRC} - \mathrm{RED})(1 + \mathrm{L})}{\mathrm{IRC} + \mathrm{RED} + \mathrm{L}}$$

Donde:

BA: Biomasa aérea

MSAVI: Modified soil adjusted vegetation index (Índice de vegetación modificado

ajustado al suelo)

IRC: Espectro electromagnético que corresponde a la banda “infrarrojo cercano”

RED: Espectro electromagnético que corresponde a la banda “rojo”

L: Factor de correlación del brillo del suelo, que generalmente se usa un valor de 0.5.

Una vez calculada la biomasa, se obtiene la captura de carbono con la relación de Thomas y Martin, (2012) y de esta manera se realiza el modelo de dispersión de diferentes años de crecimiento de la vegetación restaurada versus el carbono capturado; evaluando el estadístico r2 se determina el mejor modelo que asegure la buena calidad para replicar los resultados, obteniendo así una ecuación de estimación de captura de carbono según la edad del proceso de restauración ecológica.

6.3.2 Estimación de captura de carbono para AIRE

Con la regresión encontrada, se asume que las AIRE son restauradas en el periodo actual, y se calcula la captura de carbono para 5, 10, 15 y 20 años del proceso de restauración ecológica, los valores de tasa de crecimiento previamente obtenidos se suman con los valores de captura de carbono actual; y de esta manera se obtienen los mapas de captura de carbono a futuro.

7 RESULTADOS

7.1 ÁREAS IDEALES DE RESTAURACIÓN

Luego del cruce de información, se tiene como resultado la identificación de las áreas ideales de restauración ecológica, que se limitan a la jurisdicción de Corpoboyacá. En total se registraron 36 municipios que cuenta con AIRE. La siguiente tabla muestra los diez municipios con mayor cantidad de área ideal para adelantar proyectos de restauración ecológica; en el anexo 3 y 4se puede observar cómo están distribuidas dichas áreas.

Tabla 3. Áreas de la capa AIRE por municipio

No.	MUNICIPIO	AREA (HA)
1	El cocuy	8250
2	Guicán	7171
3	Pesca	3607
4	Sutamarchán	2896
5	Chíquiza	2279
6	Panqueba	1924
7	Belén	1733
8	Samacá	1654
9	Susacón	1583
10	Guacamayas	1551

Fuente: Autores

Además, se verifico que las áreas resultantes no se encontraran superpuestas con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), debido a que ya cuentan con sus propios planes de manejo y zonificación. Para esto se empleó la capa del Registro Único de Áreas Protegidas (RUNAP), del Sistema de Parques Nacionales Naturales, realizando un cruce con la capa de Áreas Ideales de Restauración Ecológica. No se detectaron traslapes, por lo cual se continuó con la verificación de cobertura boscosa, empleando el mapa de Bosque-No Bosque del IDEAM para el 2014, donde tampoco se encontraron traslapes. Finalmente, se comprobó visualmente con las imágenes satelitales PlanetScope que las Áreas Ideales de Restauración Ecológica no presentaran parches de bosque.

7.2 ESTIMACIÓN DE CAPTURA DE CARBONO ACTUAL

7.2.1 Procesamiento imágenes satelitales

Realizadas las correcciones pertinentes y evaluación de imágenes, se generó el mosaico de imágenes satelitales que cubre el área de estudio, para este caso no se pudo contar con todas las imágenes que cubrieran totalmente el área, por lo cual se presenta un vacío de información sobre la zona que no se dispuso de imágenes,(ver anexo 5), posteriormente se calculó el NDVI, que permitió diferenciar donde hubo mayor presencia de vegetación, y permitió encontrar la regresión entre el índice y la biomasa aérea (ver anexo 6).

7.2.2 Clasificación de coberturas

Se realizó la clasificación supervisada de las coberturas de interés por características de biomasa; finalmente se obtuvo un mapa de coberturas del Municipio de Pesca, donde se diferenciaron las sombras, suelo urbano, pastos, cultivos, bosque natural, páramo, bosque plantado y cuerpos de agua (ver anexo 7).

Por otro lado, se realizó la validación de exactitud temática con la capa de coberturas de la tierra del IDEAM, para lo cual se generó una matriz de confusión (ver anexo 8), obteniendo resultados globales de la comparación, como el índice Kappa, que se muestra a continuación:

Tabla 4. Resultados de comparación-matriz de confusión

Resultados comparación	
Numero de acuerdos	71.00
Numero de desacuerdos	29.00
p0	0.71
Pe	0.13
Kappa	0.67

Fuente: Autores

El índice Kappa permite validar la proporción de coincidencias obtenidas en el producto cartográfico, es decir entre la capa clasificada y la capa de coberturas de la tierra. De acuerdo a los resultados, se obtiene de la validación, un índice Kappa igual a0.67, y al evaluar este valor con la clasificación de índice Kappa generada por López de Ullibarry y Pita Fernández (1999) (tabla 5), se encuentra en un grado de acuerdo "Sustancial", es decir que hay una concordancia considerable entre las dos capas y que la capa evaluada está muy cercana a la realidad.

Tabla 5. Grado de acuerdo del Índice Kappa

Clasificación del Índice Kappa	
Kappa	**Grado de acuerdo**
<0.00	Sin acuerdo
0.00-0.20	Insignificante
0.21-0.4	Discreto
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial
0.81-1.00	Casi perfecto

Fuente: López de Ullibarry y Pita Fernández

Cabe resaltar que la capa de coberturas de la tierra tiene una escala más pequeña a la clasificada, puesto que cubre todo el país, por lo tanto, tiene menor detalle de la información, ésta diferencia de escalas pudo inferir en el error, por lo que se recomendaría hacer la comparación de las capas a una misma escala y asegurar una mayor representatividad del área de estudio.

7.2.3 Regresión matemática de biomasa en bosque natural

Una vez definida la información de biomasa, se realizó la relación entre valor de biomasa y NDVI obtenido por cada fuente, en cada parcela, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Relación biomasa- NDVI

FUENTE	BIOMASA	NDVI
Clerici et *al*.	38.2	0.35
Clerici et *al*.	65.9	0.44
Clerici et *al*.	23.8	0.36
Clerici et *al*.	77.2	0.44
Clerici et *al*.	54	0.40
Clerici et *al*.	82.8	0.41
Campo	72.5	0.38
Campo	80	0.45
Campo	102.5	0.43

Fuente: Autores

Con estos valores se realizó un modelo de dispersión de datos, encontrando el mejor ajuste con una regresión lineal partiendo de los estadísticos r^2 (0.575) y RMSE (14.839). En la ilustración 8 se observa la regresión obtenida del modelo, en color azul se observan las parcelas tomadas de la investigación de Clerici et *al*. (2016) y en color rojo las parcelas tomada en campo.

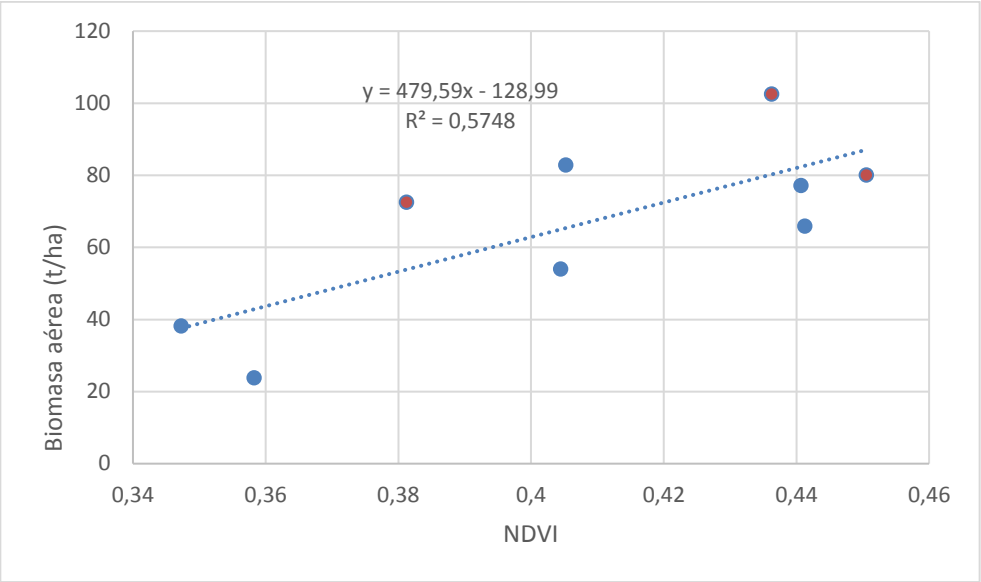


Ilustración 8. Regresión matemática para estimar biomasa en bosque natural

A continuación, se presentan los valores estimados, observados y su diferencia, sobre los cuales se obtiene el error cuadrático medio (RMSE) del modelo. Los resultados indican una diferencia general de 14.8 ton/ha de biomasa aérea entre los valores observados y los estimados. Dicha diferencia se considera baja teniendo presente la heterogeneidad de las masas boscosas muestreadas.

Tabla 7. RMSE datos biomasa bosque natural

OBSERVADO	ESTIMADO	DIFERENCIA
38.2	37.547	0.653
65.9	82.643	-16.743
23.8	42.828	-19.028
77.2	82.369	-5.169
54	64.982	-10.982
82.8	65.354	17.446
72.5	53.852	18.648
80	87.090	-7.090
102.5	80.248	22.252
	RMSE TOTAL	**14.839**

Fuente: Autores

7.2.4 Biomasa actual

Con la regresión lineal generada se calculó la biomasa de la cobertura de bosque natural y para las demás coberturas se realizó con la información de literatura, obteniendo los resultados presentados en la tabla 8, de esta manera se obtuvo el mapa de biomasa en ton/ha para el área de estudio (ver anexo 9).

Tabla 8. Biomasa actual por cobertura

COBERTURA	ÁREA (HA)	BIOMASA (T/HA)	BIOMASA TOTAL (T)
Sombras	539.9	0	0
Urbano-suelo desnudo	454.9	0	0
Pastos	10912.8	3.7	40377
Cultivos	4404.2	10	44042
Bosque natural	5056.9	66.3	335062
Paramo	1820.0	6.5	11830
Bosque plantado	678.9	191.5	130009
Cuerpos de agua	0.4	0	0
TOTAL AREA	23.868	TOTAL BIOMASA	561321

Fuente: Autores

7.2.5 Captura de carbono actual

Con el valor de biomasa aérea de toda el área de estudio, se utilizó la relación carbono-biomasa del estudio de Thomas y Martin (2012), obteniendo el siguiente mapa de contenido de carbono actual, para mejor visualización ver anexo 10.

