



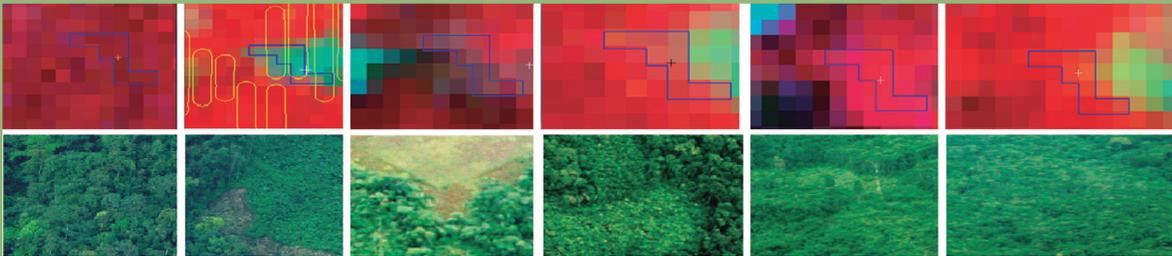
# UNODC

Oficina de las Naciones Unidas  
contra la Droga y el Delito



GOBIERNO DE COLOMBIA

## Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos SIMCI



Evaluación de la sucesión vegetal en  
áreas intervenidas por el programa de  
erradicación de cultivos ilícitos mediante  
la aspersión aérea con glifosato

2012

## **AGRADECIMIENTOS**

Las siguientes organizaciones e individuos contribuyeron con la realización del censo de cultivos de coca en Colombia para el 2012 y a la preparación del presente informe:

### **Gobierno de Colombia:**

Ministerio de Justicia y del Derecho

Policía Nacional - Dirección Antinarcoóticos- DIRAN

Ministerio de Defensa Nacional

Ministerio de Relaciones Exteriores

Unidad Administrativa para la Consolidación Territorial UACT

Departamento para la Prosperidad Social DPS

Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC

Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales UAESPNN

### **UNODC:**

Bo Mathiasen, Representante en Colombia

Hyarold Leonardo Correa, Coordinador Técnico

Sandra Rodríguez, Experta en Procesamiento Digital

Orlando González, Experto en Procesamiento Digital

María Ximena Gualdrón, Ingeniera de Campo

Marye Saenz, Estadística

Omar Erbey Sotelo, Ingeniero de Soporte SIG

Zully Sossa, Experta en Procesamiento Digital

María Isabel Velandia, Experta en Procesamiento Digital

Martha Paredes, Experta en Investigación y Análisis

Juan Carlos Parra, Ingeniero de Edición

Hernando Bernal, Investigador Químico

Ana Donato, Química

Germán Andrés Clavijo Hincapié, Analista Junior en Procesamiento Digital

Jerson Andres Achicanoy, Ingeniero de Soporte SIG

Martha Luz Gutiérrez, Técnico en Apoyo Logístico e Investigación

A menos que se especifique otra, todas las gráficas de este Informe tienen como fuente el Gobierno de Colombia dentro del contexto del Sistema de Monitoreo apoyado por UNODC.

Fotografías: UNODC/SIMCI a menos que se especifique otra.

## TABLA DE CONTENIDO

ANTECEDENTES .....	3
OBJETIVOS .....	4
METODOLOGÍA .....	5
UNIDADES DE PAISAJE Y PROCESO DE SUCESIÓN VEGETAL .....	6
PAISAJES FISIAGRÁFICOS Y FORMAS DE OCUPACIÓN .....	9
FORMAS DE OCUPACIÓN .....	13
PAISAJES INTERVENIDOS POR EL PROGRAMA DE ERRADICACIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS CON GLIFOSATO .....	14
CAMBIOS DE USO Y COBERTURA EN LAS ÁREAS INTERVENIDAS POR PECIG. ....	15
SERIE HISTÓRICA DE ASPERSIONES 2003 – 2011 .....	16
ÁREA AFECTADA POR LA ASPERSIÓN .....	17
PROCESOS DE SUCESIÓN VEGETAL .....	18
DEFORESTACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	20
RELACIÓN ENTRE SUCESIÓN VEGETAL E ÍNDICES ESPECTRALES .....	22
LOS ÍNDICES ESPECTRALES .....	23
<i>Comportamiento espectral de la vegetación y suelo</i> .....	23
<i>Índices de vegetación</i> .....	24
<i>Aplicabilidad al caso</i> .....	25
LA BÚSQUEDA DE UNA REPRESENTACIÓN DEL FENÓMENO .....	26
CRITERIOS DE RESTRICCIÓN E INCLUSIÓN .....	26
BLOQUEOS .....	26
VARIABLES DE CONTROL O COVARIABLES .....	27
<i>Factor de intervención o tratamiento</i> .....	27
<i>Temporalidad</i> .....	28
<i>Experimento</i> .....	28
LOS VALORES RELATIVOS VS. LOS VALORES ABSOLUTOS .....	29
<i>La vecindad: variable de homogeneidad</i> .....	32
<i>Variables de comparabilidad</i> .....	32
<i>Topografía</i> .....	32
<i>Corrección atmosférica</i> .....	33
<i>Georreferenciación</i> .....	33
LAS UNIDADES DE ANÁLISIS ESPACIAL (CASOS-CONTROLES) .....	35
ZONAS ESPECTRALMENTE HOMOGÉNEAS: LA SEGMENTACIÓN .....	35
PERÍODOS DE ANÁLISIS .....	36
CONSTRUCCIÓN DE PERFILES Y EVALUACIÓN DE LA SIGNIFICANCIA EN LAS DIFERENCIAS .....	39
<i>Análisis de perfiles</i> .....	40
<i>Análisis de perfiles paisaje-caso-control</i> .....	43
CONCLUSIONES .....	49
ANEXO 1 .....	50
ANEXO 2 .....	51
ANEXO 3 .....	52
BIBLIOGRAFÍA .....	53

## ANTECEDENTES

En el marco de la medición de la producción de cocaína en Colombia, el proyecto SIMCI ha desarrollado una gran cantidad de experiencia en teledetección. Las imágenes de satélite permiten además de identificar los cultivos de coca, evaluar los cambios en el paisaje; desde 2001 SIMCI ofrece a sus usuarios información sobre la dinámica de las coberturas en las zonas afectadas por la presencia de cultivos de coca mediante análisis multi-temporales en los que se describen los cambios del paisaje. El ejercicio de monitoreo de cultivos de coca ha permitido coleccionar un juego anual de imágenes satelitales de todo el territorio colombiano durante 11 años; estas imágenes corresponden al mismo periodo del año y están tan libres de nubes como es posible.

En Colombia se implementó el PECIG (Programa de Erradicación de cultivos ilícitos por aspersión aérea con Glifosato) en 1994, con el objetivo de: “*erradicar forzosamente los cultivos de coca y amapola en Colombia por medio la aspersión aérea con Glifosato a través de tres fases integradas: detección, aspersión y verificación*”. El PECIG cuenta con un plan de manejo ambiental y su efecto sobre el área sembrada con coca es evaluado por medio de un protocolo de verificación aérea<sup>1</sup> generado a partir de una carta de entendimiento entre los Gobiernos de Colombia y Estados Unidos. La verificación aérea ofrece estimaciones relativas a “la eficiencia de las aspersiones en la erradicación de cultivos ilícitos (muerte efectiva de plantas de *Erythroxylum spp.*)”<sup>2</sup>. La verificación ofrece además datos complementarios acerca del estado productivo de los lotes asperjados, las coberturas vegetales, los cuerpos de agua y las construcciones presentes en los lotes asperjados objeto de evaluación.

El plan de manejo ambiental del PECIG establece la sucesión vegetal como una de las variables objeto de monitoreo ambiental; hasta el momento el análisis multi-temporal de coberturas que realiza SIMCI cada año ha sido utilizado para la medición de esta variable; sin embargo, debido a que el análisis multi-temporal no se focaliza en áreas asperjadas, el efecto de la aspersión sobre la sucesión vegetal es aún incierto.

En el marco del Plan de Acción SIMCI 2011 se presentó una alternativa metodológica basada en los principios de la percepción remota para solucionar la incertidumbre mencionada, como un nuevo aporte del proyecto SIMCI en busca de mejorar el marco de referencia del Comité Técnico Interinstitucional en cuanto a las dinámicas ambientales en las áreas afectadas por los cultivos de coca. El Plan de acción SIMCI 2012 considera la implementación a nivel piloto de la metodología propuesta.

---

<sup>1</sup> RESOLUCIÓN 0013 - 27/06/2003 por la cual se adopta un nuevo procedimiento para el Programa de Erradicación de Cultivos Ilícitos en: [www.dne.gov.co/recursos\\_user/.../Resoluciones/resolucion\\_%200013.doc](http://www.dne.gov.co/recursos_user/.../Resoluciones/resolucion_%200013.doc)

<sup>2</sup> Tercera versión del protocolo para la calificación de los indicadores determinados en la verificación para la evaluación de la eficacia de las operaciones de aspersión de cultivos ilícitos.

## OBJETIVOS

El estudio pretende, a nivel de proyecto piloto, caracterizar la sucesión vegetal en áreas intervenidas por el PECIG a través del monitoreo de los índices espectrales en una serie histórica y determinar si la intervención del PECIG ha generado algún tipo de impacto sobre ésta dinámica.

Los objetivos específicos son:

1. Identificar los paisajes en los cuales se han desarrollado actividades del PECIG.
2. Evaluar los cambios de uso y cobertura de las áreas intervenidas por el PECIG.
3. Evaluar la sucesión vegetal mediante la construcción de perfiles de índices espectrales de áreas
4. intervenidas por PECIG y su comparación estadística con perfiles de áreas no intervenidas por PECIG.

## METODOLOGÍA

El marco metodológico bajo el cual se desarrolla el proyecto piloto está sustentado en 3 pilares teóricos: La ecología del paisaje, la percepción remota y diseño experimental. En este marco, los territorios tienen características de relativa homogeneidad derivadas de la interacción del clima, suelo, material parental, relieve, hidrografía y avance sucesional. Dicha homogeneidad sería afectada por la presencia de factores modificantes exógenos (como la operación del PECIG) generando que territorios originalmente homogéneos se diferencien como resultado del factor modificante (Simmons, 2004). Por otra parte, la homogeneidad o heterogeneidad del territorio puede ser evaluada a partir de la manera como los elementos absorben o reflejan la luz solar (Jensen, 2000; Gilbert et al., 1997; Chuvieco, E, 2002); en este sentido el territorio puede ser evaluado a partir de la radiación electromagnética capturada por sensores. Finalmente, los territorios homogéneos pueden interpretarse como unidades de análisis a partir de las cuales se puede estructurar un grupo de datos cuya evaluación (a partir de un diseño experimental) permite caracterizar el fenómeno de interés.

## UNIDADES DE PAISAJE Y PROCESO DE SUCESIÓN VEGETAL

La ecología del paisaje, entendiéndose como el estudio del paisaje bajo una percepción holística, así que incluye todos sus componentes heterogéneos, patrones de distribución de los organismos y relaciones de los seres vivos e incorpora al hombre como un elemento más del conjunto a analizar, (Zonneveld, 1995); permite entender los procesos transformadores que modifican el paisaje y a su vez las condiciones para restablecer las condiciones iniciales, adaptarse o mudar permanentemente de estado.

El paisaje está “*compuesto por la totalidad de entidades físicas, ecológicas y geográficas que integran y son integradas, a su vez, por patrones y procesos humanos y naturales*”; dentro de una región de acuerdo a la geogénesis, las condiciones físico – químicas de los suelos y el clima (humedad y temperatura) se define la conformación de diferentes tipos de paisajes; al interior de estos se generan cambios y de acuerdo a sus características de formación, responden a los cambios o estímulos de manera diferente.

Estos cambios son definidos como perturbaciones; (Zonneveld, 1995) *las definen como un fenómeno discreto en el tiempo que altera las estructuras de los ecosistemas, de las comunidades y de las poblaciones, de manera que modifica el sustrato y el medio físico*. Estas perturbaciones son cambios que se producen en las estructuras por factores externos (bióticos o abióticos), no obstante la evolución tiende a reducir los efectos (degradación, modificación, pérdida del equilibrio) de estos cambios por medio de mecanismos de adaptación.

Variables como la amplitud, la dimensión, la frecuencia, el tiempo y la dispersión condicionan la respuesta del medio ante una perturbación; esta respuesta puede darse de manera natural, *sucesión o regeneración natural*, es decir por su dinámica interna; o de manera artificial, proceso denominado restauración, en el cual se define un proceso inducido de por el ser humano de manera intencional de imitación de la estructura, dinámica y diversidad original.

Cualquiera que sea el tipo de proceso de recuperación, artificial o natural, que se inicie en un ambiente que ha sufrido una perturbación existen ciertas barreras que condicionan la viabilidad de esté, sea en tiempo, presencia de las condiciones iniciales, diversidad y/o restauración de la dinámica.

### OBJETIVO 1

*Para el cumplimiento del Objetivo 1: Identificar los paisajes en los cuales se han desarrollado actividades del PECIG, se realizó un cruce espacial de cartografía temática acerca de 1. Unidades de paisaje y 2. Áreas intervenidas por el PECIG (2003-2009)*

*Para las unidades de paisaje se utilizó la cartografía temática*

*Por otra parte los registros de aspersión suministrados por la Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional correspondientes a la serie 2003-2011; se integraron verticalmente para construir un mapa de zonas intervenidas por el PECIG.*

## **OBJETIVO 2**

*Para el cumplimiento del Objetivo 2: Evaluar los cambios de uso y cobertura de las áreas intervenidas por el PECIG, se realizó el cruce espacial de las áreas intervenidas por PECIG con el mapa de coberturas SIMCI 2010. El cruce espacial refleja la situación actual de las áreas donde alguna vez se realizaron labores de aspersión en el periodo 2003 – 2010.*

*El ejercicio considera que la aspersión es un agente perturbador, que podría afectar la capacidad de los paisajes para iniciar procesos de sucesión vegetal; sin embargo, esta hipótesis no puede confrontarse en las zonas donde después de la aspersión se desarrollan actividades antrópicas.*

La evaluación realizada en las páginas siguientes, analiza los procesos de sucesión vegetal dado dentro de los paisajes existentes en la región Meta - Guaviare después de procesos de perturbación antrópica generados por las labores de aspersión con glifosato. Es importante advertir que si bien la aplicación del PECIG requiere una perturbación previa relacionada con la siembra de coca, el objetivo del estudio se centra en evaluar las posibles diferencias entre las áreas intervenidas por el PECIG y las no intervenidas.

En este escenario cualquier proceso de regeneración estará condicionado en primera instancia al *tipo de paisaje* en el cual se genere la perturbación; la génesis de cada uno de los tipos de paisajes existentes determinará la capacidad de este para generar una dinámica de recuperación, puesto que entran en juego factores como el tipo de suelo, el clima y el material parental.

Por otro lado, la *forma de ocupación del paisaje*, es otro condicionante definitivo en los procesos de sucesión vegetal, puesto que de este se desprenden varios elementos necesarios para saber si un proceso que se genera de manera natural permitirá una rehabilitación idónea del paisaje; elementos como la disponibilidad de material genético (semillas), la estructura física y química de los suelos, las actividades desarrolladas y/o los paisajes culturales emergentes, definen la capacidad del sistema para que de manera autónoma pueda recuperarse.

Estudios recientes sobre transformaciones del paisaje en la región de Meta – Guaviare realizados por el Proyecto SIMCI<sup>3</sup>, indican que las formas de ocupación del paisaje que se presentan con mayor participación en la zona son: puntas de colonización

con hidrografía vulnerable; espacios intermedios de praderización, deforestación y cultivos de coca; tierras firmes de bosque denso y Valles inundables con afloramientos rocosos.

Teniendo en cuenta esto se puede afirmar que aquellos paisajes donde la forma de ocupación marque una baja intervención antrópica (por ejemplo, puntas de colonización o bosques densos) y aún se mantengan parches o relictos del ecosistema inicial, por ejemplo de bosque en estado primario, los procesos de sucesión vegetal se darán en un menor tiempo pues se cuenta con material genético disponible, la compactación de los suelos no es tan alta y quizá en algunos casos la perturbación haya sido solo en un momento durante la serie histórica, por lo cual no estaría tan expuesto a los efectos de dicha perturbación. En otros casos, donde hay una mayor exposición a una perturbación y se han generado formas de ocupación con una mayor actividad

<sup>3</sup> Transformación socioeconómica y biofísica asociada con cultivos ilícitos en la región Sur del Meta-Guaviare 1990-2009, Embajada de la República Federal de Alemania, Ministerio de defensa Nacional, y Proyecto SIMCI/ UNODC 2010

antrópica, asegurar los flujos del paisaje y la conectividad es un proceso de mayor complejidad, puesto el nivel de degradación impide retornar al ecosistema original.