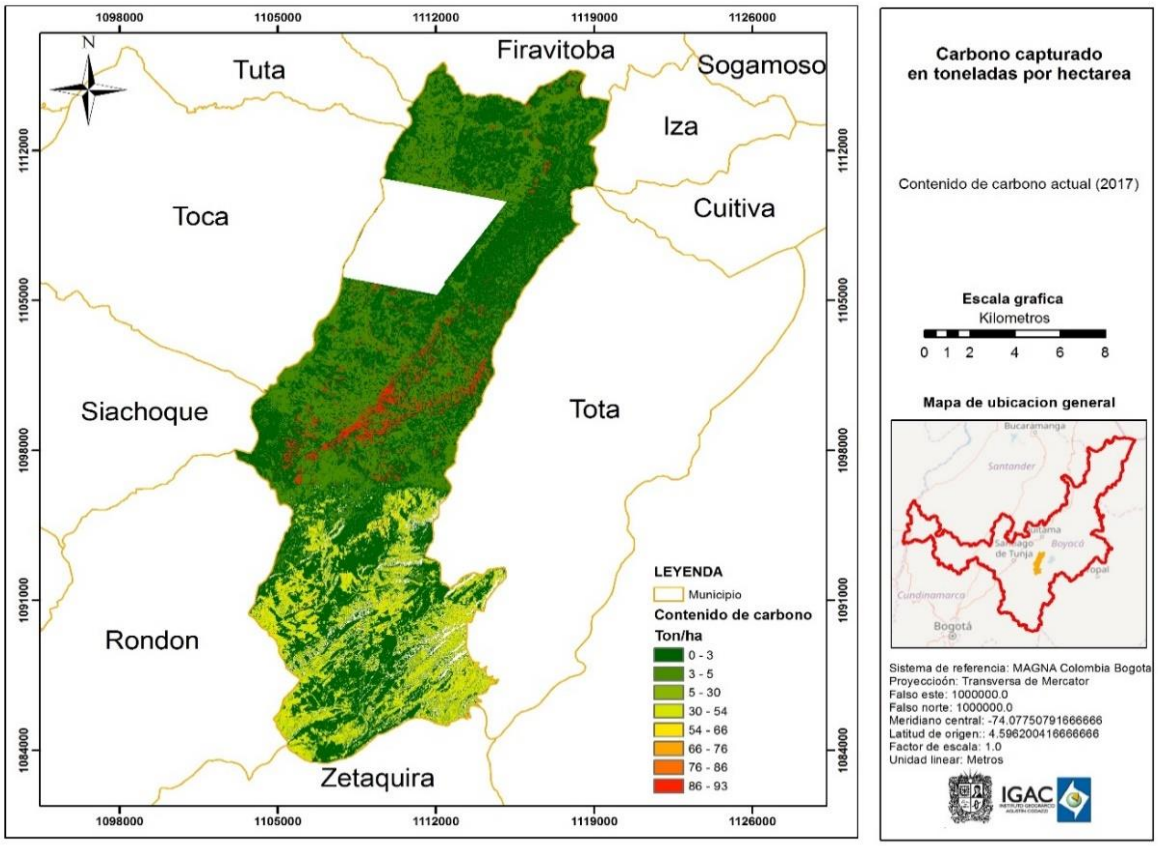


Ilustración 9. Mapa de captura de carbono actual

7.3 PROYECCIÓN DE CAPTURA DE CARBONO

7.3.1 Regresión matemática año vs captura de carbono

Partiendo de un insumo cartográfico sobre los proyectos de restauración ecológica en geometría poligonal, se seleccionaron áreas que habían sido restauradas a coberturas de bosques en 1996; a partir de ésta fecha se descargaron imágenes que correspondieran aproximadamente a 1, 5, 10,15 y 20 años después del proceso de restauración ecológica.

Para realizar el modelo de regresión matemática, se consideraron como insumos las imágenes satelitales Landsat de los años 1997, 2000, 2009, 2015 y 2017, con las cuales se realizó el cálculo de biomasa aérea de las parcelas restauradas en relación con la edad y

los valores de reflectancia del IRC y Rojo, obteniendo el valor de biomasa aérea y captura de carbono (C), los cuales se presentan en la tabla 10 representados por las parcelas restauradas y la edad de crecimiento de la vegetación restaurada.

Tabla 9. Resultados de biomasa y carbono de acuerdo a la edad de crecimiento

EDAD / N° PARCELA	1		4		13		19		21	
	BA	C	BA	C	BA	C	BA	C	BA	C
1	41.9	19.75	116.6	54.90	140.5	66.15	154.7	72.86	181.5	85.49
2	55.0	25.90	107.1	50.44	135.1	63.64	150.1	70.71	160.8	75.73
3	92.4	43.54	125.6	59.17	154.1	72.60	169.3	79.73	186.4	87.80
4	86.1	40.53	121.2	57.10	149.6	70.44	173.1	81.54	184.6	86.94
Promedio	63.1	29.73	116.4	54.84	143.2	67.47	158.0	74.43	176.2	83.01

Fuente: Autores

Con estos valores se realiza el modelo de dispersión año vs captura de carbono, obteniendo una regresión polinómica de orden 2, con R^2de 0.9688, la cual se puede observar en la ilustración 10.

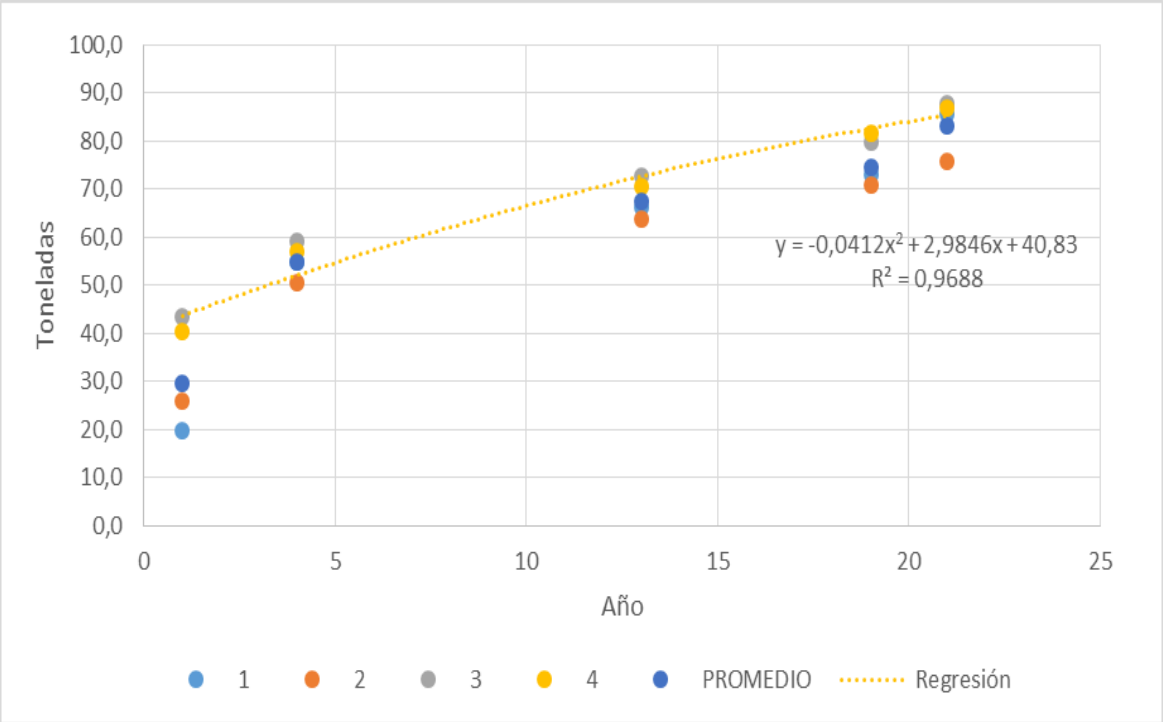


Ilustración 10. Regresión matemática año vs captura de carbono

7.3.2 Proyección de captura de carbono para AIRE

Con la regresión obtenida se realizó el cálculo del carbono de las áreas ideales de restauración ecológica, a 5, 10, 15 y 20 años después del proceso de restauración, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 10. Captura de carbono a futuro de las AIRE

AÑO	INCREMENTO DE CARBONO	CARBONO TOTAL ALMACENADO(T)	CO2 EQUIVALENTE(T)
5	54,72	207738	762627,0
10	66,56	250537	919746,4
15	76,33	285651	1048653,4
20	84,04	313360	1150375,9

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se generaron los mapas de captura de carbono a futuro para el municipio de estudio (Ver anexo 11, 12, 13 y 14)

8 DISCUSION

La restauración ecológica ha sido reconocida globalmente como una herramienta útil en los esfuerzos de conservación de la biodiversidad, para revertir la degradación ambiental y para moderar el cambio climático. A pesar de ser una disciplina relativamente reciente, la restauración ecológica ha avanzado aceleradamente en el desarrollo de sus fundamentos científicos en la teoría y en la práctica.

Dentro de dichos avances científicos se encuentran aquellos relacionados con el componente geográfico, los cuales haciendo uso de tecnologías soportadas en los Sistemas de Información Geográfica apalancan en gran medida la consecución de información sobre el estado, el avance y las posibilidades que ofrecen los territorios en términos de restauración ecológica.

Se determinó el municipio de Pesca, Boyacá como territorio clave para desarrollar la metodología que dio cuenta de las capacidades de almacenamiento de biomasa y secuestro de carbono .Además, el cruce de información del REAA y del PNR reveló las sinergias posibles entre los PSA y la restauración ecológica cumpliendo así con lo propuesto en ambos documentos. Dicha selección de las áreas ideales descritos en este documento va a permitir la inversión de fondos financieros de manera más eficiente enfocándose a áreas de alta importancia ecológica y aptitud para la implementación de esquemas de PSA.

El diseño metodológico aportó mecanismos de selección incluyentes para la determinación de áreas ideales de restauración ecológica, considerando elementos políticos y zonificaciones orientadas a la conservación. Es importante considerar que los criterios presentados obedecen a orientaciones políticas de orden nacional y regional, sin embargo, su alcance puede verse ajustado conforme a particularidades locales (programas de restauración proyectados, conectividad ecológica del paisaje, entre otros).

Por su parte el diseño metodológico desarrolló los lineamientos para conocer y caracterizar la biomasa de la región, particularmente con la mayor cantidad de información posible para bosques naturales, conociendo su amplia variabilidad natural se hace un adecuado aprovechamiento de imágenes satelitales de alta resolución (PlanetScope). El uso de índices estadísticos aporta al mejoramiento del rigor técnico para obtener resultados más cercanos a la realidad, probados con éxito en el caso de estudio presentado.

Contrastando los resultados con el estudio de Clerici *et al*. (2016) se pudo evidenciar la similitud entre los valores máximos y mínimos de carbono almacenado para la cobertura de bosques actual. Además, las validaciones estadísticas de ambos trabajos con respeto a la regresión lineal entre índice de vegetación-biomasa aérea en campo presentan valores parecidos (estudio presente: R^2=0.57; Clerici et al. (2016): R^2=0.582). Comparando los valores finales del mapa de carbono actual con el mapa de Clerici *et al.* (2016), aplicando un muestreo aleatorio simple con 53 puntos (véase Ilustración 12 e Ilustración 112: 53), se obtuvo un RMSE satisfactorio de 18,75 tC/ha, lo que compruebe la similitud de los valores de carbono de los bosques en consideración en ambos estudios.

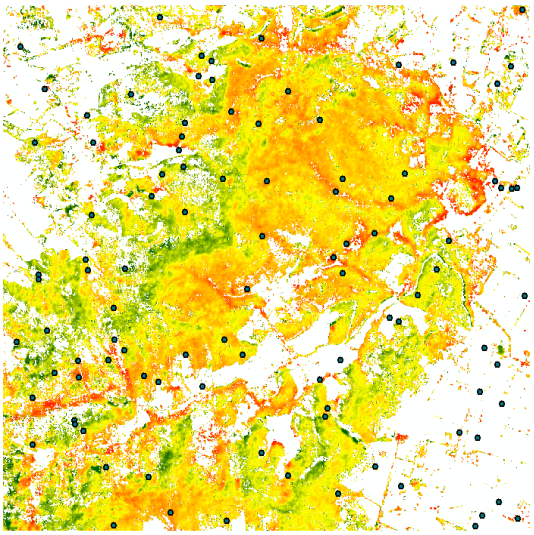


Ilustración 12. Mapa de contenido de carbono por encima del suelo de bosques naturales con muestreo simple. Fuente: Autores

Ilustración 11. Mapa de contenido de carbono por encima del suelo de bosques naturales con muestreo simple. Fuente: Clerici et al. (2016)

La comparación de los valores de carbono almacenado (tC/ha) en los bosques entre los ambos estudios es una medida adicional para comprobar la calidad de los resultados. Sin embargo, hay que mencionar que los dos estudios usaron sensores diferentes (presente estudio: PlanetScope; Clerici *et al* (2016): Pleiades-1A), y índices de vegetación diferentes (presente estudio: NDVI; Clerici et al (2016): RVI), lo que contribuye al error total entre los dos estudios.

El diseño metodológico también proyectó el incremento de biomasa por actividades de restauración ecológica; evidenciando la capacidad de almacenamiento de carbono año tras año, con la ventaja de contar con el uso de imágenes satelitales Landsat de fácil acceso y un amplio espectro temporal. Teniendo también las limitantes de la necesidad de contar con información geográfica de actividades de restauración ecológica desarrolladas por las Corporaciones Autónomas Regionales u ONG’s, que pueden ser de difícil consecución.

Para el caso de estudio en los primeros 10 años después del establecimiento de cobertura forestal se encuentra una tendencia marcada de crecimiento en la captura de carbono, estabilizándose después del año 15 al 20, posteriormente el crecimiento es bastante reducido. De esta forma se tiene que el municipio de Pesca tendrá aproximadamente 577.621 t/C almacenadas al cabo de 20 años. Visto de otra forma, son 1’150.376 t/CO_2 que se almacenarían en las coberturas restauradas, que equivalen a compensar las emisiones de aproximadamente tres veces la población de Tunja en un año, usando estadísticas de consumo del Banco Mundial (2018) y el censo del DANE (2018).

En este sentido son varias las oportunidades de la vinculación de posibles actividades de restauración ecológica con proyectos de bonos de carbono y compensación de la huella ecológica, que además de aportar beneficios en términos de captura de carbono, significa el aumento de la biodiversidad de la región, la conectividad ecológica entre los fragmentos de bosque del sur del municipio con las zonas que están representadas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, la recuperación de la fauna silvestre, la generación de una barrera natural que encierra los páramos que surten de agua al propio municipio y a los municipios aledaños y con esto el mejoramiento de los procesos de regulación hídrica, entre muchos otros beneficios que no pueden ser alcanzados con plantaciones forestales, a pesar de almacenar mayor cantidad de biomasa.

9 CONCLUSIONES

- El municipio de Pesca en Boyacá, funcionó como un territorio adecuado para el desarrollo y validación de la metodología para estimar la captura de carbono en sitios ideales para restauración ecológica, dadas las características de alto potencial para ofrecer servicios ecosistémicos y la susceptibilidad para el desarrollo de restauración ecológica.

- A partir del uso de imágenes satelitales se pudo corroborar que los índices espectrales son un buen insumo para conocer la biomasa de las coberturas vegetales, siempre y cuando se realicen procedimientos adecuados (procesamiento digital de imágenes), verificación estadística y supervisión con criterios técnicos. Algunas limitantes son la presencia de nubosidad y bruma en algunas escenas, sin embargo, es importante resaltar que se contaba con distintas imágenes de la misma zona, por lo cual fue posible hacer el ajuste de máscaras. Pueden existir limitaciones de la cobertura de imágenes en varios municipios, debido a que las imágenes disponibles fueron obtenidas o donadas para el IGAC, por lo tanto, es recomendable contar con la compra de escenas faltantes para cubrir la totalidad del territorio a evaluar.

- El empleo de herramientas estadísticas, información de campo y resultados de información secundaria, pudieron dar cuenta del funcionamiento adecuado de la metodología en un entorno de Sistemas de Información Geográfica, haciendo posible la comparación con estudios similares que validaron los resultados obtenidos.

- Se logró estimar el potencial de captura de carbono de las áreas óptimas a restaurar a través de imágenes satelitales, con el empleo de parcelas conocidas donde se han realizado actividades de reforestación con especies naturales de una manera efectiva sin necesidad de recurrir a costosos trabajos de campo. El análisis multitemporal puso en evidencia la gran capacidad de secuestro de carbono que tienen las áreas ideales de restauración ecológica del municipio y la posibilidad de aplicación en otras regiones del país siempre que se tenga disponible los registros de actividades de restauración.

- El análisis cuantitativo mostró que se podría capturar alrededor de 1.150.375,9 t CO_2 eq (=1,15 Mt CO_2eq) en los próximos 20 años, evidenciando la restauración ecológica como una oportunidad para contribuir significativamente a lo pactado en el Acuerdo de París (CMNUCC), en lo que Colombia aspira a una reducción de sus GEI en un 20%con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030 (Gobierno de Colombia, 2015).

- Fue posible crear una metodología para estandarizar los criterios de selección de áreas ideales de restauración ecológica, las reservas actuales de carbono y la visualización de escenarios futuros de captura de carbono, con la capacidad de replicación en otras regiones del país, respetando los parámetros de escala geográfica y temporal, pero con aplicabilidad en gran variedad de ecosistemas y regiones climáticas.

10 RECOMENDACIONES

- Es necesario obtener la totalidad de los insumos presentados para el adecuado desarrollo de la metodología para la estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica, respetando las escalas geográficas y temporales, las fuentes de información y los procedimientos presentados.

- Una adecuada estimación de carbono se debe realizar con una intensidad de muestreo con el menor nivel de error y la máxima confiabilidad posible, equilibrando de la mejor forma con las eventualidades del establecimiento de parcelas en campo, como logística y acceso a los predios donde se encuentren las coberturas a muestrear.

- Se debe dimensionar la heterogeneidad de las coberturas en términos de captura de carbono, teniendo presente el factor diferencial de biomasa según el rango altitudinal y ecosistémico con el fin de realizar una estimación válida del secuestro de carbono en escenarios futuros.

- Es recomendable contar con el apoyo multidisciplinario de expertos en SIG, estadísticos, técnicos y también de los campesinos, que son de gran importancia para conocer la historia de uso del suelo, la orientación en campo y el apoyo en labores de muestreo forestal.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía municipal de Pesca-Boyacá. (2018) Nuestro municipio. Recuperado de: http://www.pesca-boyaca.gov.co/municipio/nuestro-municipio.

Albán, E., y Granda, J. (2013).Determinación del contenido de carbono en la biomasa aérea del páramo de la Reserva Ecológica Yanacocha. Escuela politécnica nacional. Ecuador. Tesis de ingeniería civil y ambiental. 75.

Alexander, S., Nelson, C. R., Aronson, J., Lamb, D., Cliquet, A., Erwin, K. L.,y Hobbs, R. J. (2011). Opportunities and challenges for ecological restoration within REDD+. Restoration Ecology, 19(6), 683-689.

Álvarez, E., Saldarriaga, J.G., Duque, A.J., Cabrera, K.R., Yepes, A.P., Navarrete, D.A.,y Phillips, J.F. (2011) Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 26.

Anaya, J. (2009). Estimación mensual de emisiones por biomasa quemada para Colombia basado en imágenes de satélite. Universidad de Alcalá. Madrid, España. 181

Baccini A., W., Walker, L., Carvahlo, M., Farina, D., Sulla-Menashe, R., y Houghton. (2015). Tropical forests are a net carbon source based on new measurements of gain and loss. In review. Accessed through Global Forest Watch Climate on [2016], 5962(September), 1–11.

Banco Mundial (2018). Emisiones de CO2 (Tonelas metricas per capita).Centro de Análisis de Información sobre Dióxido de Carbono, División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (Tennessee, Estados Unidos).Recuperado de: https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC

Benayas, J. M. R., Newton, A. C., Diaz, A., y Bullock, J. M. (2009). Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. Science, 325(5944), 1121–1124. https://doi.org/10.1126/science.1172460

Cairns, M.A., Brown, s, s., Helmer, E.H.,y Baumgardner, G. (1997). Root Biomass allocation in the world supland forests.*Oecologia*, 111(1).1–11.

Ceccon, E. (2013). Restauración en Bosques Tropicales: Fundamentos Ecológicos, Prácticos y Sociales. UNAM-Diaz de Santos. México.289.

Chazdon R.L. (2003) Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 51- 71.

Clerici, N., Rubiano, K., Abd-elrahman, A., Posada Hoestettler, J., y Escobedo, F. (2016). Estimating aboveground biomass and carbon stocks in periurban Andean secondary forests using very high resolution imagery. *Forests*, 7(7). 138.

Daily, G. y Ehrlich, P. (1995). Preservation of biodiversity in small rainforest patches: rapid evaluation using butterfly trapping. *Biodiversity and Conservation*. 35-55.

DANE (2018). Resultados preliminares Censo Nacional de población y vivienda. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

Recuperado en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

Eggleston, S., Buendia, L., y Miwa, K. IPCC. (2006).guide lines for national green house gas inventories. Recuperado de: waste. Kanagawa, JP: Institute for Global Environmental Strategies.

FAO. (2018). El estado de los bosques del mundo, las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Recuperado de: http://www.fao.org/state-of-forests/es/

Galindo, G., Cabrera, E., Vargas, D., Pabón, H., Yepes, A., Phillips, J. F.,y Ordoñez, M. F. (2011). Estimación de la biomasa aérea usando datos de campo e información de sensores remotos Versión 1.0.

Gobierno de Colombia (2015). INDC - Colombia. Recuperado de: http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Colombia%20First/Colombia%20iNDC%20Unofficial%20translation%20Eng.pdf

Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., Den Elzen, M., y Penman, J. (2017). The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change*, *7*(3), 220–226.

Guevara S., Laborde J. y Sánchez-ÍOS G. (2004). La fragmentación. En: Los Tuxtlas: el Paisaje de la Sierra, Instituto de Ecología, A.C. y Unión Europea, Xalapa, Veracruz. 111-134.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., y Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853.

Houghton, R., Hall, F., y Goetz, S. (2009). Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*:*Biogeosciences*. 114.

Houghton, R. (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. Current Opinions in *Environmental Sustainability*, 597-603.

Kissinger, G. (2011). Linking Forests and Food Production in the REDD+ Context, (1), 9–10.

Kumar, L., y Mutanga, O. (2017). Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9).1– 8.