Para el presente estudio es particularmente importante el efecto que los agentes perturbadores (específicamente la operación del PECIG) puede tener sobre la capacidad del territorio para iniciar procesos de sucesión vegetal.

Una de las limitaciones para realizar este tipo de evaluaciones radica en encontrar indicadores objetivos para la calificación del grado de avance de la sucesión vegetal; el método más utilizado consiste en realizar parcelas directamente en el campo para evaluar variables de biodiversidad, complejidad y biomasa. Este método tiene baja aplicabilidad en las áreas donde se desarrolla el PECIG.

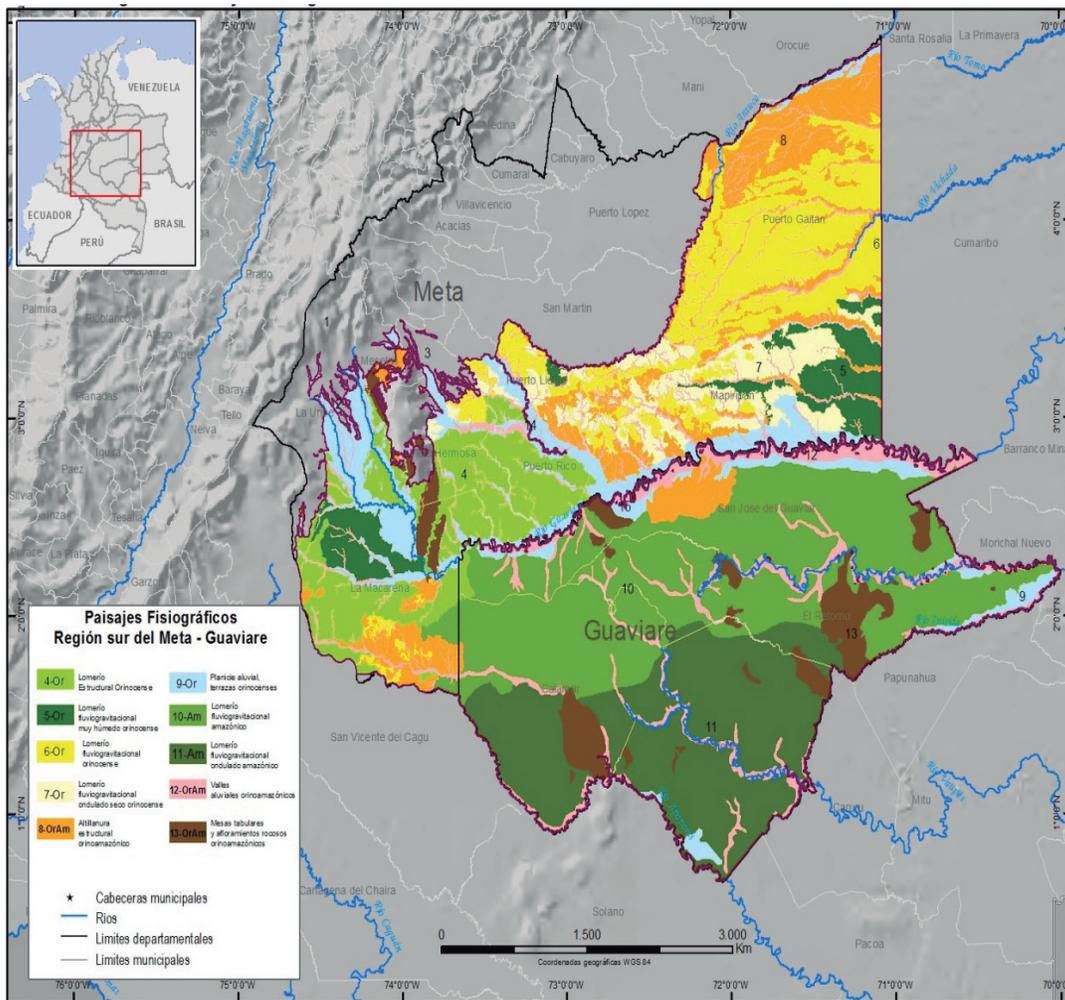
La percepción remota ofrece alternativas para la evaluación de este fenómeno. En particular la aplicación del álgebra de bandas ha sido utilizada para calificar el grado de avance de los procesos de sucesión vegetal.

## PAISAJES FISIAGRÁFICOS Y FORMAS DE OCUPACIÓN

Cada región del país está conformada por diferentes entidades físicas, ecológicas, geográficas y humanas que al compartir un mismo territorio definen tipos de paisajes con características y funcionalidades específicas y diferenciables entre sí.

La región Meta – Guaviare comprende tres regiones naturales, Andina, Orinoquia y Amazonia, (Instituto geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 2002) con 15 paisajes fisiográficos. La Región de estudio comprende 10 de de estos paisajes los cuales se caracterizan en general por su origen estructural, fluviogravitacional y aluvial.

Figura 1. Paisajes Fisiográficos de la región Meta Guaviare



**Tabla 1. Leyenda general de paisajes fisiográficos para el estudio de la transformación biofísica asociada con cultivos de coca en la región sur del Meta-Guaviare<sup>4</sup>**

Paisaje	Localización	Características de relieve y clima	Características de los suelos	Cultivos de coca año 2009 (ha)	Área paisaje (ha)
4 - Or Lomerío estructural orinocense	Municipios de La Macarena, Vista Hermosa y Puerto Rico, en áreas afuera y dentro de los Parques Naturales Macarena y Tinigua.	Relieve ondulado, pendientes 3-25%, laderas cortas, rectilíneas y ligeramente convexas, cimas planas y convexas concordantes. Afectados por escurrimiento difuso generalizado y concentrado.  Clima: Cálido muy húmedo	Profundos a superficiales, texturas medias a moderadamente finas, bien drenados, muy fuertemente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio, pedregosidad superficial sectorizada Grupo: Hapludox, Kandiuults, Dystropepts. Uso: Conservación en los parques naturales y en algunas zonas agroforestal, silvopastoril.	1.365 Ha Se ubican principalmente al sur del Río Güejar en el municipio de Puerto Rico	908.000
5 - Or Lomerío fluviogravitacional ondulado muy húmedo orinocense	Municipio La Macarena y Mapiripán	Relieve ondulado y quebrado, pendientes 7-50%, laderas medias ligeramente convexas y rectilíneas, cimas estrechas, alargadas. Disección ligera. Deslizamientos localizados y escurrimiento difuso generalizado. Clima: Cálido muy húmedo	Profundos a superficiales, texturas finas a moderadamente finas, bien a excesivamente drenados, fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio. Grupo: Hapludox, Hapludults, Dystropepts, Uso: Agroforestal	611 Ha Se ubican, principalmente, en Mapiripán en la zona del bosque denso	454.000
6 - Or Lomerío fluviogravitacional quebrado seco orinocense	Puerto Gaitán y sectores de Puerto Lleras.	Relieve quebrado, pendientes 7-25%, laderas medias y cortas rectilíneas y ligeramente convexas. Erosión laminar moderada y cárcavamiento remontante. Escurrimiento difuso. Clima: Cálido húmedo y seco	Profundos a superficiales, texturas variadas de finas a moderadamente gruesas, bien drenados, fuerte a muy fuertemente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio, muy susceptibles a la erosión. Grupo: Haplustults, Kandiuults, Haplustox, Hapludox, Uso: Pecuario y agroforestal	195 Ha Se ubican en Puerto Gaitán, Mapiripán y Vista Hermosa en los bosques de galería.	1.230.000

<sup>4</sup> Fuentes: IGAC. 2004. Mapa de Unidades del paisaje - Departamento del Meta. 2) IGAC. Zonas Agroecológicas. 3) UNODC/SIMCI. 2002, 2009. Mosaico de imágenes satelitales con las coberturas de la zona afectada por cultivos de coca en Meta-Guaviare

7 - Or Lomerío fluviogravitaciona l ondulado seco orinocense	Mapiripán y algunos sectores de Puerto Rico y Puerto Concordia.	Relieve ondulado, pendientes 7-12%, laderas cortas y medias, ligeramente convexas. Cimas redondeadas y estrechas. Erosión laminar ligera. Escurrimiento difuso generalizado.  Clima cálido húmedo y seco	Profundos, texturas moderadamente finas a gruesas, bien drenados, fuerte a muy fuertemente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio, susceptibles a la erosión Grupo: Haplustults, Kandiustults, Haplustox , Hapludox , Dystropepts. Uso: Pecuario y conservación del bosque	899 Ha Se ubican, principalmente, en Mapiripán en bosques de galería y deforestación del bosque denso.	536.000
8 - OrAm Altillanura estructural orinoamazónico	Se localiza en los municipios de La Macarena, Mapiripán, y Puerto Gaitán y en San José del Guaviare.	Relieve Plano a ondulado, pendientes 3-12% Escurrimiento difuso en los planos convexos  Clima: Cálido húmedo y seco	Profundos a superficiales, texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio, susceptibles a la erosión. Grupos:Haplustults, Haplustox , Hapludox, Dystropepts, Quartzipsamments Uso: Pecuario	654 Ha Se ubican en la altillanura cerca a San José del Guaviare y al sur del río Guaviare en la transición con el bosque denso amazónico.	1.031.000
9 - Or Planicie aluvial, terrazas orinocenses	Planicie aluvial de los ríos Duda, Guayabero, Ariari, Guaviare y Papunaua	Relieve plano a ligeramente ondulado, pendientes 0-7%; afectados por escurrimiento difuso generalizado.  Clima: Cálido húmedo a muy húmedo	Profundos, texturas medias a finas, bien drenados, extremada a fuertemente ácidos, fertilidad baja, toxicidad por aluminio en algunos sectores. Grupos: Hapludults, Kandiudults, Dystropepts Uso: Agrícola y de conservación en zonas de parques naturales.	994 Ha Se ubican en la cuenca baja de los ríos Guayabero y Ariari y en las terrazas de la planicie aluvial del Guaviare.	917.000
10 - Am Lomerío fluviogravitaciona l amazónico	Municipios del Guaviare	Relieve ligeramente ondulado.  Clima: Cálido húmedo	Suelos moderadamente profundos a superficiales, bien drenados, fuertemente ácidos, toxicidad por aluminio, fertilidad baja. Grupos: Hapludox, Dystrodepts. Uso: Agroforestal y conservación del bosque denso amazónico.	4.978 Ha Se ubican en las zonas de deforestación y praderización del ecosistema y a lo largo de la hidrografía de colonización	2.500.000
11 - Am Lomerío fluviogravitaciona l ondulado amazónico	Municipios del Guaviare	Relieve ondulado.  Clima: Cálido muy húmdeo	Suelos moderadamente profundos a superficiales, presencia de horizonte argílico, bien drenados, fuertemente ácidos, toxicidad por aluminio,	2461 Ha Se ubican en las zonas de deforestación y praderización del ecosistema y a lo largo de la hidrografía	1.693.000

			fertilidad baja. Grupos: Paleudults, Hapludults, Dystropepts. Uso: Agroforestal y conservación del bosque denso amazónico.	de colonización	
12 - OrAm Valles aluviales orinoamazónicos	Valles aluviales sujetos a inundación de los ríos Duda, Guayabero, Ariari, Guaviare, Inírida, Unilla, Itilla, Vaupés; Papunaua y Apaporís.	Relieve plano a ligeramente plano, pendientes 0-3%. Microrelieve plano-cóncavo con ligera inclinación hacia los taludes superiores; afectados por inundaciones y encharcamientos.  Clima: Cálido húmedo a muy húmedo	Superficiales a moderadamente profundos, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas, imperfecta a pobremente drenados, muy fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja, ligera toxicidad por aluminio, susceptibles a inundaciones y encharcamientos. Grupos: Tropofluvents Tropaquepts Dystropepts. Uso: Conservación	305 Ha Ocasionalmente se ubican en áreas dispersas de los valles, donde son mejores las condiciones de drenaje natural.	1.133.000
13 - OrAm Mesas tabulares y afloramientos rocosos orinoamazónicos	Afloramientos rocosos en la zona amazónica y en la Serranía de La Macarena.	Relieve inclinado a escarpado.  Clima: Cálido húmedo a muy húmedo	Superficiales a muy superficiales. Afloramiento rocoso (no suelo). Otros sectores presentan suelos superficiales, de texturas gruesas, bien drenados, fuertemente ácidos y de fertilidad baja. Grupos: Udorthents, Dystropepts. Uso: Conservación	16 Ha Se ubican en los valles estrechos de estos paisajes.	506.000

## FORMAS DE OCUPACIÓN

En la Región se pueden reconocer formas de ocupación del paisaje generadas por el establecimiento del ser humano en diferentes áreas del territorio, éste modifica el paisaje y crea nuevos paisajes que se pueden definir como culturales. Para el año cero del estudio (1990) el mayor porcentaje del territorio era ocupado por tierras firmes de bosque denso (54%), para el año 2009 casi dos décadas después, el bosque denso predominaba aún en la región, sin embargo el área disminuyó cerca de un 10%.

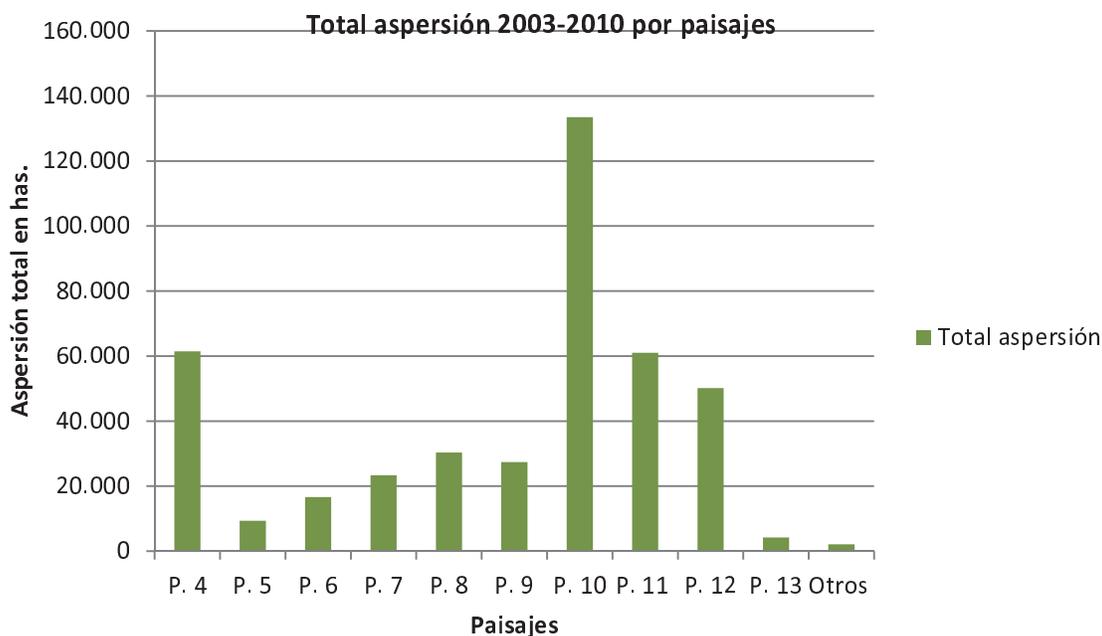
El porcentaje de disminución identificado dentro de la categoría tierras firmes de bosque denso en 2009 se compensa de manera relativa con el aumento de dos formas de ocupación para el mismo periodo, espacios de ruralización y espacios intermedios de praderización, deforestación y cultivos de coca; estas formas son resultado de un proceso de colonización y la consecuente ruralización (praderización, ampliación de la frontera agrícola, asentamientos humanos, desarrollo de infraestructura) de áreas ubicadas principalmente al sur de la región (La Macarena y Puerto Rico en el Meta y San José del Guaviare, El Retorno y Miraflores en el Guaviare).