Laurance, W., y Bierregaard, R. (1997). Tropical Forest Remnants: Ecology, Management and Conservation of Fragmented Communities. University of Chicago Press.

López de Ullibarri, I., y Pita, S. (1999) Medición de concordancia: Índice de Kappa. Cad Aten Primaria, (6), 169-171.

MADS. (2015). Plan Nacional de Restauración. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/PLAN_NACIONAL_DE_RESTAURACIÓN_2.pdf

MADS. (2017). Estrategia integral de control a la deforestación y gestión de los bosques en Colombia (EICDGB). Recuperado de: https://redd.unfccc.int/files/eicdgb_bosques_territorios_de_vida_web.pdf

Murcia, C., y Guariguata, M. (2014). La restauración ecológica en Colombia: Tendencias, necesidades y oportunidades.Documentos Ocasionales 107. Bogor, Indonesia: *CIFOR*.

Olander, L. P., Gibbs, H. K., Steininger, M., Goetz, S. J., Hansen, M., Houghton, R. A., Stibig,H.J. (2007). Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environ. Res*. Lett, 2, 45022–11.

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., … Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988–993.

Phillips, J., Duque, J., Yepes, P., Cabrera, R., García, C., Navarrete, A., Álvarez, E., y Cárdenas, D. (2011). Estimación de las reservas actuales 2010 de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales –-. Bogotá D.C., Colombia. 68.

Posada, E. (2004). Conceptos Básicos de Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá.

Quintero, C. y Ariza, J. (2016). Cuantificación del poder calorífico de los bosques de Cundinamarca para el uso de energías alternativas. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Colombia. 64.

Silver, W., Ostertag, R., y Lugo, A. (2000). The Potential for Carbon Sequestration through Reforestation of Abandoned Tropical Agricultural and Pasture Lands. *Restoration Ecology*. 8(4). 394 – 407.

Society for ecological restotation (SER).(2004). International primer on ecological restoration. Versión 2. Recuperado de: http://www.ser.org/resources/resources-detail-view/ser-international-primer-on- ecological-restoration.

Thenkabailp, S. (2015). Land resources monitoring, modeling, and mapping with remote sensing. *CRC Press.*

Thomas, S.C., y Martin, A.R. Carbon content of tree tissues: A synthesis. Forests (2012). 3, 332–352.

Van der Werf, G. R., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., y Randerson, J. T. (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738.

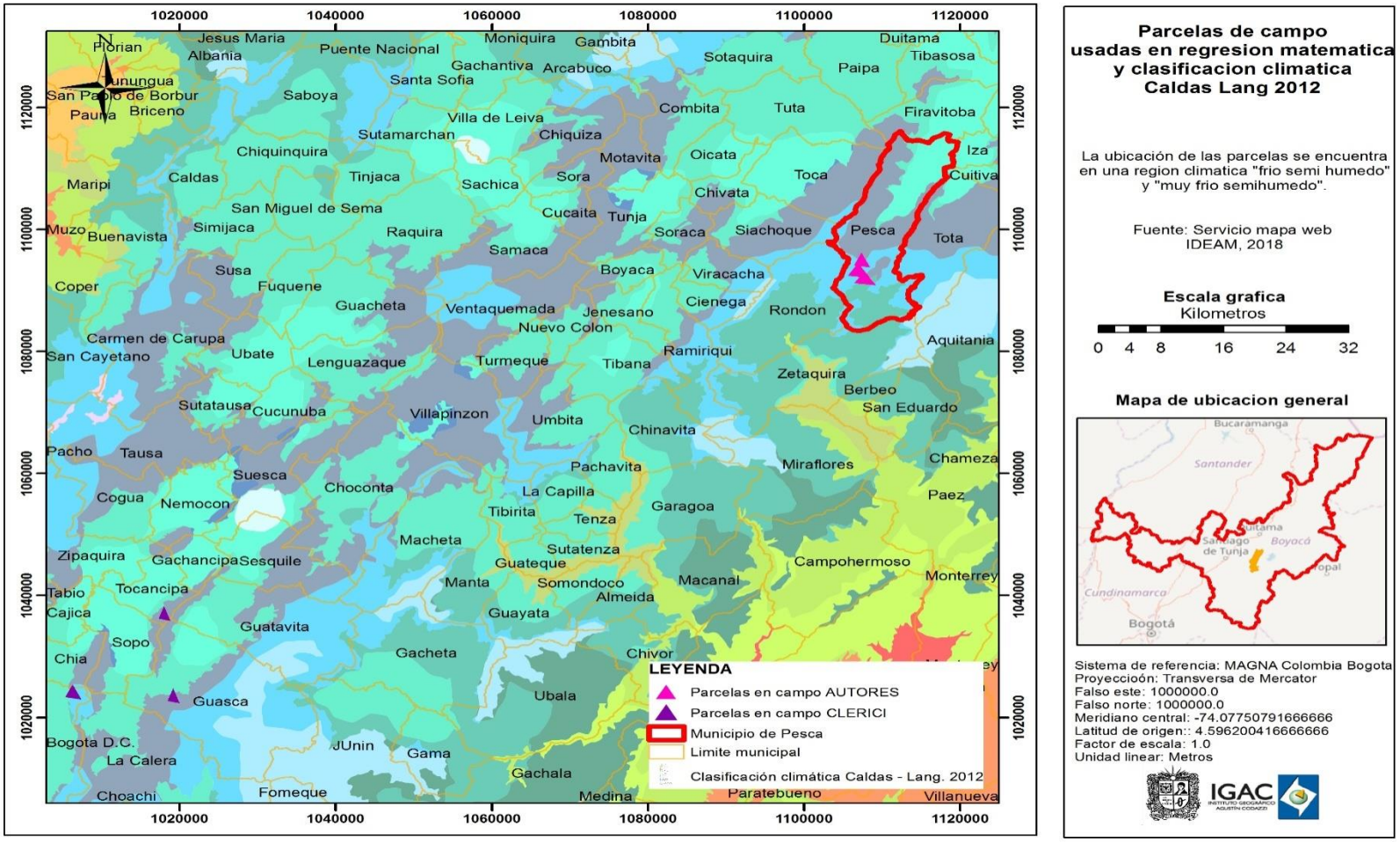
VARGAS O. Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2011.

Yepes, A.P., Navarrete, D.A., Duque, A.J., Phillips, J.F., Cabrera, K.R., Álvarez, E., García, y M.C., y Ordoñez, M.F. (2011). Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 162.

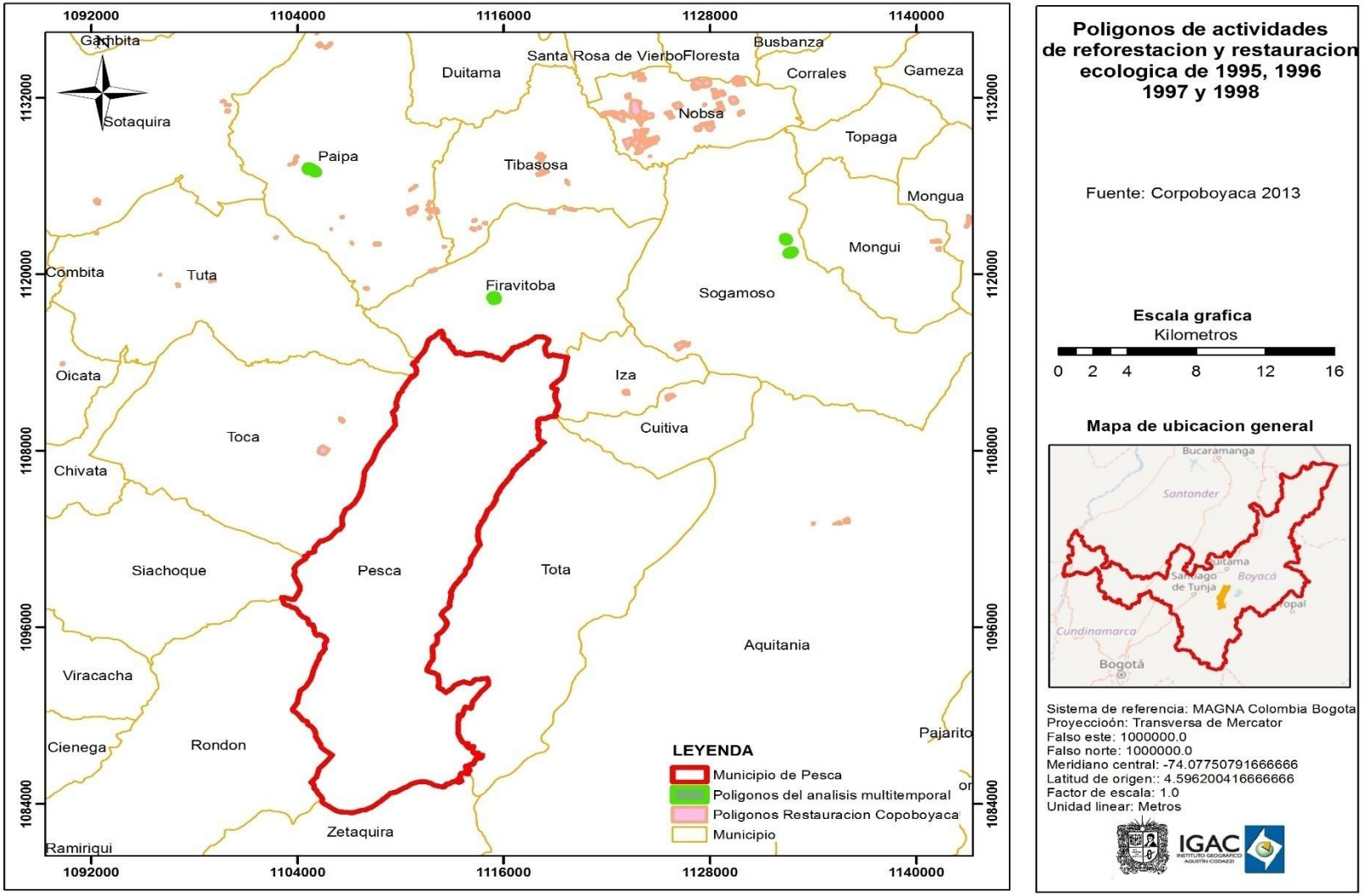
Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J., yRyu, S. (2004). Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, 93, (3). 402-411.

ANEXOS

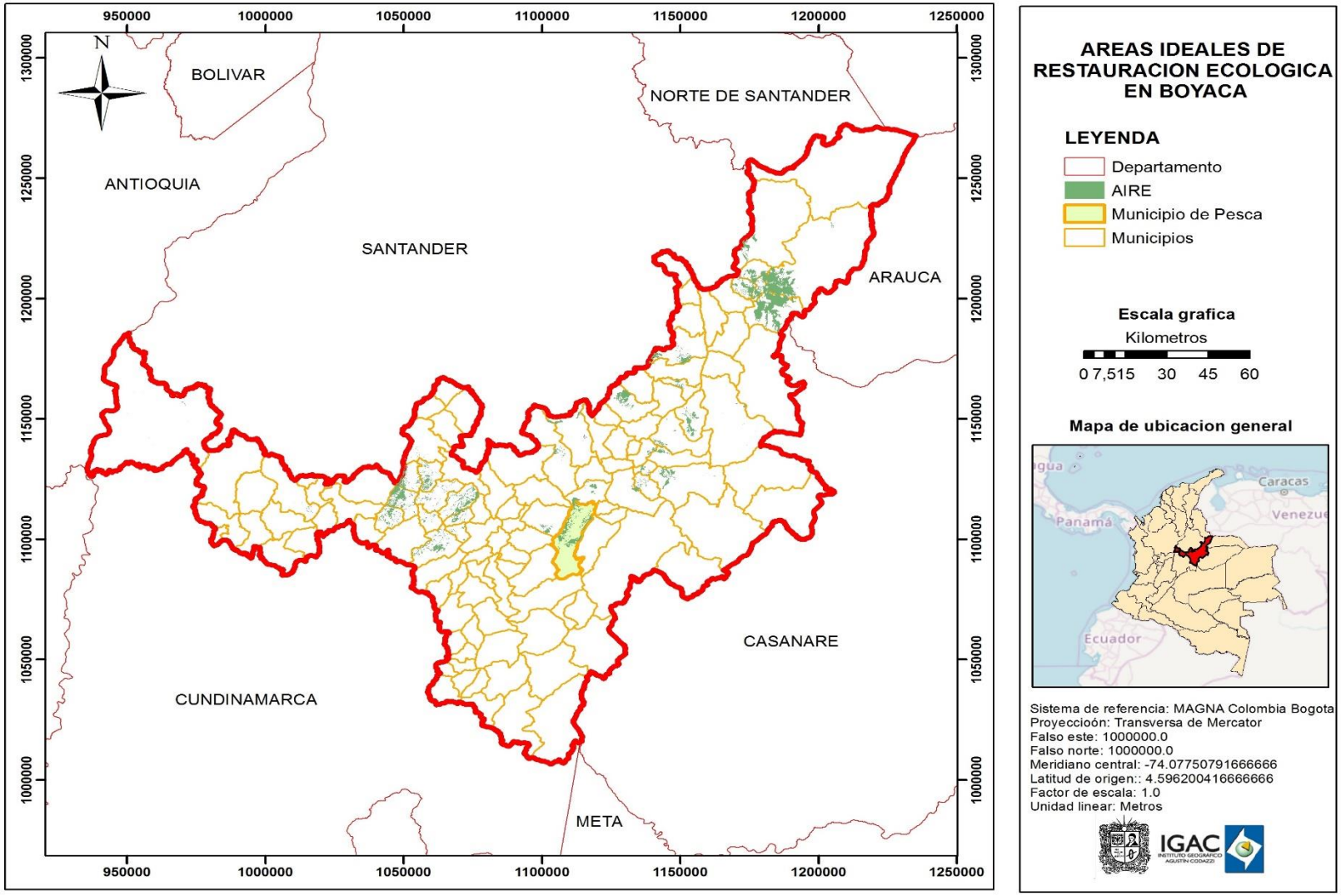
Anexo 1. Parcelas de campo



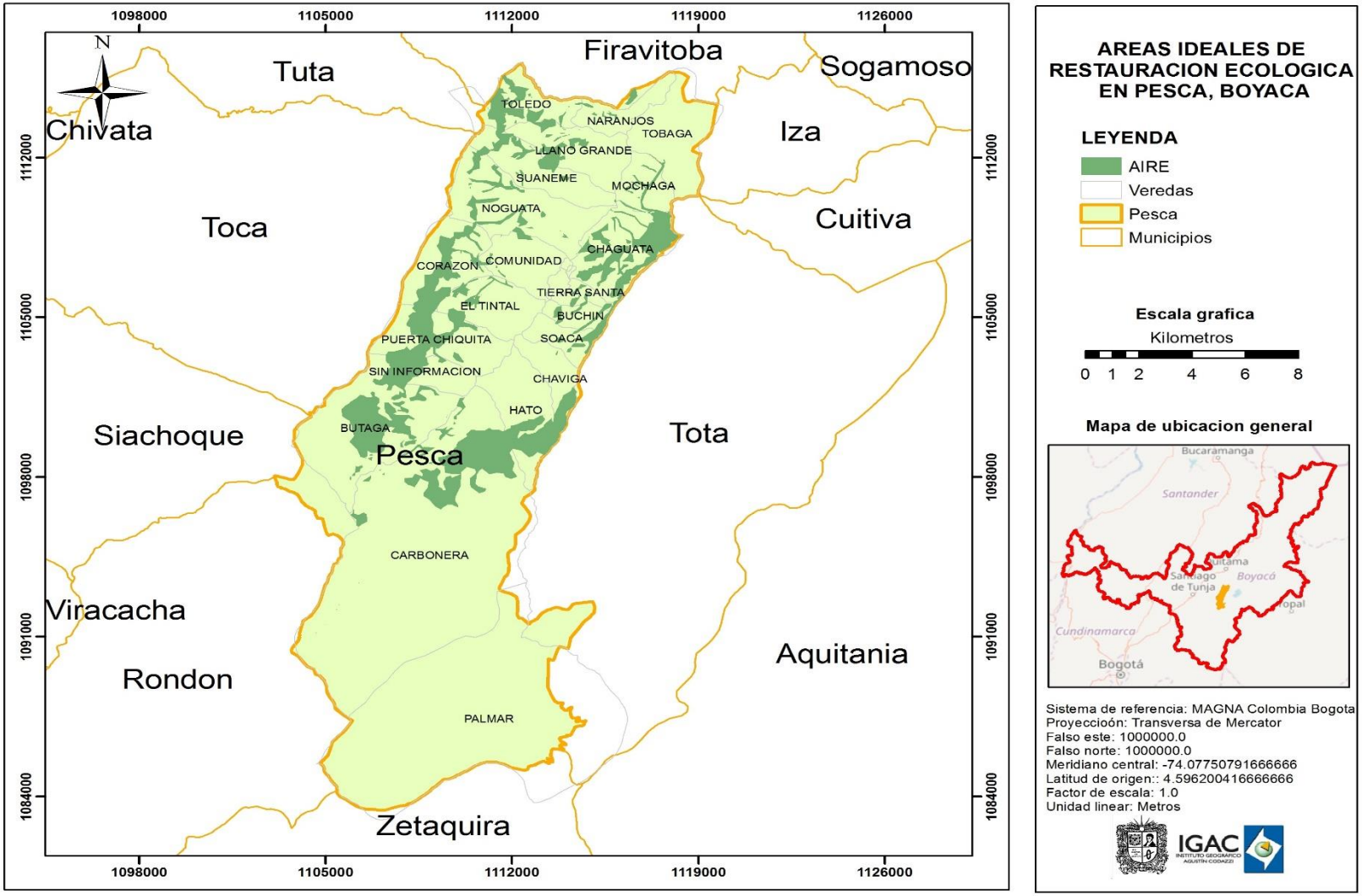
Anexo 2. Áreas restauradas en ecosistemas boscosas



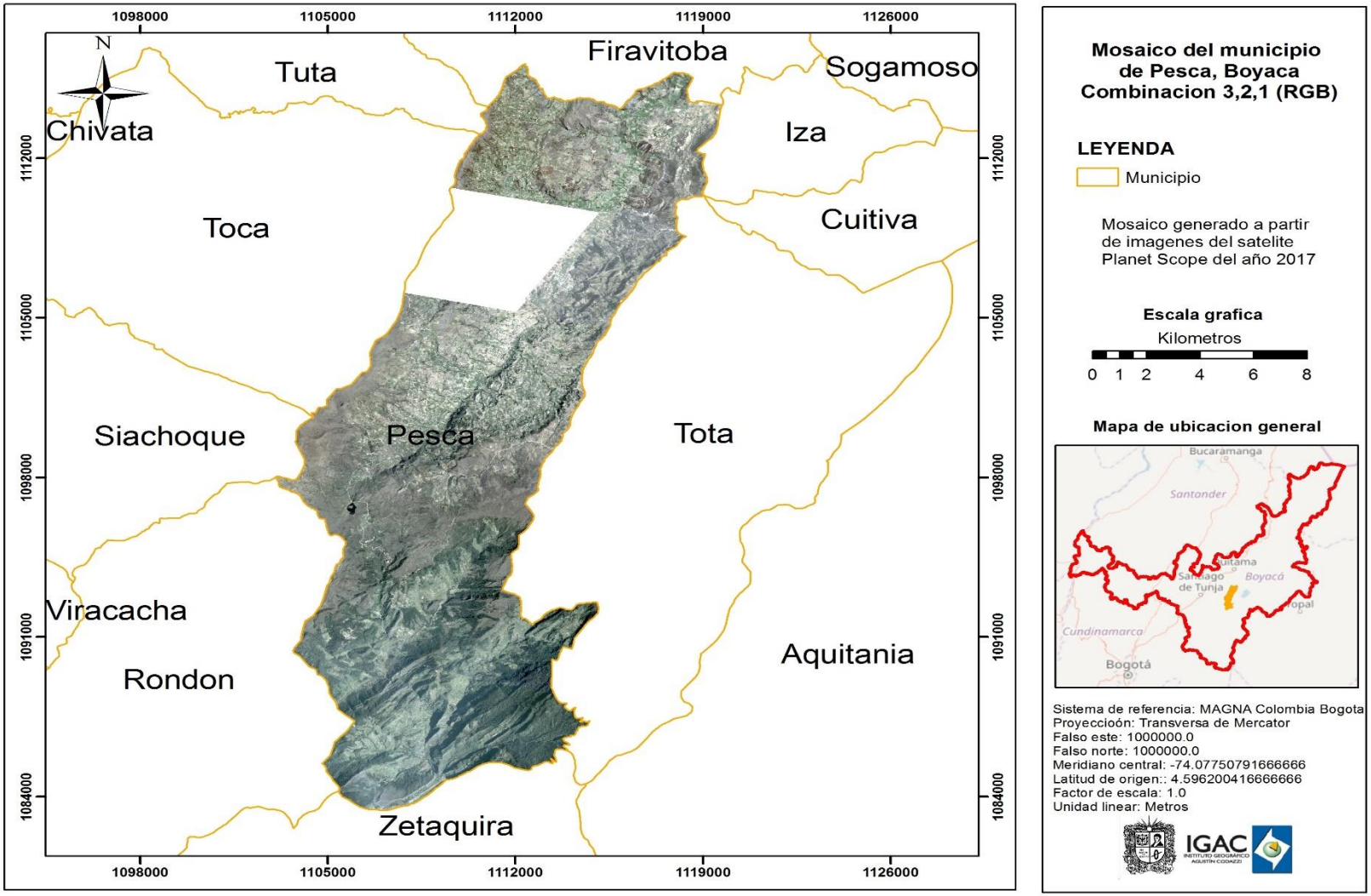
Anexo3. Áreas ideales de restauración ecológica en Boyacá