**Tabla 2. Formas de ocupación del paisaje**

<i>Tipo de ocupación</i>	<i>Área (ha) 1990</i>	<i>% de área 1990</i>	<i>Área (has) 2009</i>	<i>% de área 2009</i>
Espacios de ruralización	215.786	2%	1.045.717	9%
Espacios intermedios de praderización, deforestación y cultivos de coca	1.780.871	15%	1.481.576	13%
Puntas de colonización en hidrografía vulnerable	na	0%	793.700	7%
Tierras firmes de bosque denso	6.265.485	54%	4.993.236	43%
Piedemonte y altillanura sin afectación por cultivos de coca	2.235.430	19%	2.204.876	19%
Valles inundables y afloramientos rocosos	1.173.080	10%	1.149.097	10%
<b>Total</b>	<b>11.670.652</b>	<b>100%</b>	<b>11.668.202</b>	<b>100%</b>

*Transformación socioeconómica y biofísica asociada con cultivos ilícitos en la región Sur del Meta-Guaviare 1990-2009*

## PAISAJES INTERVENIDOS POR EL PROGRAMA DE ERRADICACIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS CON GLIFOSATO



*Aspersión aérea vs paisajes intervenidos*

Los 10 paisajes presentes en el área de estudio fueron intervenidos por el PECIG durante los años 2003 y 2010.

**Tabla 3. Aspersión por tipo de paisaje**

<b>Tipo de Paisaje</b>	<b>Total aspersión</b>	<b>% del total</b>
Lomerío estructural orinocense (4)	61.485	14,65
Lomerío fluviogravitacional muy húmedo orinocense (5)	9.335	2,22
Lomerío fluviogravitacional orinocense (6)	16.666	3,97
Lomerío fluviogravitacional ondulado seco orinocense (7)	23.338	5,56
Altilanura estructural orinoamazónico (8)	30.342	7,23
Planicie aluvial, terrazas orinocenses (9)	27.417	6,53
Lomerío fluviogravitacional amazónico (10)	133.476	31,81
Lomerío fluviogravitacional ondulado amazónico (11)	61.011	14,54
Valles aluviales orinoamazónicos (12)	50.178	11,96
Mesas tabulares y afloramientos rocosos orinoamazónicos (13)	4.236	1,01
Otros paisajes (0)	2.132	0,51
<b>Total general</b>	<b>419.612</b>	<b>100</b>

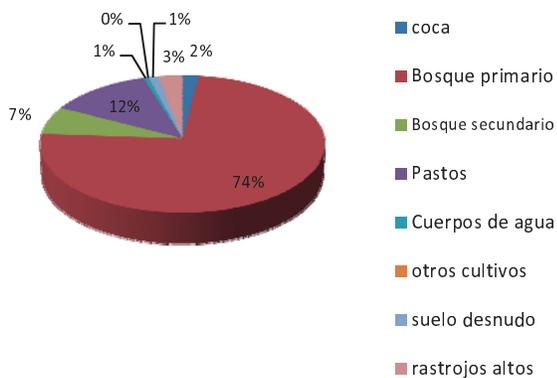
La máxima aspersion se dá en el paisaje 10 que corresponde a “Lomerío fluvio gravitacional amazónico” con un 32% del total de la aspersion presentada para la región de estudio, y que comprende los municipios de Calamar, El Retorno y San José del Guaviare.

Con un 15 % cada uno le siguen los paisajes “Lomerío estructural orinocense”(4) y “Lomerío fluvio gravitacional amazónico (11)”. Estos se encuentran en los municipios de La Macarena, Vista Hermosa y Miraflores.

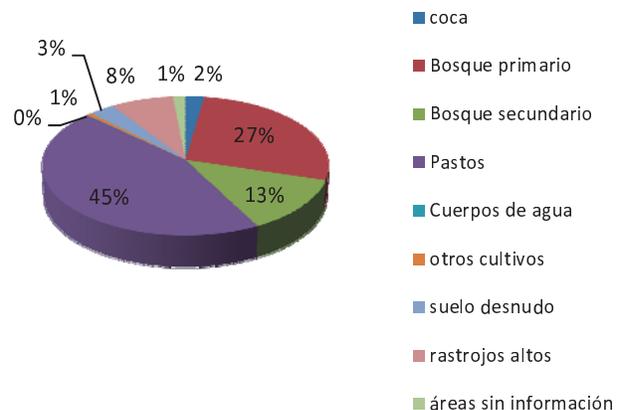
Es de notar que estos municipios han tenido una fuerte participación en el área sembrada con coca Nacional desde la década del 70. Igualmente dos de estos municipios (Vista Hermosa y La Macarena) formaron parte entre los años de 1999 y 2002 de la Zona de distensión y los mismos forman parte de la focalización del Plan de Consolidación Integral de la Macarena (PCIM).

### CAMBIOS DE USO Y COBERTURA EN LAS ÁREAS INTERVENIDAS POR PECIG.

Participacion de las coberturas 1990



Participacion de las coberturas 2010



Para el año 1990 la zona de estudio intervenida por el PECIG (2003-2010) estaba cubierta en un 74% de selvas densas y un 7 % de bosques secundarios o con algún grado de intervención para un total de cubrimiento de bosques del 81%. Del 19% restante, un 3% ya se hallaba sembrado por cultivos de coca con 3086 has. El panorama cambia para el 2010 encontrando solo un 45% en bosque primario o selva densa y un 13% en bosque secundario para un total en bosques de 58%. Siendo evidente el proceso de deforestación llevado a cabo en la zona. sin embargo, al observar la cantidad de cultivos de coca esta se incrementa en un 0.4 % aproximadamente conformando la estabilidad de la región cocalera en la zona.

## Cambio de cobertura en la zona de estudio entre los años 1990 y 2010

Tabla 4. Participación porcentual del cambio de coberturas

Cobertura	Área 1990 (has)	% Participación 1990	Área 2010 (has)	% Participación 2010
Coca	3.086	1,95	3.638	2,31
Bosque primario	116.767	73,96	43.019	27,32
Bosque secundario	10.403	6,59	19.910	12,65
Pastos y rastrojos bajos	19.773	12,52	70.335	44,67
Cuerpos de agua	995	0,63	188	0,12
Otros cultivos	7	0,00	942	0,60
Suelo desnudo	1.851	1,17	4.978	3,16
Rastrojos altos	4.730	3,00	12.048	7,65
Área sin información	275	0,0	2.829	1,52
<b>Total</b>	<b>157.887</b>	<b>100,00</b>	<b>157.887</b>	<b>100,00</b>

## SERIE HISTÓRICA DE ASPERSIONES 2003 – 2011

El programa de aspersión aérea se realiza en Colombia desde el año 1994 en cultivos de coca, dicha aspersión se realiza con el herbicida glifosato que tiene un efecto sistémico y es absorbido por las hojas y transportado hacia la raíz. Desde el inicio del programa, las operaciones más intensas se han reportado en los departamentos de Putumayo, Guaviare y Nariño, en la última década.

El monitoreo anual que hace SIMCI mediante sensores remotos ha detectado una reducción en el área sembrada en coca durante los primeros meses posteriores a la aspersión; sin embargo, se ha encontrado evidencia espacial de caracterización del fenómeno que junto con información de producción y rendimientos obtenida en campo indica que existe una adaptación del campesino a dichas actividades que le permiten evitar o minimizar los efectos de las operaciones de aspersión (reducción del tamaño del lote, mezcla del cultivo de coca con cultivos lícitos, desplazamiento de lotes hacia lugares muy apartados de la geografía, aplicación de sustancias en la superficie foliar, lavado de las hojas después de la aplicación del herbicida), no obstante aun no se ha comprobado la efectividad de estos métodos .

*El 32% de la aspersión 2003 – 2010 se localiza en el tipo de paisaje Lomerío fluviogravitacional amazónico. Ubicado en departamento de Guaviare (municipios de San José, El Retorno y Calamar) Para las unidades de paisaje se utilizó la cartografía temática*

Para la Región, se tiene un registro de actividades de aspersión desde la década de los noventa; no obstante en el año 2002 la información existente presenta inconsistencias por lo cual para realizar el análisis planteado en el estudio se empleó la información disponible a partir del año 2003.

En el periodo 2003 - 2011, las cifras de aspersión presentan una tendencia general a la disminución, en el 2003 alcanzaron su mayor registro con 44.467 has y para el año 2011 la cifra alcanza un valor de 11.462, el menor en la serie histórica. La aspersión se ha concentrado históricamente en el Guaviare (más del 60% del total asperjado en la región), con 37.493 has cifra máxima alcanzada en 2003 y 8.917 has en 2011; la intensidad de aspersión fue generada por la concentración y alta densidad de cultivos de coca principalmente al sur del departamento en Miraflores y El Retorno.

En el Meta, no se observa una tendencia marcada de aumento o disminución en las aspersiones, sin embargo, para el 2006 se registró la máxima aspersión con 25.915 has, asociado a un fuerte aumento de la densidad del cultivos en Vista Hermosa, Mapiripán, Puerto Concordia y Puerto Rico principalmente. En 2011, se reportaron 2.545 hectáreas asperjadas.

*El 58% de las aspersiones en el año 2011 coinciden con líneas de aspersión del periodo 2003 - 2011 señalando una estabilidad en la región sembrada con cultivos de coca*

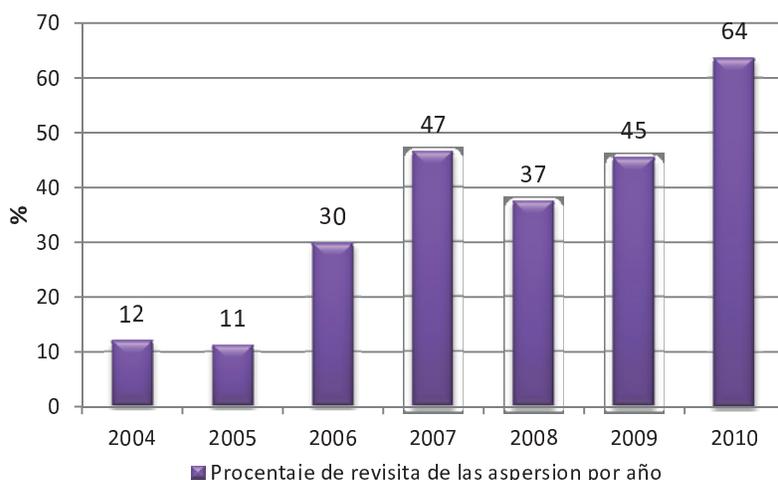
## **ÁREA AFECTADA POR LA ASPERSIÓN**

Para cada año durante el período analizado, existe un porcentaje de las áreas que son asperjadas más de una vez en el año; no obstante al comparar un año con el año anterior se observa que las líneas de aspersión coinciden, lo que indica que el fenómeno presenta una gran estabilidad dentro de la región, además que existe una gran porcentaje de resiembra.

La intensidad y alta frecuencia de estas actividades de control pueden afectar las posibilidades que un territorio afectado retorne a un patrón inicial de cobertura, pues factores como presencia de material genético, propiedades del suelo, ocupación del paisaje) afectan el proceso

*El porcentaje de revisita de la aspersión es del 40% lo que puede entender por que solo el 13% del área afectada por aspersiones entre 2003 - 2010 se encuentra en procesos de sucesión vegetal*

Porcentaje de revisita del programa de aspersión por año desde 2003



En 2004 solo el 12% del área fue re-aspersada con respecto al 2003, sin embargo, en los siguientes años este % ha venido aumentando hasta alcanzar un máximo de 64% para el 2010

## PROCESOS DE SUCESIÓN VEGETAL

Los cambios en coberturas orientados a aquellas coberturas propias del proceso de sucesión vegetal se analizan desde dos entradas

1. Área intervenida por el PECIG
2. Área fuera de PECIG

Para el área intervenida por PECIG se asperjaron durante el periodo 2003-2010 157.887 hectáreas. Dentro del territorio se encontró que para el año 2010 tan solo el 13% del área afectada (20.700 has) se encuentra en proceso de sucesión vegetal. Ver anexo 1

Las coberturas que predominan para el año 2010 dentro del área del PECIG, son pastos y herbazales, con un 44% del área total (69.767 has). En estas áreas se pueden llegar a desarrollar procesos de sucesión vegetal, siempre y cuando las condiciones que favorecen el proceso se encuentren presentes, el material genético necesario (semillas), cese de actividades antrópicas, disponibilidad de agua y aptitud de los suelos.

En cuanto al área sembrada de coca, durante el período analizado se encontró que los cultivos disminuyeron en un 70% al pasar de 25.789 hectáreas en el 2003 a 7.282 en 2010.

El área evaluada sin intervención del PECIG es de 10.750.800 has de las cuales en el año 2010 se encuentra en pastos y herbazales un 22% con 2.456.927 has y un 3% en diferentes estadios de sucesión vegetal con 371.443 has.

*En promedio el 40% de las áreas asperjadas en un año coinciden con las áreas del año siguiente. En 2004, este porcentaje era de tan solo 12%, pero en los siguientes años, dicho valor ha aumentado alcanzado un máximo de 64% en 2010.*

El mayor porcentaje en sucesión vegetal para áreas PECIG se concentra en los paisajes 10 y 11 correspondientes en su mayoría al departamento del Guaviare. Mientras que para el área fuera de PECIG se concentra en los paisajes 4,9 y 12 concentrándose estos dos últimos en el Guaviare y el paisaje 4 en el departamento del Meta zona que como se mencionó anteriormente forma parte del Plan de Consolidación Integral de la Macarena (PCIM) esto podría tener incidencia en el favorecimiento en los procesos de sucesión en ese paisaje por abandono de cultivos ilícitos.

**Tabla 5. Distribución de la sucesión vegetal en el área de estudio**

<b>Tipo de Paisaje</b>	<b>% de pastos y herbazales en áreas PECIG</b>	<b>% de sucesión en áreas PECIG</b>	<b>% de pastos y herbazales en áreas fuera PECIG</b>	<b>% de Sucesión en áreas fuera PECIG</b>	<b>Área de Paisaje fuera de PECIG (has)</b>	<b>Área de Paisaje en zonas PECIG (has)</b>
<b>P. 4</b>	8	1,12	2,31	0,54	886.718	21.586
<b>P. 5</b>	1	0,36	0,63	0,20	450.405	3.314
<b>P.6</b>	2	0,33	7,23	0,25	1.223.774	5.895
<b>P.7</b>	2	0,71	2,32	0,24	528.078	8.375
<b>P.8</b>	3	1,36	4,71	0,29	1.019.093	11.540
<b>P.9</b>	3	0,87	1,73	0,65	906.431	10.242
<b>P.10</b>	14	3,13	1,31	0,37	2.448.935	50.907
<b>P.11</b>	5	3,45	0,18	0,25	1.668.958	24.468
<b>P.12</b>	5	1,56	2,20	0,56	1.114.185	18.855
<b>P.13</b>	1	0,12	0,23	0,10	504.222	1.639
<b>Total</b>	<b>44</b>	<b>13,01</b>	<b>22,85</b>	<b>3,46</b>	<b>10.750.800</b>	<b>157.887</b>

El porcentaje de sucesión vegetal en áreas PECIG es 13 % (20.700 has) mientras que para las áreas fuera de PECIG el % de sucesión vegetal es del 3% (371.443has). Es de notar que las áreas en sucesión vegetal fuera del área PECIG se encuentran inmersas en matrices mayoritariamente de bosques, mientras que la zona intervenida por PECIG en matrices con algún grado de ruralización; esto puede influir en una tendencia hacia la consolidación de otros tipos de ocupación e interferencia con los procesos de sucesión vegetal.

## DEFORESTACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

El análisis de pérdida de cobertura de bosque primario y bosque secundario en los 10 paisajes evaluados durante el período comprendido entre 1990 y 2010, permitió identificar las áreas donde hubo pérdida de bosque que comprende no solo actividades relacionadas con el establecimiento del cultivo de coca, sino también ampliación de la frontera agrícola y diferentes procesos de ruralización.

Cuando se analiza la pérdida de cobertura boscosa, se analizan dos tipos de coberturas, bosque primario y bosque secundario, que en el período 1990 -2010 muestran una pérdida en total del 9%, es decir 722.443 has.

No obstante, es importante observar el comportamiento en particular de cada tipo de cobertura para entender la dinámica presente en la región; en bosque primario se observa una pérdida del 10% (775.433 has) con respecto al área inicial (1990); mientras que en bosque secundario se observa una ganancia en total del 16%; aunque al analizar este comportamiento por tipo de paisaje se identifican tres en los cuales se presentó una pérdida de 28.670 has (paisajes 1,3 y 10 ver tabla a continuación), para los otros siete la ganancia es de 81.660, que permiten un balance general de ganancia de 52.990 has.

Esta ganancia puede estar asociada a dos factores principalmente; primero se puede estar presentando una degradación por causas antrópicas o naturales de áreas de bosque primario a bosque secundario; y segundo, se han generado procesos de sucesión vegetal en coberturas de pastos, rastrojos y otros que presentan una ganancia en biodiversidad para la zona<sup>5</sup>.

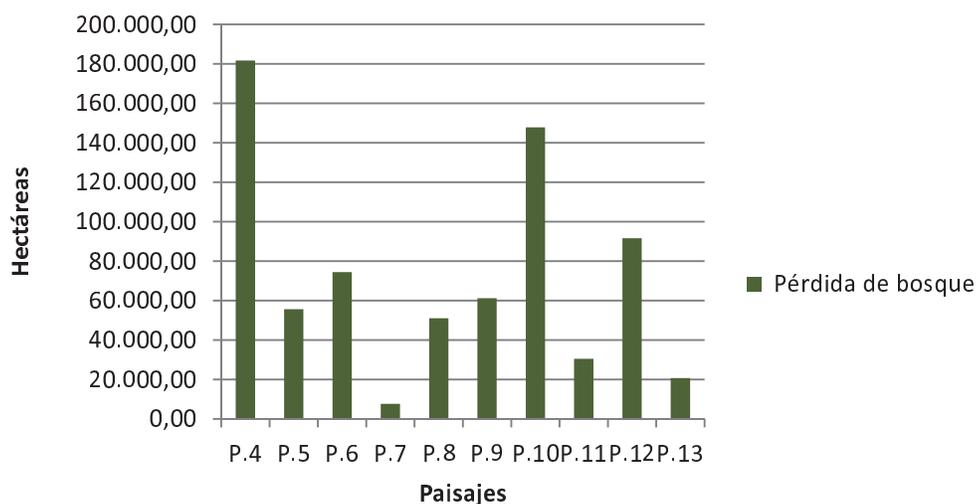
Se puede interpretar que aquellos bosques que ya han sufrido cierto tipo de degradación son más susceptibles a continuar en dicho proceso y pasar a actividades propias de una forma de ocupación más ruralizada; específicamente en esta región, se observó un cambio importante en la forma de ocupación del paisaje, cuando se registró una transformación al mudar de bosques densos a espacios de ruralización y espacios intermedios de praderización, deforestación y cultivos de coca; aspecto que apoya los resultados encontrados en este capítulo.

En cuanto al área sembrada de coca, durante el periodo analizado se encontró que los cultivos disminuyeron en un 77% al pasar 15.316 hectáreas en el 2003 a 3.467 en 2010.

*Entre los años de 1990 y 2010 se perdieron 775.433 has de bosque primario (10%) y aunque el bosque secundario aumento su cobertura en un 16%, no se ha generado una cobertura boscosa continua por el contrario la presencia de fragmentos de bosques es cada vez mayor dando espacio a nuevas formas de ocupación*

<sup>5</sup> Al tratarse de información obtenida por interpretación de imágenes de satélite existen zonas para ambos periodos en los cuales no es posible contar con información, debido a la presencia a gaps y nubes y sombras.

### Pérdida de bosque entre 1990 y 2010



La pérdida general de bosque para la zona se encuentra concentrada en los paisajes 4 (La Macarena y vista Hermosa), 10 (san José del Guaviare, Calamar y el Retorno) y el 12 que está ubicado a orillas del río Guaviare límite norte con el departamento del Meta. Estos paisajes coinciden simultáneamente con la mayor participación en procesos de sucesión vegetal en la zona según lo visto anteriormente.

**Tabla 6. Deforestación**

Tipo de Paisaje	Bosque primario 1990 (has)	Bosque secundario 1990 (has)	Total Bosque 1990 (has)	Bosque primario 2010 (has)	Bosque secundario 2010 (has)	Total Bosque 2010 (has)	Pérdida de bosque primario (has)	Pérdida de bosque secundario (has)	Total pérdida de bosque (has)
P.4	732.729	55.860	788.588	553.514	53.391	606.904	179.215	2.469	181.684
P.5	422.065	5.890	427.955	351.423	20.908	372.330	70.642	-15.017	55.625
P.6	204.951	44.822	249.774	149.327	26.013	175.340	55.624	18.809	74.434
P.7	236.305	23.486	259.791	225.814	26.286	252.101	10.490	-2.800	7.690
P.8	219.800	25.862	245.662	161.885	32.700	194.585	57.915	-6.839	51.076
P.9	611.341	61.762	673.104	546.517	65.355	611.872	64.824	-3.593	61.231
P.10	2.378.447	25.066	2.403.513	2.212.157	43.495	2.255.652	166.290	-18.429	147.861
P.11	1.666.916	2.663	1.669.579	1.609.835	29.264	1.639.099	57.081	-26.602	30.479
P.12	754.905	50.729	805.634	654.868	59.109	713.977	100.037	-8.380	91.657
P.13	396.826	17.765	414.591	383.512	10.374	393.886	13.313	7.391	20.705
<b>Total</b>	<b>7.624.285</b>	<b>313.905</b>	<b>7.938.191</b>	<b>6.848.852</b>	<b>366.895</b>	<b>7.215.747</b>	<b>775.433</b>	<b>-52.990</b>	<b>722.443</b>

## RELACIÓN ENTRE SUCESIÓN VEGETAL E ÍNDICES ESPECTRALES

Desde el punto de vista de la ecología del paisaje, la sucesión vegetal es concebida, como una secuencia de reemplazo de elementos del paisaje, donde se analiza cómo esta secuencia se integra a un modelo general de cambio del paisaje (Shugart et al., 1973; Pickett, 1976; Whittaker y Levin, 1977; Shugart y West, 1981).

Los estadios iniciales de sucesión vegetal (estados inmaduros) se caracterizan por el establecimiento de pocas especies de condición pionera. Aquí se encuentran los pastos y herbazales; esta etapa inicial es considerada como la fase de crecimiento de la sucesión (Marten, 2011). Debido a que, esta etapa inicial tiene pocas especies las nuevas especies no enfrentan una competencia intensa por parte de las que ya se encuentran. Esta etapa se consolida con los llamados rastrojos o arbustos.

Posteriormente las especies que prevalecen en estas etapas iniciales son aquellas que pueden crecer y reproducirse a gran velocidad en abundancia de recursos (nutrientes, luz, agua).

Con el tiempo esta etapa da lugar a comunidades más especializadas y de mayor biodiversidad principalmente especies arbustivas de porte alto y arbóreas de maderas blandas de rápido crecimiento (Bosque secundario). A medida que avanza el proceso de sucesión, la comunidad en formación se hace más compleja. Aumenta el número de especies, muchas de ellas más especializadas en cuanto a su dieta y la forma en que interactúan con otras plantas (Marten, 2011). La culminación del proceso de sucesión se consigue con la comunidad clímax esta es la etapa de equilibrio que se caracteriza no solo por el número más elevado de especies sino porque todas son competidoras eficientes, capaces de sobrevivir con recursos limitados.

**Figura 2. Proceso de sucesión vegetal**



Fuente: [http://www.hwdsb.on.ca/hillpark/Departments/Science/Watts/SNC/Assigned\\_Work/class\\_summary\\_snc\\_spring\\_2009.html](http://www.hwdsb.on.ca/hillpark/Departments/Science/Watts/SNC/Assigned_Work/class_summary_snc_spring_2009.html)

Por otra parte la sucesión vegetal secundaria, aquella que sobreviene luego de una perturbación de carácter natural o antrópica, ha sido foco de varios estudios que pretenden caracterizar la dinámica de la vegetación luego de alguna perturbación. Los métodos empleados van desde el inventario in situ de especies y monitoreo temporal, interpretación de fotografías aéreas y últimamente el uso de sensores remotos. Estos últimos de amplia y rápida aceptación en la comunidad científica por el amplio cubrimiento de área y por la integración de bandas en determinados rangos del espectro que permiten el uso de índices espectrales de vegetación para la evaluación del proceso de sucesión.

Estos índices espectrales de vegetación utilizan las bandas del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) ya que se ha comprobado su eficacia en la discriminación del crecimiento de la vegetación dado su alto contraste entre la banda fotosintética del R y la no fotosintética del IRC (Tucker, 1979).

Diversos estudios se han realizado en áreas mediterráneas utilizando índices espectrales de vegetación con el objetivo de evaluar la sucesión vegetal posterior a eventos de incendio (Delgado & Pons, 1999) (Salvador & Pons, 1996) (Lozano, 2007) y para el seguimiento de la sucesión en campos abandonados (Serrano & Begueria, 2006), con buenos resultados que permiten un mejor acercamiento a la dinámica de la vegetación en estas zonas.

Sin embargo, se debe aclarar el alcance de la aplicabilidad de los índices puesto que, estos permiten diferenciar el estado sucesional pero no la diversidad de especies que se puedan encontrar.

Desde este enfoque el monitoreo para la evaluación de la sucesión vegetal en la Región permite ser evaluado con el empleo de índices espectrales de vegetación ya que, estos constituyen una valiosa herramienta en la estimación de la productividad primaria, crecimiento, biomasa y vigor de la vegetación. De igual manera, permiten analizar los procesos de la sucesión de forma cuantitativa con elevado detalle espacial (Serrano et al ,2006) y asegurar que existe una relación diferenciadora entre el estado sucesional y los índices de vegetación.

## LOS ÍNDICES ESPECTRALES

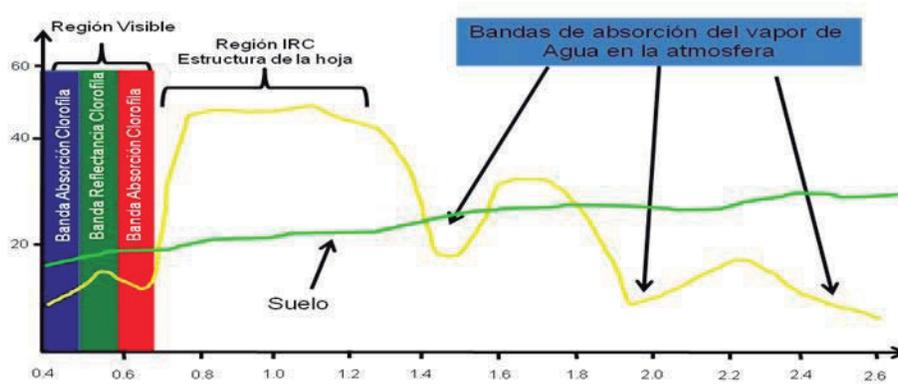
### ***Comportamiento espectral de la vegetación y suelo***

#### COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE COBERTURAS

*A nivel espectral la vegetación y el suelo pueden ser separados en términos de sus espectros electromagnéticos. La reflectancia de la vegetación varía fuertemente, sus valores más bajos ocurren alrededor de 400 nm (es decir, en la banda de onda azul), mientras que los valores más altos en la región del infrarrojo cercano y parte de las bandas del infrarrojo medio.*

*El espectro de reflectancia de suelo desnudo, en contraste, muestra que los valores tienden a aumentar independiente de la longitud de onda. Su respuesta espectral en la región del visible es mayor que la de la vegetación, mientras que en el infrarrojo cercano y parte del infrarrojo medio es menor para finalmente dominar de nuevo más allá de longitudes de onda de alrededor de 1400 nm.*

**Figura 3. Curvas espectrales de la vegetación y el suelo.**



La banda roja está determinada por el contenido de clorofila, mientras la banda del IRC está en función del índice de superficie foliar junto con el porcentaje de cobertura de vegetación verde.

### Índices de vegetación

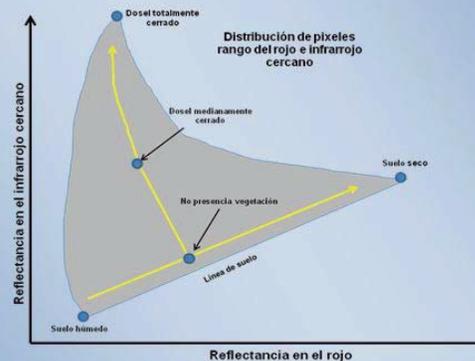
El gran reto de la teledetección consiste en estudiar la vegetación de una escena a partir de medidas de reflectividad con independencia de todos los factores que perturban la señal radiométrica, entre los que cabe resaltar la reflectividad del suelo. (M.A. Gilabert, 1997).

La solución a este problema se ha abordado tradicionalmente en teledetección a partir del diseño de los denominados índices de vegetación. De forma genérica se puede definir un índice de vegetación como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad en distintas longitudes de onda con el objetivo de indicar el contenido de biomasa y obtener información, más clara, sobre las características de la vegetación.

Los índices de vegetación tienen en común el uso de los valores de reflectividad en las zonas espectrales del R e IRC. Con comportamientos espectrales diferentes en la vegetación verde y el suelo, la reflectividad pasa de un mínimo relativo en el rojo correspondiente a la banda de absorción de la clorofila a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano debido a las múltiples dispersiones de la radiación por el interior de la estructura celular. Se puede decir que

### Distribución de píxeles en el rango del R e IRC para vegetación y suelo desnudo

Los píxeles que corresponden a superficies desnudas se encuentran sobre la llamada línea del suelo.



En superficies con algún % de vegetación, la reflectividad en la zona correspondiente al rojo será más baja que la del suelo desnudo, y en el IRC será más alta, y el píxel se alejara perpendicularmente de la línea del suelo. Cuanto más lejos este de la línea del suelo, mas vegetación habrá en el píxel.

aproximadamente el 90% de la información relativa a la vegetación está contenida en las bandas roja e infrarrojo cercano (M.A. Gilabert, 1997).

### **Aplicabilidad al caso**

Como se ha mencionado anteriormente la el seguimiento temporal de la sucesión vegetal secundaria ha sido objeto de varios estudios que pretenden monitorear, describir y medir la sucesión vegetal dada después de un efecto perturbador. Para el caso se considera a la aspersión aérea con glifosato como el efecto perturbador del paisaje y que “puede” llegar a tener una incidencia en la sucesión vegetal de las zonas intervenidas.

A criterio de experto en imágenes satelitales las zonas asperjadas con glifosato presentan en los días posteriores a la perturbación una alta reflectancia del suelo, caracterizada por tonos claros y texturas finas, típicas de zonas con gran porcentaje de suelos desnudos con nula o escasa biomasa, que puede leerse como la muerte de la vegetación intervenida. Si la zona cesa cualquier actividad de carácter antrópico (nuevas prácticas, nuevos cultivos etc.) y los factores que favorecen la sucesión están presentes (disponibilidad de semillas, estructura físico química del suelo, disponibilidad de agua, equilibrio de microorganismos transformadores en el subsuelo etc.) se dará inicio al proceso de sucesión vegetal.

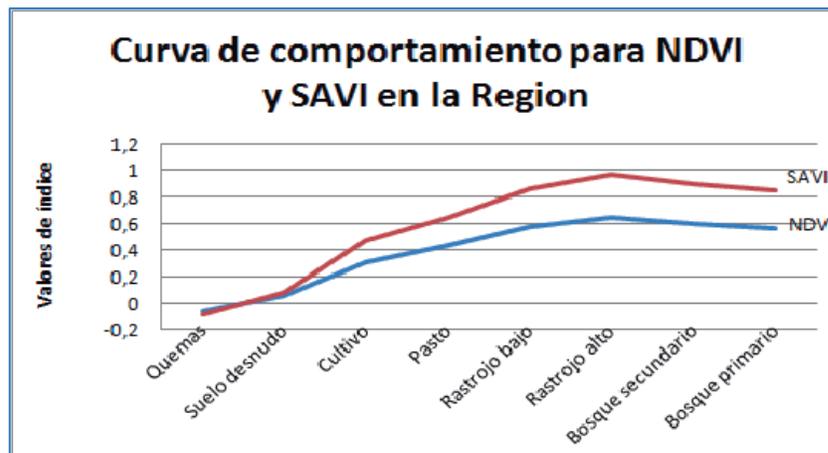
La herramienta de evaluación de este proceso para el estudio es el uso de índices espectrales de vegetación ampliamente aceptados para tal propósito, que permiten identificar, vigor, crecimiento y calidad de la vegetación en este caso los índices NDVI y SAVI.