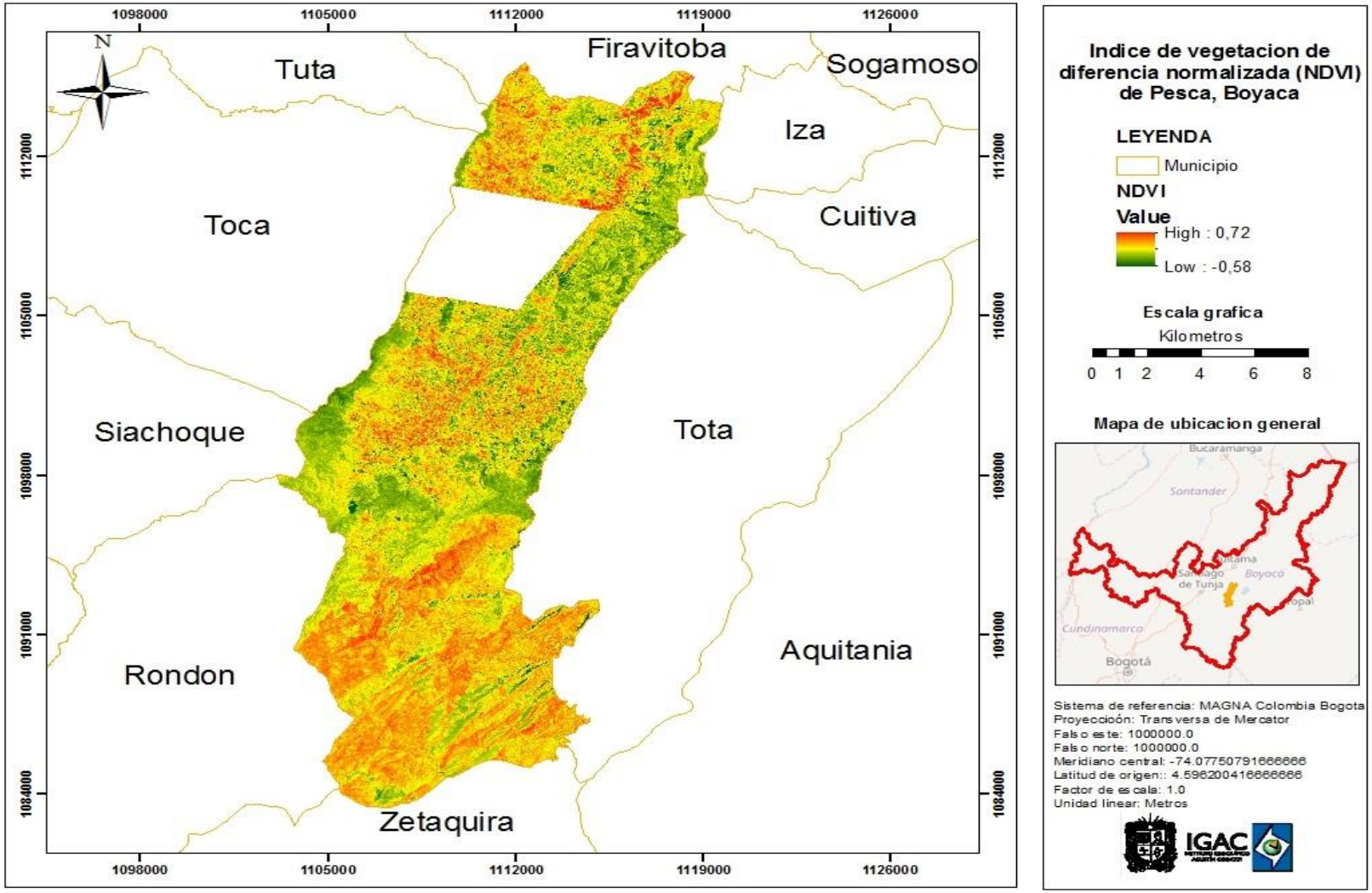
Anexo 4. Áreas ideales de restauración ecológica en Pesca, Boyacá



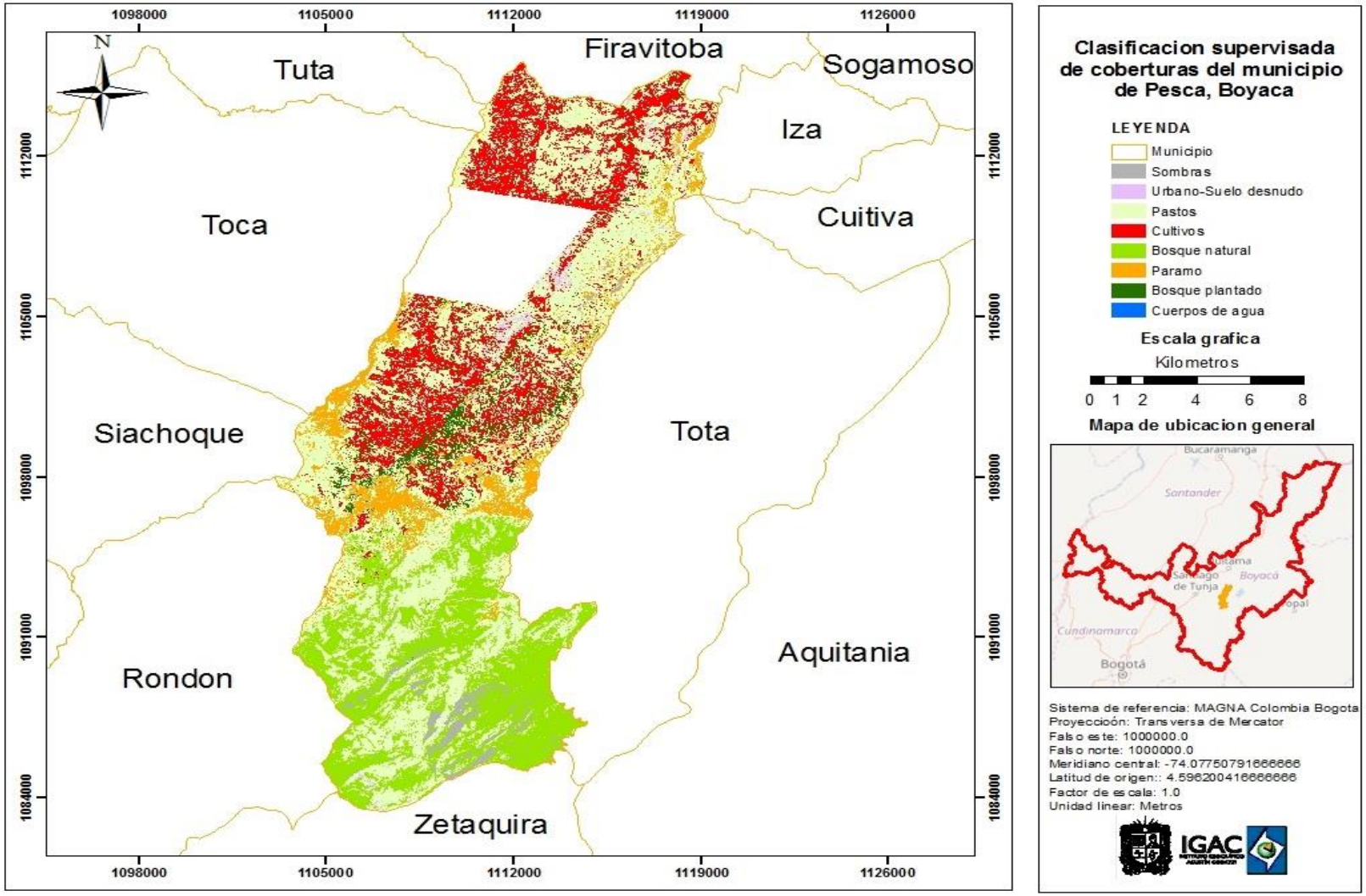
Anexo 5. Mosaico del municipio de Pesca, Boyacá



Anexo 6. NDVI del Municipio de Pesca, Boyacá



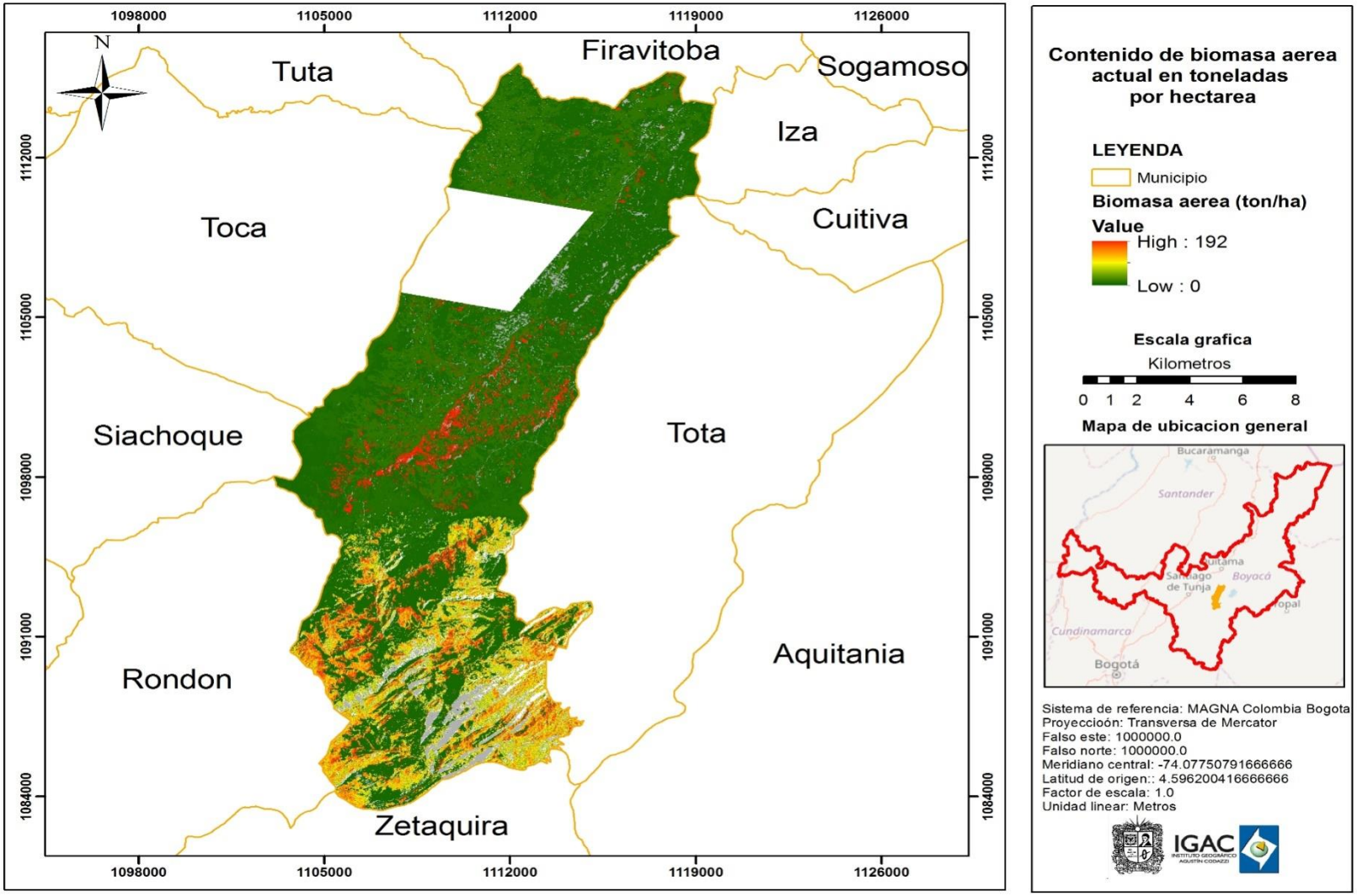
Anexo 7. Clasificación supervisada de coberturas del Municipio de Pesca, Boyacá