*Para la evaluación de la aplicabilidad de los índices espectrales como instrumento para resolver la hipótesis del estudio, se realizó para las grillas 1k seleccionadas una segmentación en el año 1990 que cumple los parámetros de homogeneidad espectral al inicio del estudio Posteriormente estas unidades homogéneas fueron clasificadas visualmente y seleccionadas aquellas que cumplían el requisito de encontrarse para el año 2011 en estadios válidos de sucesión vegetal. (Unidades de análisis espectral, UAE).*

*Estas UAE son las unidades de monitoreo histórico en la cuales a criterio de experto mediante clasificación visual se identificaron los estados de la dinámica vegetal (uso, sucesión, bosque). Y a las cuales se les calcularon los índices espectrales NDVI y SAVI.*

Para ambos casos se trata de una aplicación en función de niveles digitales (ND)

*Datos obtenidos de la región de estudio*



## **LA BÚSQUEDA DE UNA REPRESENTACIÓN DEL FENÓMENO**

La región sur del Meta-Guaviare hace parte de la región amazónica y Orinoquia caracterizadas por su riqueza boscosa, simultáneamente esta región ha estado constantemente afectada por la presencia de cultivos ilícitos y como consecuencia se ha intervenido frecuentemente por parte del gobierno de Colombia mediante las políticas de aspersión y erradicación, de tal forma que se requiere establecer una serie de variables que permitan caracterizar longitudinalmente los cambios de cobertura del bosque y la sucesión vegetal, y adicionalmente determinar el efecto de factores de intervención como la aspersión.

## **CRITERIOS DE RESTRICCIÓN E INCLUSIÓN**

Con el objetivo de controlar el efecto de variables exógenas propias del territorio y su influencia en la dinámica de la cobertura vegetal se realizó una restricción al marco objeto de estudio; el cual está determinado por todas las unidades de un kilómetro cuadrado en la región mencionada. El fin es partir de un estado homogéneo de las unidades de selección y análisis, para esto se tomó el año 1990 como base de criterio de homogeneidad espectral y como final el año 2011 con la premisa de presentar algún estadio de sucesión vegetal<sup>6</sup>.

Con la restricción mencionada se parte de los siguientes criterios de inclusión para la selección al azar no probabilística de las unidades:

- i. Grillas asperjadas al menos una vez entre 2003 y 20097 y sin ninguna aspersión durante los años 2010-20118

A partir del marco de muestreo se obtuvieron en cada una de las grillas seleccionadas tanto unidades de observación para el monitoreo de la sucesión en “áreas efectivas de aspersión” (casos) como para “áreas no asperjadas” (controles).

Cada una de las grillas se asume como un conglomerado donde los casos y controles deben cumplir la siguiente condición para ser parte del estudio.

- ii. Las unidades de observación deben estar en sucesión vegetal.

## **BLOQUEOS**

Según (Gergel y Turner,2002) se considera al ecosistema (paisaje) como factor diferenciador del comportamiento de la sucesión vegetal.

De otra parte se asume como factor de conglomeración la Unidad ya que permite la optimización en selección y tamaño de la muestra experimental, es decir, los polígonos dentro de una misma grilla se parecen entre sí y los que pertenecen a otras unidades son diferentes.

---

<sup>6</sup> Para el estudio se consideran válidos los estadios de sucesión a partir de herbazales y rastrojos bajos hasta bosque secundario. Los pastos se excluyen por encontrarse en una categoría incierta por corresponder tanto a ciclos productivos como de sucesión vegetal.

<sup>7</sup> El último año de aspersión a tener en cuenta es 2009, la razón de este criterio de inclusión corresponde a que se estima que para la clasificación de sucesión vegetal se requiere al menos un año.

<sup>8</sup> Los polígonos no deben haber sido asperjados durante este periodo ya que, se establece el mismo como periodo de Sucesión vegetal sin ninguna perturbación.

La correlación intraclase<sup>9</sup> o de semejanza dentro de las unidades es de 0.75 por lo que se asume que la diferencia en las variables respuesta está asociada al factor de intervención y no a condiciones propias de la unidad de observación.

### **VARIABLES DE CONTROL O COVARIABLES**

Las siguientes variables se consideran como factores que pueden alterar la respuesta de la sucesión vegetal

- Distancia al bosque: Se considera el bosque como un factor de protección y de oferta de germoplasma para la sucesión vegetal, por tanto, la distancia a este puede tener incidencia en el proceso.
- Intensidad de aspersión: Esta variable se considera como factor de riesgo en la dinámica de la sucesión vegetal, por tanto se incluye como factor de intervención y se controla según su intensidad durante el período 2003 al 2011.
- Tamaño de la unidad de análisis: Se considera el tamaño de la unidad de observación como posible factor determinante en el proceso de sucesión vegetal puesto que, a mayor tamaño la disponibilidad de semillas, factor propiciador de la sucesión puede no ser tan eficiente como si lo es en áreas pequeñas.
- Tiempo de uso: Este tiempo se considera como factor modificador ya que, incide directamente en la supervivencia del banco genético del suelo, la degradación del mismo por pérdida de sus características físicas y químicas por sobreuso y agotamiento así como, por pérdida del recurso biológico del subsuelo determinante en los procesos de asimilación y transformación de nutrientes.

*Las variables de control son:*

- *Distancia al bosque*
- *Intensidad de aspersión*
- *Tiempo de uso*
- *Tamaño de los polígonos objeto*

### **Factor de intervención o tratamiento**

El factor de intervención (perturbador) del experimento es la aspersión. Las curvas de los indicadores muestran un proceso de sucesión de la vegetación estándar; el objetivo es determinar si este proceso es modificado por el factor en mención, el cual se manifiesta a partir de un proceso exógeno.

Las coberturas de bosque ya eran intervenidas en 1990 por efecto de los cultivos ilícitos y ha sido progresiva a la fecha, según (Etter, 1994) entre las actividades humanas y los paisajes existe una correspondencia específica que tiene lugar en los espacios geográficos y lapsos de tiempo; dependiendo del tipo, objetivo, intensidad y duración de estas actividades los ecosistemas originales de un lugar presentan diversos grados de transformación.

En este contexto la transformación de la cobertura en el área de estudio está ligada a los procesos de ocupación del territorio; los factores diferentes a la aspersión están controlados por las covariables y por las categorías de paisaje contempladas en este estudio.

---

<sup>9</sup> La correlación intraclase es una medida de semejanza de los individuos sobre un mismo grupo o conglomerado. Este coeficiente varía entre 0 y 1. Entre mayor sea su valor se interpreta como una medida de homogeneidad entre los elementos. La significancia de la correlación está ligada directamente a los análisis de varianza del experimento.

### **Temporalidad**

El factor de temporalidad se constituye en la medición a través del tiempo de las variables de interés sobre las unidades de observación. El objetivo es determinar el efecto del tiempo en las variables independientes o indicadores eliminando la auto correlación espacial e intrínseca de los datos.

### **Experimento**

El experimento es observacional analítico aleatorizado de medidas repetidas para casos y controles.

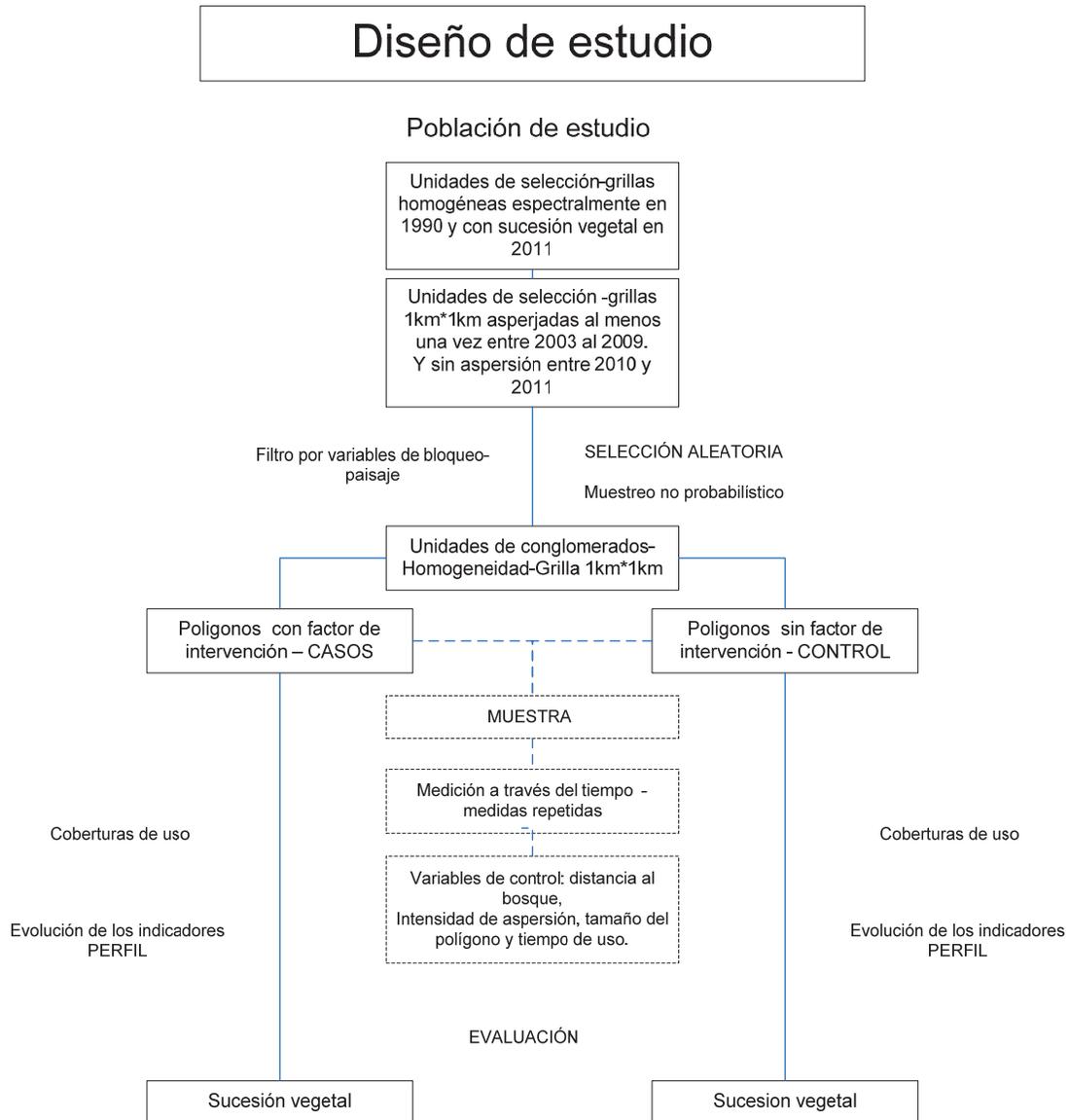
Los estudios observacionales analíticos se usan con frecuencia para determinar el efecto de un factor de intervención o tratamiento en la variable de interés es importante la concepción temática del estudio con el fin de controlar las variables y no atribuir falsas asociaciones o impedir el efecto de asociaciones reales.

Las Medidas repetidas siguen un análisis prospectivo para cada una de las unidades con la restricción de tener el mismo desenlace al final del periodo de estudio. La regeneración vegetal constituye el factor de resultado homogéneo para todas las unidades.

Dado que los niveles de intervención son dicotómicos (asperjado-no asperjado) se crean grupos homogéneos en un punto del tiempo los cuales están controlados por bloques y covariables. Esta característica hace que el análisis se filtre en grupos de caso-control o tratamiento y placebo y se realice la comparación entre ellos.

A pesar de los controles en la medición se enfatiza el carácter experimental y descriptivo del estudio el cual no necesariamente es replicable bajo otras condiciones o regiones del país.

Figura 4. Metodología para el monitoreo de la sucesión vegetal



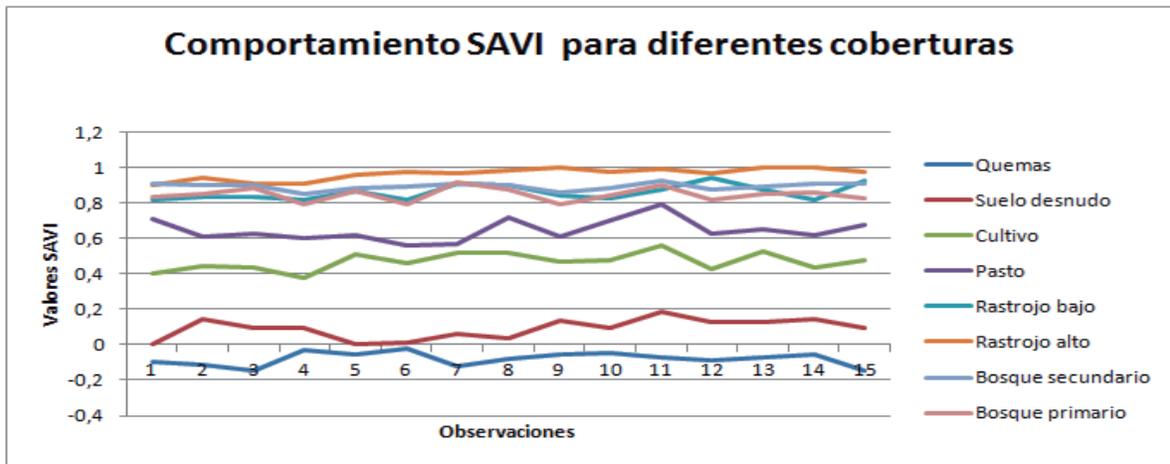
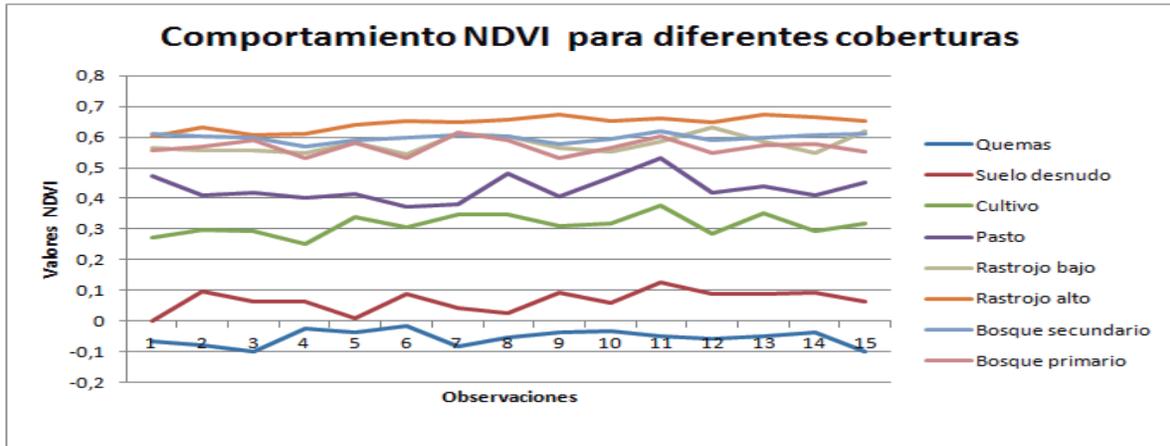
## LOS VALORES RELATIVOS VS. LOS VALORES ABSOLUTOS

Las imágenes de satélite muestran la situación al momento de toma de la imagen. Para efectos del presente estudio podemos diferenciar 3 tipos principales:

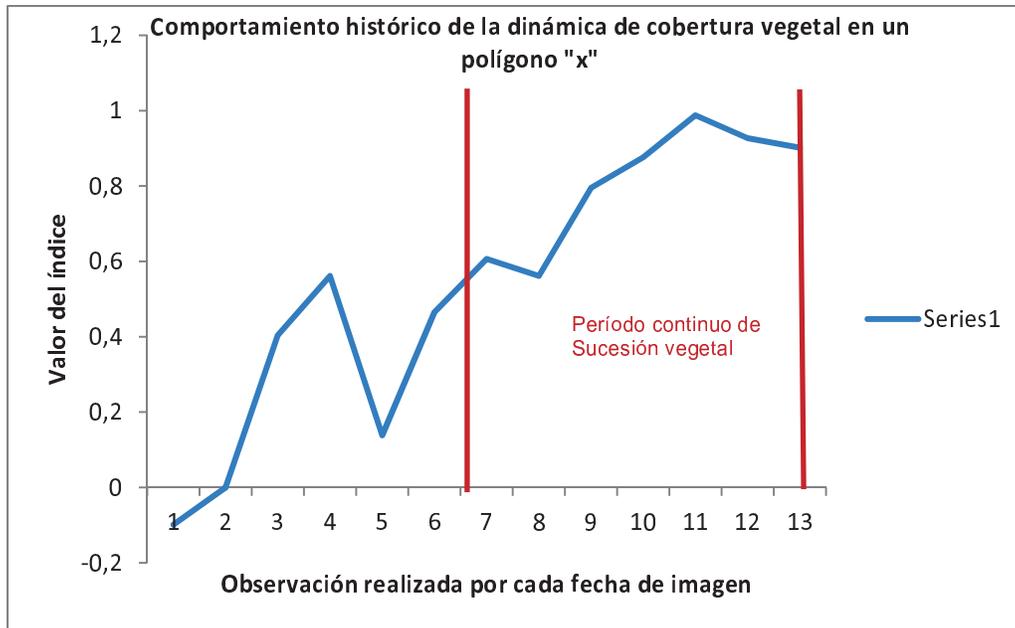
1. La coberturas en uso ( pastos, cultivos, vías)
2. Las coberturas en regeneración (Rastrojos, bosque secundario)
3. Las coberturas no intervenidas (Bosque primario, ríos)

Las coberturas no intervenidas no tienen casos de aplicación del PECIG; por otra parte, aunque las coberturas en uso podrían haber sido intervenidas con el PECIG, están fuertemente afectadas por las acciones antrópicas por lo que no son un buen parámetro para medir los efectos del PECIG; por esta razón se

aplicó un filtro temático en el que solamente las áreas que en 2011 están bajo cobertura en sucesión son susceptibles de ser seleccionadas para el análisis.



El grado de avance del proceso de sucesión vegetal al momento de la toma de la imagen de satélite no es homogéneo, ni siquiera si se garantiza que todas las áreas susceptibles de ser seleccionadas para el análisis se encuentran efectivamente en proceso de sucesión vegetal; por esta razón es necesario identificar el momento en el que se inicia el proceso de sucesión vegetal. Para esto se construyó una serie histórica de imágenes de satélite con periodicidad anual entre 2003 y 2011 y se hizo un análisis temático a criterio de experto y en retrospectiva para identificar el último año en que se detecta el territorio bajo alguna forma de uso; este momento es considerado el inicio de la sucesión vegetal.



*Obtenido a partir de la dinámica de la cobertura en un polígono seleccionado al azar en la Región.*

La delimitación de las unidades de análisis requiere garantizar condiciones de homogeneidad al interior de las mismas; de lo contrario el proceso de sucesión vegetal podría seguir caminos distintos debido a condiciones iniciales de heterogeneidad más que por la incidencia de algún factor de perturbación como la aspersión.

Una vez identifica el momento de inicio de la sucesión se inicia la recolección de datos (x, y) donde x es el tiempo de avance en el proceso de sucesión vegetal y “y” es el valor del índice espectral.

La propuesta metodológica no pretende caracterizar espectralmente el proceso de sucesión vegetal en la región Meta-Guaviare sino evaluar, a partir del comportamiento espectral, la incidencia del PECIG en la dinámica sucesional. En este sentido, la metodología hace énfasis en garantizar la comparabilidad entre casos y controles en un sentido transversal (sobre el espacio geográfico) más que en un sentido longitudinal (línea de tiempo).

*Los estadios válidos continuos de sucesión vegetal se caracterizan por presentar una tendencia positiva ascendente en los índices espectrales seleccionados.*

### ***La vecindad: variable de homogeneidad***

La asociación en las características de cobertura de las unidades de observación o polígonos en una misma grilla son un factor importante de homogeneidad la cual es cuantificable a partir la correlación intraclase dentro de la grilla y en cada uno de los paisajes en el tiempo de inicio 1990.

Los datos establecen que los valores de homogeneidad de la grilla se encuentran entre 0.65-0.85 y para de paisajes entre 0.70-0.9010. Esta homogeneidad se puede ver alterada en el tiempo por las variables de control mencionadas, las cuales encierran la variabilidad propia de la dinámica de transformación vegetal asociadas a la población de estudio.

Por otra parte en cuanto a la variable bloqueo paisaje (UNODC- SIMCI, 2011) reporta que para la región de estudio existe una alta homogeneidad biofísica entre los paisajes.

### ***Variables de comparabilidad***

Normalmente dos tipos de cambio se presentan en los ecosistemas de bosques, la deforestación y la sucesión. Realizar monitoreo a la deforestación es sencillo debido al fuerte cambio en la reflectancia entre las superficies y entre las respuestas espectrales de la coberturas antiguas y nuevas entre sí. En cambio, monitorear la sucesión es un poco más complicado debido a que los cambios a nivel espectral son más sutiles.

Comprender estos factores de incertidumbre ayuda a un mejor entendimiento de los potenciales problemas que pueden aparecer durante el desarrollo del estudio.

Existen varios factores de ruido que generan incertidumbre en los resultados:

### ***Topografía***

El principal efecto de la topografía es el cambio de la radiación solar recibida en la pendiente debido al cambio entre el ángulo de incidencia y la normal a la superficie (Woodcock, 2003), lo que origina reflectancias diferentes para la misma cobertura dependiendo del grado de iluminación que recibe la superficie.

Para comprender mejor este efecto debido a la topografía en el monitoreo de sucesión vegetal existe un modelo conocido como GORT (Geometric optical and radiative transfer). Los efectos topográficos de la reflectancia del dosel son simuladas mediante la transformación de la geometría óptica con respecto a la superficie normal de manera que la reflectancia del dosel para una pendiente se simula como si estuviera sobre una superficie plana, y simultáneamente transformando el ángulo de visión y la geometría.

El estudio de (Woodcock, 2003) muestra que índices de vegetación simulados no son sensitivos a los efectos topográficos a todos los ángulos de iluminación.

En lo referente al presente estudio los polígonos en evaluación, se encuentran en un relieve categorizado como plano a ligeramente ondulado. (U.S Geological Survey, 2011). Adicionalmente se plotearon los ángulos solares para cada bloque con el objetivo de identificar el rango de variación para el periodo de estudio. El promedio fue de 10 grados lo que se considera un ángulo solar estable.

---

<sup>10</sup> (UNODC- SIMCI, 2011) : En la región del Sur del Meta-Guaviare existe una alta homogeneidad biofísica entre los paisajes.

### **Corrección atmosférica**

La radiación electromagnética interactúa con la atmósfera de la Tierra. El grado de interacción depende de la longitud de onda y las características locales de la atmósfera. Dentro de la atmósfera hay presencia de partículas muy diversas, vapor de agua, aerosoles y gases que alteran la señal que llega al sensor de diferentes maneras. En este sentido la atmósfera es una fuente importante de ruido para una medición precisa de reflectancia de la superficie con la teledetección de sensores ópticos.

Debido a que, la composición y procesos atmosféricos cambian rápidamente a baja altitud puede significar que el sondeo hecho, al paso del satélite, cercano, en tiempo y espacio, al objetivo puede no ser suficiente para asegurar una adecuada descripción atmosférica. Infortunadamente tal descripción puede ser solamente obtenida a partir de sondeos in situ, a través de la atmósfera, mediante instrumentos, a bordo de un globo, capaces de tomar muestras de la atmósfera a intervalos fijos de altitud preestablecidos. (International Institute For Geo-Information Science and Earth Observation, 2004)

Pese a la recomendación de muchos autores de aplicar correcciones atmosféricas absolutas cuando se trabaja con índices de vegetación; el presente estudio, al igual que muchos con objetivos similares, no requiere conocer el valor físico o radiancia absoluta a nivel del suelo sino conocer la tendencia relativa de estos parámetros. Adicionalmente los objetos de análisis (caso y control) se encuentran enmarcados en un área de 1 Km<sup>2</sup>; en este sentido podemos asegurar una condición isotrópica a nivel de grilla. Es decir si las condiciones atmosféricas están presentes, dentro de esta área, su efecto es similar en magnitud para toda la superficie, es decir el mismo para el caso y el control.

*La zona de estudio se caracteriza por relieve plano a ligeramente ondulado lo que, asegura la poder comparar los índices a nivel topográfico*

### **Georreferenciación**

Otra variable que ayuda a garantizar la comparabilidad de los datos es la asignación de un sistema de coordenadas a los píxeles y asignar una geometría planimétrica; proceso que se conoce como georreferenciación o corrección geométrica.

Variaciones en las coordenadas entre las imágenes a comparar pueden generar datos inexactos que arrojan variaciones o tendencias inexactas respecto al comportamiento de la dinámica de la vegetación. Por tal razón se debe garantizar un correcto matching entre las imágenes del histórico obtenidas (pixel vs. pixel) para lo cual se realizaron los siguientes controles:

- Adopción de los mismos puntos de control para cada una de las imágenes por cada zona.
- Procesamiento de los puntos de control con el mismo algoritmo de corrección por zona.
- Error medio cuadrático (RMS) obtenido, menor a 1 (30 metros) e igual para cada una de las imágenes procesadas por zona.
- Resultado de salida con matriz igual en despliegue de filas y columnas.

*Para garantizar la comparabilidad de los índices espectrales la georreferenciación se controló con RMS < a 30 metros; uso de los mismos puntos de control por imagen así como, procesamiento del mismo algoritmo de georreferenciación.*

**Figura 5. Exactitud posicional geográfica y de matriz entre imágenes que garantiza la comparabilidad**



Aunque el objetivo no era garantizar una exactitud posicional absoluta respecto de la realidad del terreno sino, garantizar la comparabilidad entre imágenes la base de la georreferenciación (fuente de puntos de control) se obtuvo del mosaico de georreferenciación de SIMCI que tiene un RMS de 10 metros con cartografía DMA (Defense Mapping Agency) y de 40 metros con cartografía IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

El resultado obtenido además de permitir superponer cualquier otro tipo de información geográfica garantiza la comparabilidad por coordenadas de los índices espectrales calculados y aseguran que los valores obtenidos responden a la dinámica de la vegetación.

**Tabla 7. Corrección geométrica**

<b>Path- Row</b>	<b># imágenes histórico</b>	<b>RMS x</b>	<b>RMS y</b>	<b># puntos</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Tamaño pixel.mt</b>	<b>Columnas/Filas</b>
7-58	14	0.41	0.33	45	2do orden	30	8.000/7.000
6-58	12	0.37	0.39	42	2do orden	30	8.050/7.000
6-59	10	0.42	0.30	40	2do orden	30	8.000/7.000

## **LAS UNIDADES DE ANÁLISIS ESPACIAL (CASOS-CONTROLES)**

La selección de polígonos está correlacionada con la aleatorización de las unidades de análisis- grillas las cuales se asumen como conglomerados. Las variables de control (distancia al bosque, tiempo de uso, intensidad de aspersión y tamaño del polígono) ayudan a garantizar la homogeneidad entre los grupos de interés y la asociación a un único factor modificador de esta estabilidad.

Para este estudio la proporción de casos y controles presenta un leve desbalance; de 649 unidades de observación, el 53% son controles y el 47% casos, con una proporción de 1:1,4 (caso: control).

En general, es útil incrementar la razón de controles a casos con el fin de aumentar la capacidad del estudio. Sin embargo, debe preferirse el aumento del número de casos por medio de un incremento de la base poblacional o temporal del estudio esto contribuirá a la precisión de los análisis.

### *Condiciones para Casos:*

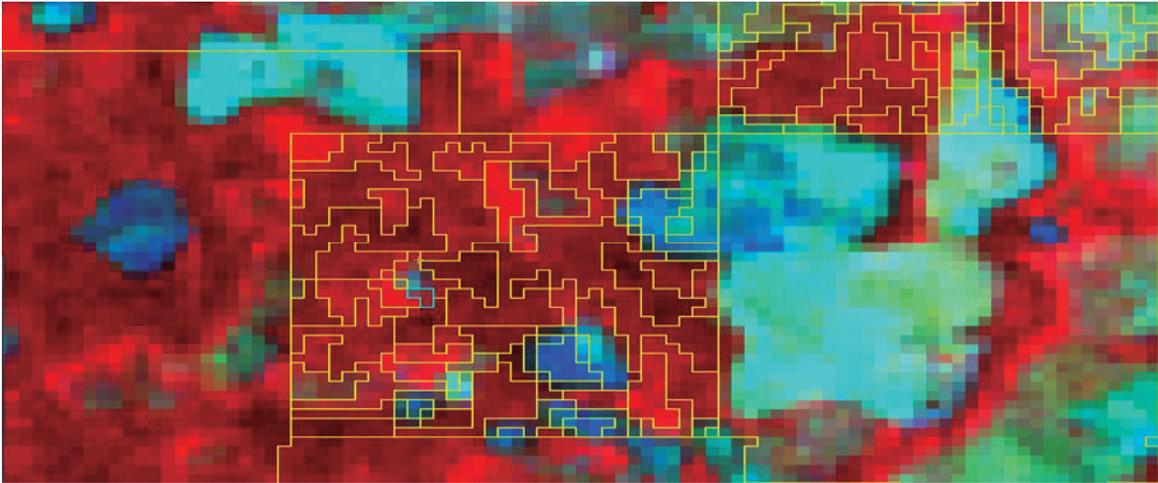
- 1. Lote objeto en sucesión vegetal ininterrumpida por lo menos en dos observaciones en tiempo y finalizando a la última fecha de observación (2011).*
- 2. Lote intervenido por lo menos una vez con el PECIG entre el año 2003 y 2009 y sin aspersiones en los años 2010 y 2011*

## **ZONAS ESPECTRALMENTE HOMOGÉNEAS: LA SEGMENTACIÓN**

El estudio parte de la premisa inicial de obtener polígonos homogéneos espectralmente en el año 1990 o Unidades de análisis espectral (UAE). La definición de estas áreas es un factor importante en la comparabilidad ya que define los límites espaciales que enmarcan el área a ser monitoreada durante todo el período.

La obtención de estos polígonos se realizó con el software eCognition, orientado a objetos, cuyo concepto principal radica en que la información necesaria para interpretar una imagen no está contenida en un solo pixel, sino en los objetos presentes en la imagen, y en las relaciones entre estos.

**Figura 6. Visualización del resultado de segmentación moderada en una imagen**



En esta nueva visión en clasificación de imágenes un objeto es un grupo de píxeles con características similares. Cada objeto representa un espacio definido dentro de una escena y puede proporcionar información acerca de este espacio. Este objeto es obtenido mediante el proceso de segmentación, la cual implica la división del territorio en áreas cuyas características espectrales son similares (Navarro, Meléndez, & Almendro, 2008). De esta forma, los objetos de la imagen pueden ser diferenciados por sus características espectrales, espaciales, de textura y de contexto y son obtenidos por los criterios definidos previamente (homogeneidad, valores espectrales...) eliminando la subjetividad de intérprete garantizando homogeneidad y delimitación espacial.

## **PERÍODOS DE ANÁLISIS**

Para el estudio se establecieron cuatro tiempos o períodos

### **1. Tiempo de estudio**

Comprende desde 1990 hasta el 2011, siendo 1990 el año base en que se establece un atributo de homogeneidad espectral en los polígonos que serán sujetos a evaluación de sucesión vegetal y el año 2011 última fase evaluada en que los polígonos ya se encuentran en un proceso de sucesión vegetal ininterrumpida.

**Figura 7. Períodos establecidos en el estudio de sucesión vegetal**



## 2. Tiempo de uso

Se establece entre los años de 1990 y 2009. Se debe tener en cuenta que para el año 1990 gran parte de la zona ya se encontraba intervenida, por lo que su periodo de uso abarcaría desde este punto hasta el inicio de la sucesión vegetal, sin embargo, para 1990 también se encuentran zonas en selva o bosque primario que inician su período de uso en años posteriores con la intervención del bosque.

Como año máximo en que los cultivos se encuentren en este período se establece el año 2009. Se cuenta con un periodo de 2 años (2010 y 2011) para que se inicie un periodo de sucesión vegetal.

## 3. Tiempo de aspersión

Comprende desde el año 2003 al 2009, que tal como se mencionó anteriormente cuenta con todo el registro de aspersiones para la zona.