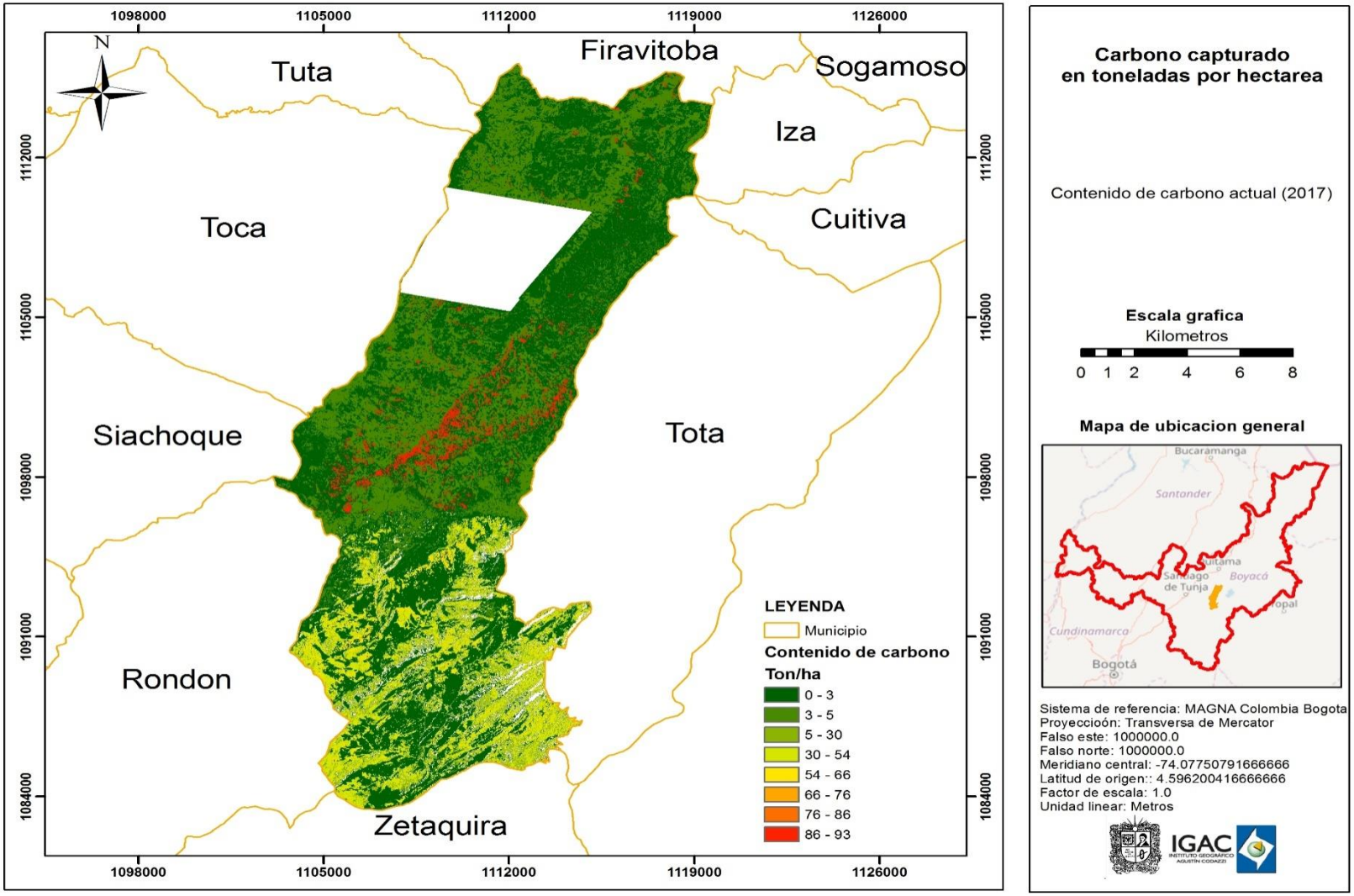
Anexo 8. Matriz de confusión, clasificación de coberturas

		IDEAM						TOTAL	Exactitud usuario	Error comisión	Marginales %
		11	23	24	31	32	51				
CLASIFICADA	11	13	0	1	0	1	0	15	86.67%	13.33%	12.50%
	23	3	16	4	0	5	0	28	10.71%	89.29%	23.33%
	24	2	1	16	2	0	0	21	9.52%	90.48%	17.50%
	31	0	0	1	15	3	1	20	0.00%	100.0%	16.67%
	32	0	1	2	0	7	0	10	0.00%	100.0%	8.33%
	51	0	0	0	1	1	4	6	0.00%	100.0%	5.00%
TOTAL		18	18	24	18	17	5	100			
Exactitud Productor		72.22 %	0.00%	4.17%	0.00%	5.88%	0.00%				
Error omisión		27.78 %	100.0%	95.83%	100.0%	94.12%	100.0%				
Marginales %		15.00 %	15.00%	20.00%	15.00%	14.17%	4.17%				

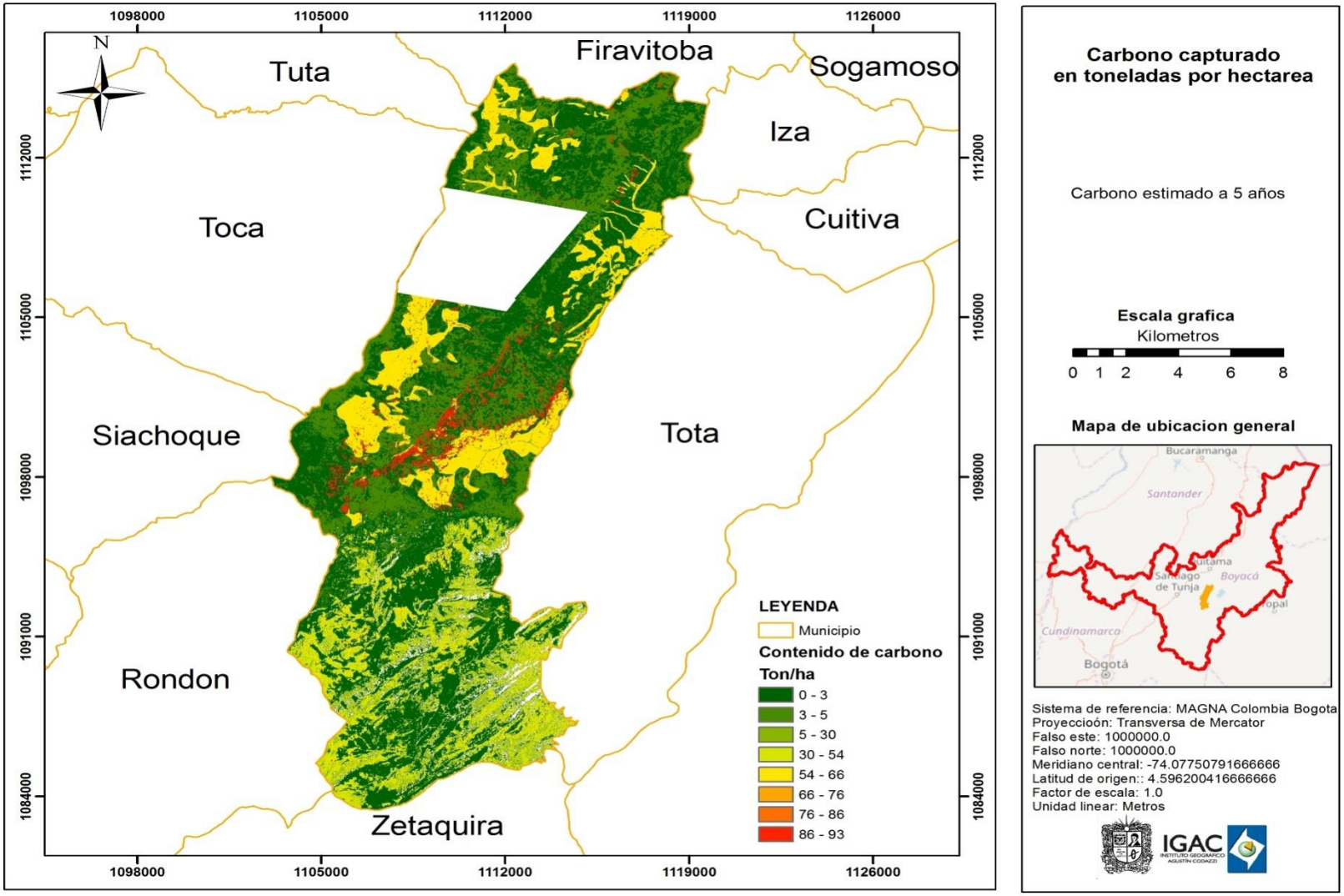
Anexo 9. Contenido de biomasa área actual