Cabe recordar que los polígonos caso deben tener por lo menos una aspersión en este periodo y contar igualmente con una última aspersión en el mismo período, a partir del cual se inicia el monitoreo para el inicio del proceso de sucesión vegetal.

## 4. Tiempo de sucesión vegetal

Este período se estableció con un año base en 2003. Año desde el cual se cuenta con los registros de aspersión histórica para la zona y se puede garantizar o no la intervención del PECIG en los polígonos en estudio. El tiempo máximo para la evaluación de la sucesión vegetal es el año 2011.

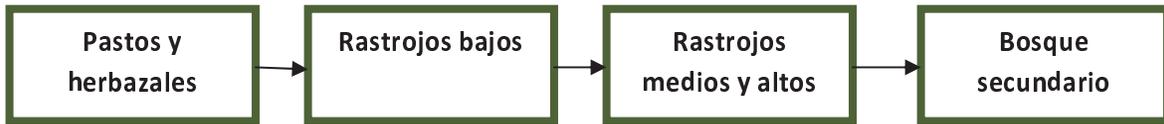
Aunque durante este período se identifican los posibles procesos de sucesión vegetal la evaluación se realiza partiendo del año 2011 (restrospectiva) identificando el punto de inicio del proceso y garantizando su carácter continuo.

Durante el tiempo de sucesión vegetal se evaluaron los polígonos seleccionados en todo el registro histórico de imágenes y de acuerdo a “criterio de experto” se siguió la siguiente clasificación:

**Figura 8. Ventana de calificación de los polígonos en el histórico.**

ct1	ct2	ct3	ct4	ct5	ct6	ct7	ct8	ct9	ct10	ct11	ct12	ct13	ct14	GRI 1K F	paisaje	ident	Categoría	t as
2	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	1	3	1	97_72_3_16	10	758280	0	
2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	1	97_72_3_16	10	758286	0	
2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	96_29_1_21	4	758112	0	
2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	96_29_1_21	4	758113	0	
2	3	2	3	3	3	3	2	3	3	1	3	1	1	111_2_4_21	10	758289	0	
2	3	2	3	3	3	2	3	2	1	3	1	1	1	111_2_4_21	10	758290	1	
2	3	2	3	3	3	3	2	3	2	1	3	1	1	111_2_4_21	10	758292	0	
2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	1	3	1	1	111_2_4_21	10	758291	1	
2	3	3	3	2	3	3	2	3	2	1	3	1	1	111_2_4_21	10	758295	1	
2	3	3	3	2	3	3	2	3	1	1	3	1	1	111_2_4_21	10	758294	0	
2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	1	3	1	97_61_3_1	13	758221	1	
2	3	3	3	2	2	2	3	2	2	3	1	3	1	97_61_3_1	13	758223	1	
2	2	2	3	3	2	2	3	2	1	3	3	3	1	97_41_1_16	13	758188	1	
2	2	2	2	3	3	3	2	3	2	1	3	1	1	97_41_1_16	13	758192	0	
2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	1	3	1	1	96_26_4_3	4	758118	1	
2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	1	3	1	1	97_41_1_16	13	758196	0	

**Código 1** Se refiere a un polígono en proceso de sucesión vegetal; es importante recalcar que las observaciones válidas que establecen un proceso de sucesión vegetal deben tener una secuencia ininterrumpida o continua según los estadios de sucesión vistos anteriormente.



El monitoreo de esta secuencia garantiza que la continuidad en el proceso de sucesión. De esta forma, las observaciones temporales en un proceso de sucesión están caracterizadas por identificar una secuencia congruente con el proceso.

**Código 2** Este hace referencia a polígonos en el periodo de uso. Esta calificación se da cuando el polígono en evaluación se encuentra en coberturas diferentes a sucesión vegetal o cuando estando en una de ellas no forma parte de un proceso ininterrumpido o continuo de sucesión vegetal.

**Código 3** Se incluye como observaciones sin información (nubes).

**Código 4** Cuando el polígono aun se encuentra en selva o bosque primario y no ha sido alterado.

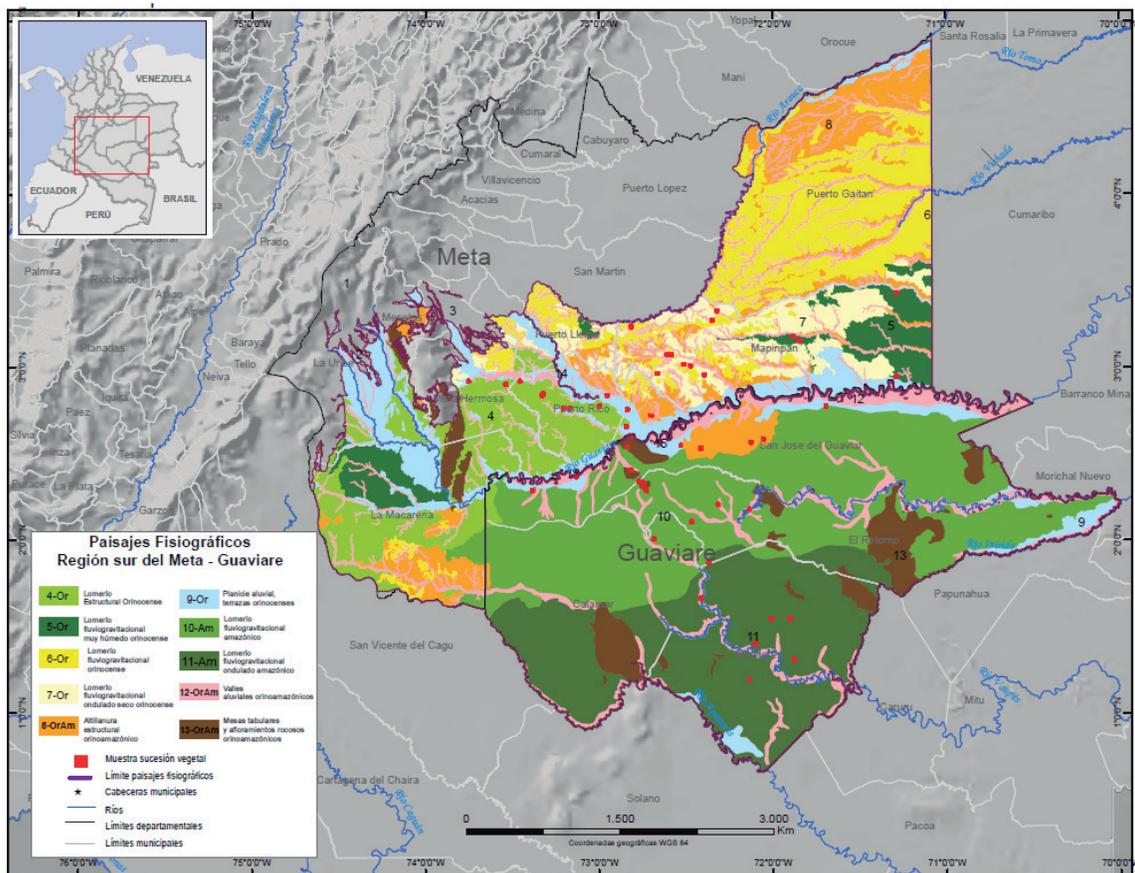
;

## CONSTRUCCIÓN DE PERFILES Y EVALUACIÓN DE LA SIGNIFICANCIA EN LAS DIFERENCIAS

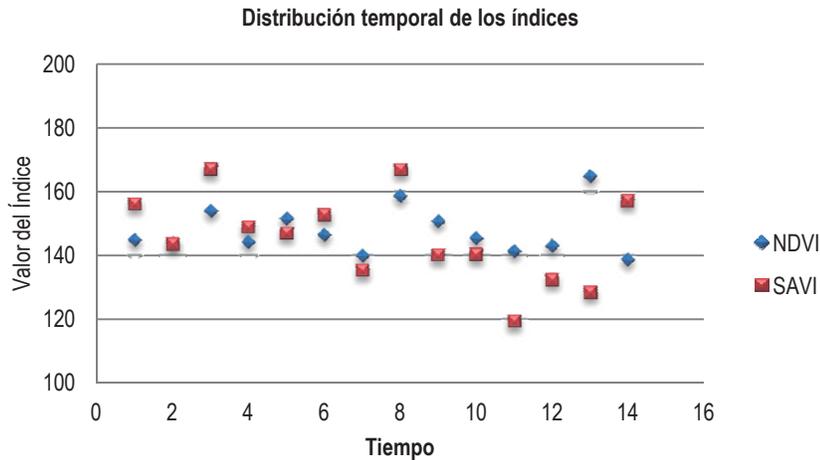
Para el análisis de la información se construyen perfiles para dos grupos: el primero asociado a las unidades de análisis no afectadas por la aspersión (control o placebo) y el segundo a las unidades de análisis afectadas por la aspersión (caso o tratamiento).

El objetivo de la medición es establecer si existen diferencias significativas entre los perfiles de respuesta de los grupos caso y control; para lo cual se realiza un análisis de varianza a partir de un modelo general mixto que permite establecer la comparación dentro del grupo y entre los grupos. El análisis permite establecer a qué factor son atribuibles los cambios en la variable respuesta la cual está determinada por los índices de vegetación normalizada (NDVI) y el ajustado al suelo (SAVI)

Figura 9. Distribución espacial y temporal de los datos



La distribución de la muestra es sistemática aleatoria no probabilística, con esta selección se garantiza la no selección predeterminada de zonas de estudio y la cobertura de los paisajes de interés. La distribución promedio en general tiene un comportamiento no volátil. Sin embargo, se destacan algunos puntos de intervención los cuales deben tener un seguimiento en el tiempo con el objetivo de determinar el efecto sobre los datos y las tendencias.



Las limitaciones del estudio que se encontraron son:

1. La pérdida de muestra por área sin información se encuentra en el 30%, se realizaron correcciones con valores imputados a partir de la técnica del paquete frío. Sin embargo, estos porcentajes son altos para modelos experimentales y aumentan el error y la variabilidad en los resultados.
2. Los tamaños de muestra se deben incrementar con el objetivo de robustecer las estimaciones en las desagregaciones por paisaje u otra variable de bloqueo.
3. Es necesario ajustar el modelo y realizar pruebas de simulación para ver la sensibilidad ante los casos de imputación en las estimaciones por paisaje, tratamiento (caso-control) y en perfiles generales.
4. Se deben contemplar análisis de variables que pueden alterar la distribución de los datos como: atmosfera, bruma u otras variables propias del procesamiento de imágenes.
5. El modelo construido no necesariamente es replicable en otras zonas del país. Se requiere el estudio de las condiciones ambientales y geográficas de la región para establecer la estructura base de análisis.

### OBJETIVO 3

*Para cumplir el Objetivo 3: Evaluar la sucesión vegetal mediante la construcción de perfiles de índices espectrales de áreas intervenidas por PECIG y su comparación estadística con perfiles de áreas no intervenidas por PECIG, se establecieron perfiles idealizados del proceso de sucesión vegetal y posteriormente se construyeron perfiles comparados de áreas en sucesión vegetal con y sin incidencia del PECIG.*

### **Análisis de perfiles**

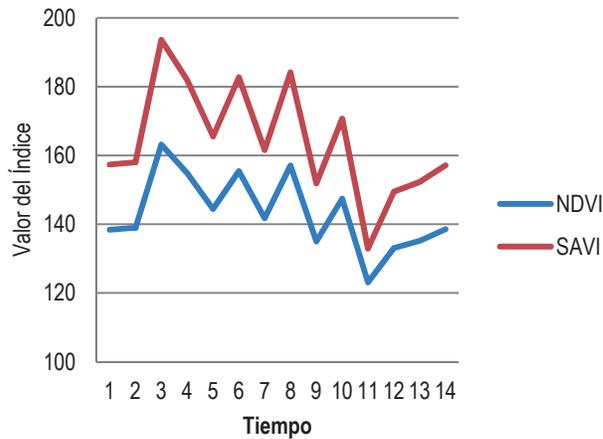
La evaluación de la dinámica de la vegetación se realizó usando índices espectrales; se desarrolló análisis de varianza sobre los datos iniciales y en segunda fase se corrigió las intervenciones o puntos extremos con el fin de suavizar la distribución de los datos original y establecer tendencias.

Se incluyó en el análisis la corrección de distancia al bosque. Está no resultó ser significativa para los índices de interés; se realizó la construcción de dos distancias una enfocada a áreas de bosque mayores a 3 has. y otra mayores a 0.25 has.

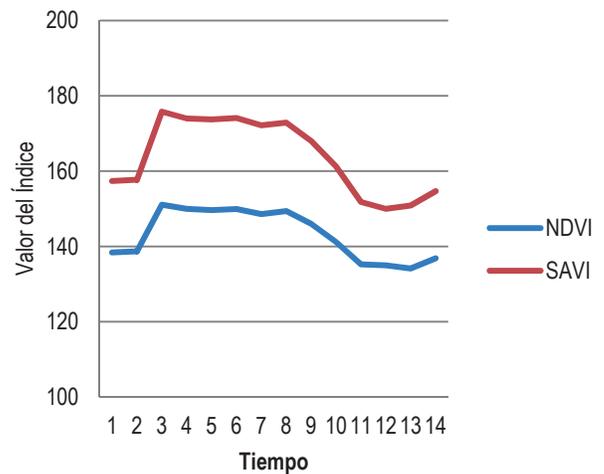
Los análisis de los perfiles de sucesión vegetal muestran que existe una correlación de tendencia entre los índices de NDVI y SAVI. Los datos sin corrección presentan una mayor volatilidad y puntos de interferencia

los cuales pueden estar asociados a variables de bloqueo como el paisaje y al factor de tratamiento (aspersión –no aspersión). Se resalta el punto de quiebre en el perfil corregido el cual estaría asociado a una variable exógena que altera los niveles de los índices.

Perfiles promedio de los índices de estudio  
Sucesión



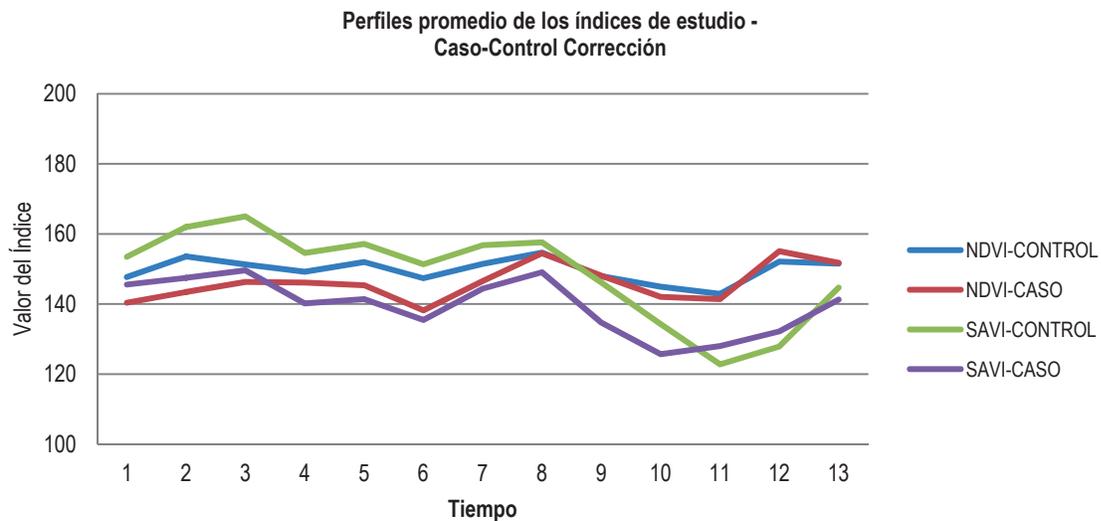
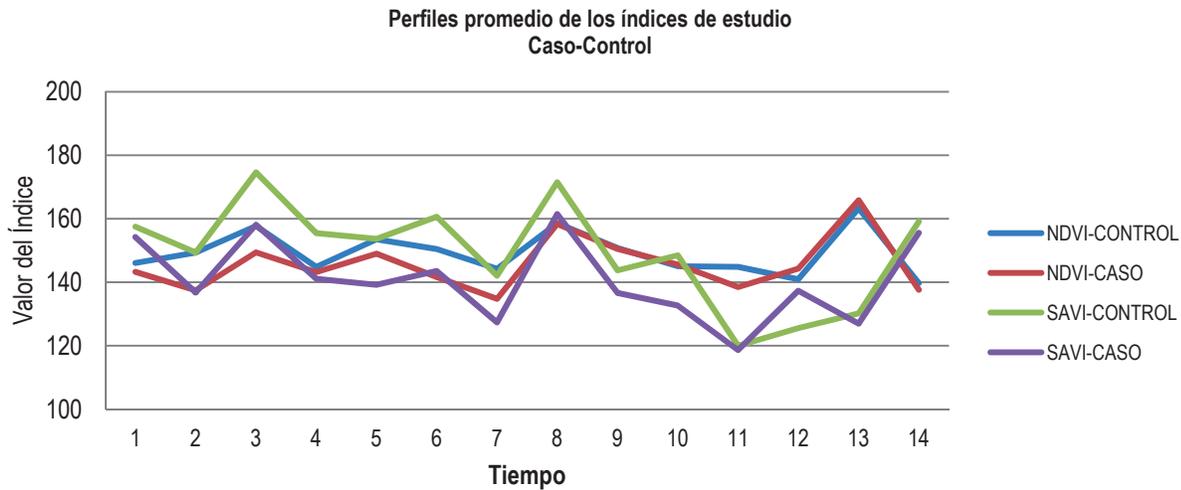
Perfiles promedio de los índices de estudio -  
Sucesión ajustado



Los resultados obtenidos muestran que el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el análisis de varianza no responde a las variables de control establecidas en el estudio a un nivel de significancia del 5%. Sin embargo, al ampliar el nivel de significancia a un 10% se evidencia una diferencia en el proceso de sucesión vegetal entre casos y controles.