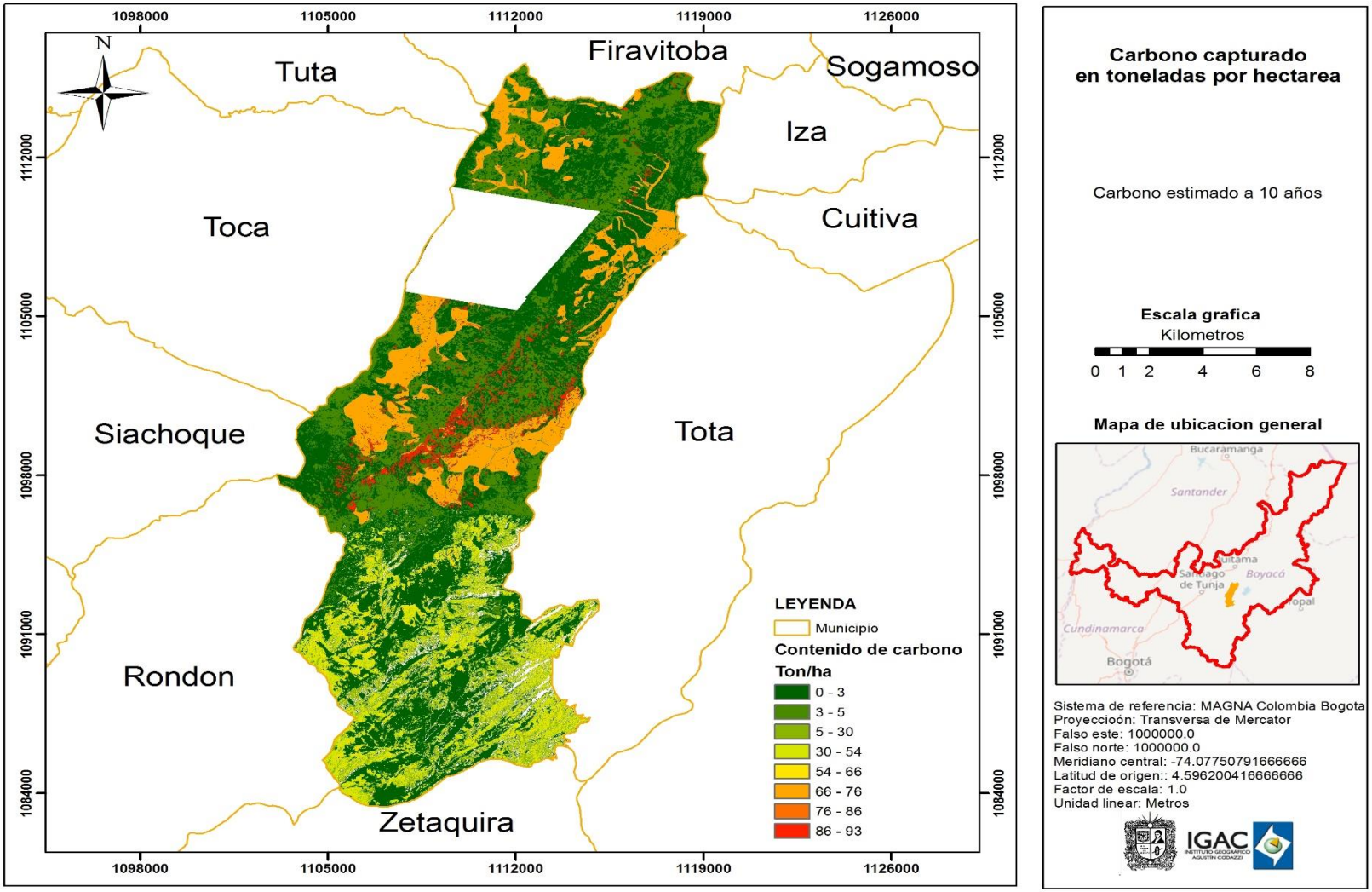
Anexo 10.Captura de carbono actual



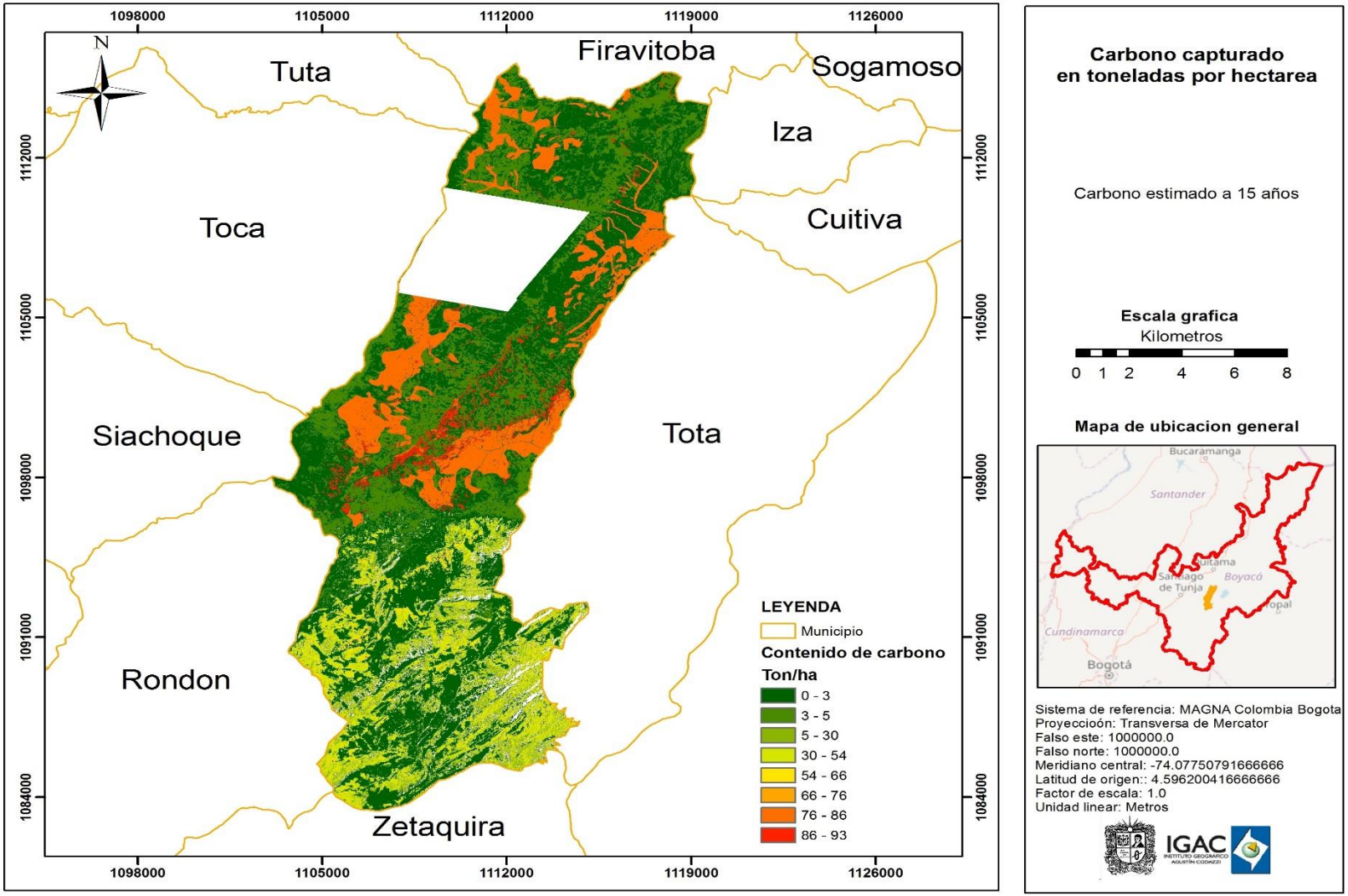
Anexo 11. Captura de carbono estimado en 5 años



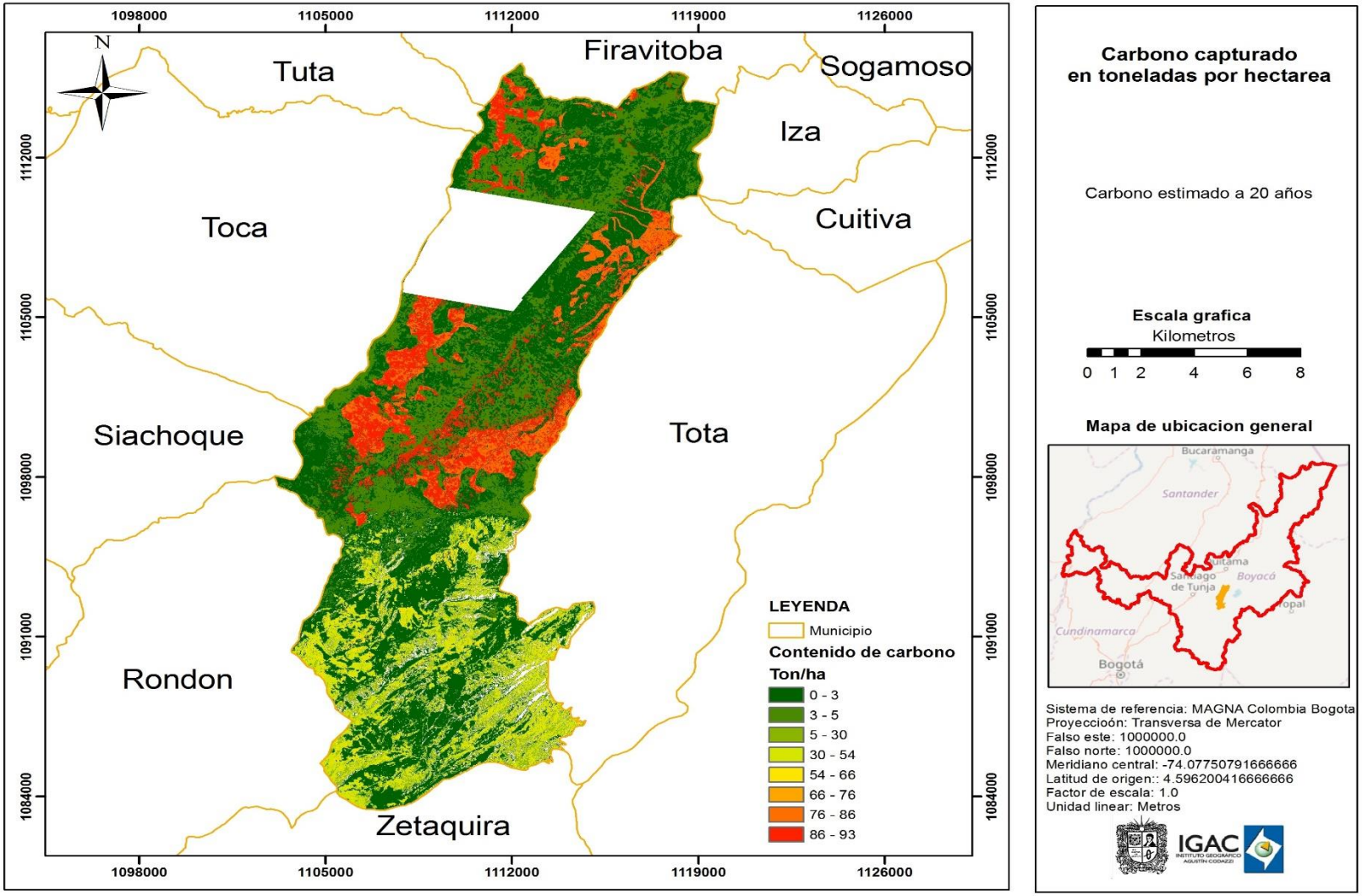
Anexo 12. Captura de carbono estimado en 10 años



Anexo 13. Captura de carbono estimado en 15 años



Anexo 14. Captura de carbono estimado en 20 años



Anexo 15. Ficha técnica imágenes PlanetScope

Satélite	Características	Descripción
PlanetScope	Altitud de orbita	400 km (51,6° inclinación)
	Cobertura latitud	+/- 52°
	Tipo de sensor	Imagen de tres o cuatro bandas con filtro en IRC
	Bandas espectrales	Azul 455-515 nm
		Verde 500-590 nm
		Rojo 590-670 nm
		IRC 780-860 nm
	Resolución espacial	3,0 m (aprox.)
	Tamaño de escena	24,6 km x 6,4 km (altitud de referencia 475 km)
	Tiempo de revisita	Variable
	Profundidad del bit	12-bit (DN), 16-bit (Radiancia)

Anexo 16. Ficha técnica imágenes Landsat

Satélite	Características	Descripción
Landsat	Altitud de orbita	705 km
	Bandas espectrales	Banda 1 azul: 0,45-0,52 nm
		Banda 2 verde: 0,52- 0,60 nm
		Banda 3 roja: 0,63-0,69 nm
		Banda 4 IRC1: 0,76-0,90 nm
		Banda 5 IRC2: 1,55-1,75
		Banda7 IRM: 2,08-2,35 nm
	Resolución espacial	30 m
	Tamaño de escena	185 km x 185 km
	Tiempo de revisita	16 días
	Profundidad del bit	8 bit