En contraste los análisis muestran un mejor ajuste para el índice SAVI en referencia a las variables de control propuestas, tamaño del polígono e intensidad de aspersión con esta última se puede decir que existe un efecto de la aspersión aérea con glifosato en el respuesta de la sucesión vegetal. Por último se evidencia en el análisis de varianza muestra diferencias significativas entre paisajes (variable de bloqueo) lo que implica que el proceso de sucesión vegetal tiene comportamientos diferentes entre ellos.

*Existe diferencia significativa entre los dos grupos (caso-control)*



Los grupos caso y control mantienen las tendencias de intervención al perfil general. El comportamiento entre casos y controles muestra que existe un cambio de nivel pero no tendencia, los controles tiene niveles de sucesión más altos es decir alcanzan valores más altos en los indicadores que implican mayor vigor y biomasa.

Los análisis de varianza muestran que existe una diferencia significativa entre los dos grupos (caso-control) y para los dos índices. Estas diferencias son del 10% y 5% para el NDVI y SAVI respectivamente.

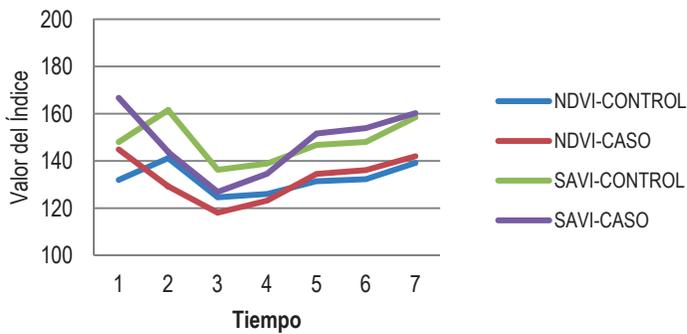
Los perfiles obtenidos muestran una diferencia general en las primeras observaciones con un mayor vigor y crecimiento de la vegetación para el grupo de controles sin embargo, el último período de observaciones señala una tendencia homogénea en ambos grupos (casos y controles).

### Análisis de perfiles paisaje-caso-control

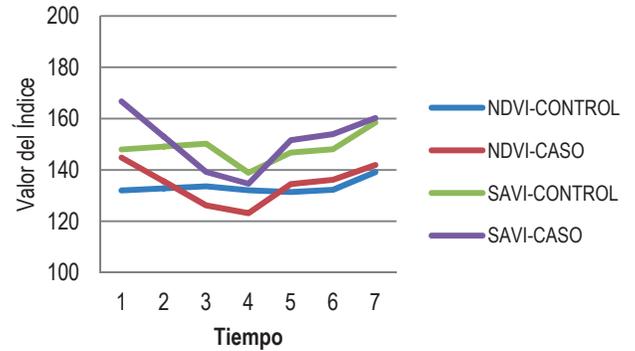
La variable paisaje es significativa para el índice SAVI y no para el NDVI, la construcción de contrastes para determinar las diferencias entre paisajes está asociado a niveles de error mayores al 15%, por tanto, se recomienda usar las desagregaciones en esta categoría solo con fines descriptivos.

A continuación se presenta el comportamiento de los indicadores en los diferentes paisajes y para los grupos

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 4



Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 4 Ajustado

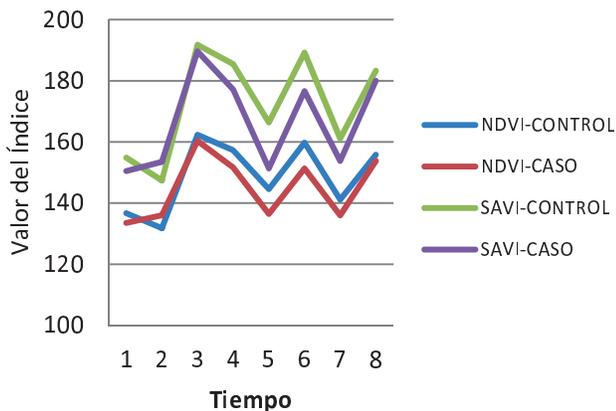


caso y control.

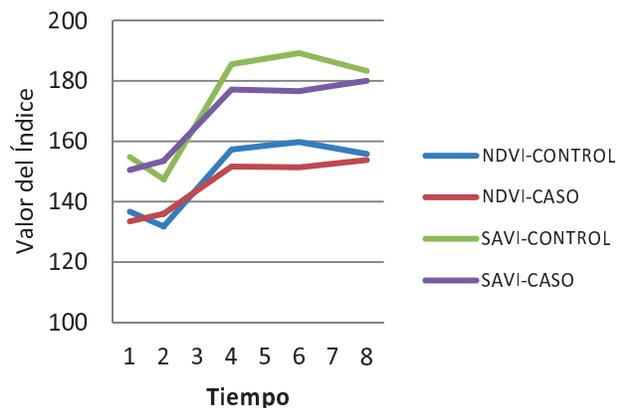
En este paisaje "Lomerío estructural orinocense" los perfiles tienen un punto de intervención marcado el cual no se pudo suavizar con las técnicas empleadas. Se rompe la tendencia de sucesión de los controles por encima de los casos esto puede pasar por la poca variabilidad que presenta los índices en algunos puntos del tiempo.

Para los perfiles promedio sin ajuste hasta la observación 2 se presenta un incremento en el valor de los índices, con un descenso en el nivel en la observación 3 para posteriormente iniciar una curva de comportamiento esperada. Las variaciones en las 3 primeras observaciones pueden deberse a variaciones propias de la imagen o a variables no contempladas.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 5

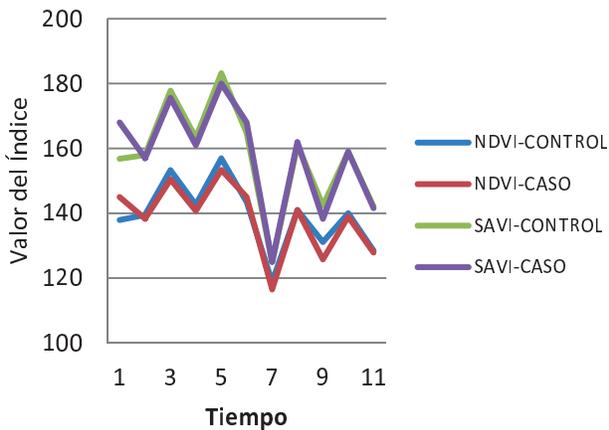


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 5 Ajustado

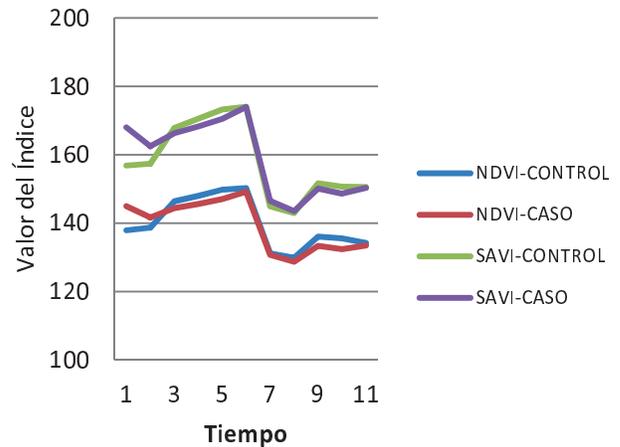


El paisaje 5 “Lomerío fluviogravitacional muy húmedo orinocense”; sigue el comportamiento esperado en este trabajo para los índices de interés el cual es de incremento a través del tiempo. Se presenta cambio de nivel entre los casos y controles y a su vez la tendencia de sucesión más fuerte se presenta durante la 3 y 4 observaciones que puede esperarse correspondan a rastrojos bajos a altos. Para el final del periodo de estudio, se observa una relativa estabilidad en ambos índices que implicaría que las especies ya pasaron su período de máximo crecimiento y están en un estadio de sucesión catalogado como bosque secundario.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 6

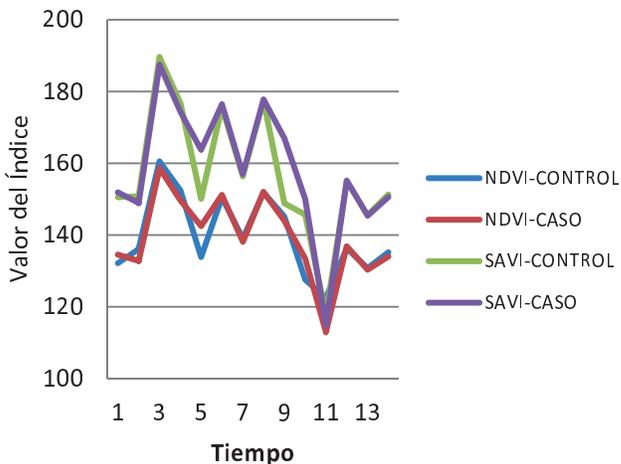


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 6 Ajustado

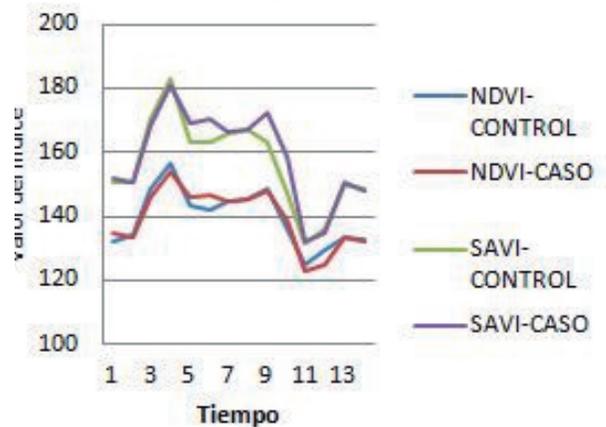


En el paisaje 6 “Lomerío fluviogravitacional orinocense”; los casos y controles siguen una misma tendencia y nivel se podría afirmar que nos existe diferencia marcada. La ruptura de la tendencia y el nivel puede deberse a variables exógenas al proceso o a niveles de imputación altos para este paisaje por una baja representatividad de la muestra. Es de resaltar que este paisaje ubicado en el municipio de Puerto Gaitán se caracteriza por zonas de sabanas y bosques de galería donde normalmente se ubican los cultivos de coca.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 7

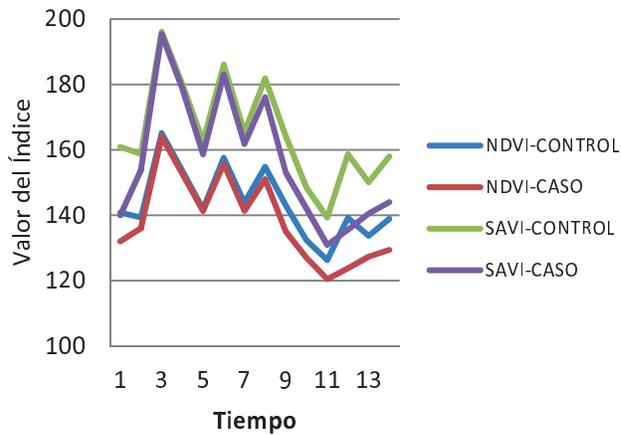


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 7-ajustado

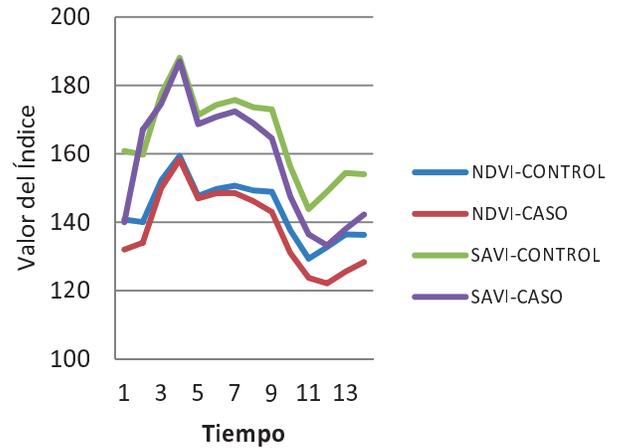


Este paisaje 7 “Lomerío *fluviogravitacional ondulado seco orinocense*” presenta una volatilidad de los datos fuerte y marcada en las primeras observaciones, no se observa una tendencia general en el comportamiento de la sucesión vegetal. Paisaje igualmente caracterizado por presencia de sabanas.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 8

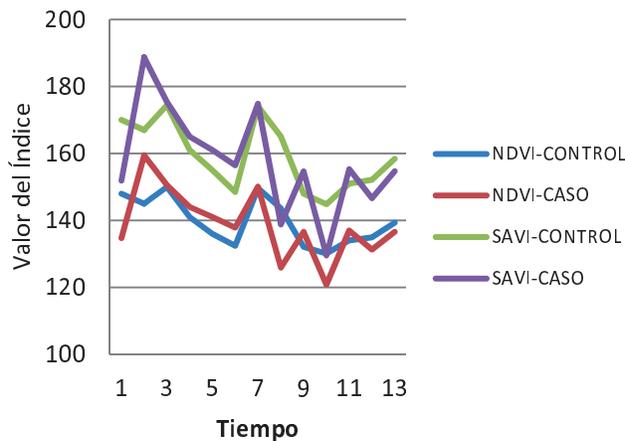


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 8 Ajustado

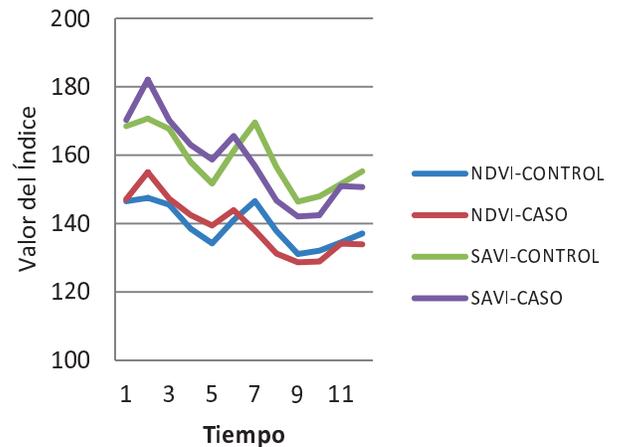


En el paisaje 8 “*Atillanura estructural orinoamazónica*” los cambios de nivel en los grupos caso y control son significativos sin embargo, se rompe la tendencia ascendente iniciada en las primeras observaciones ( 1-4) para continuar con una estabilidad tanto en índices como en grupos para posteriormente bajar los valores e iniciar una nueva tendencia. Estas variaciones podrían atribuirse a condiciones atmosféricas adversas en las imágenes de observación para estos períodos.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 9

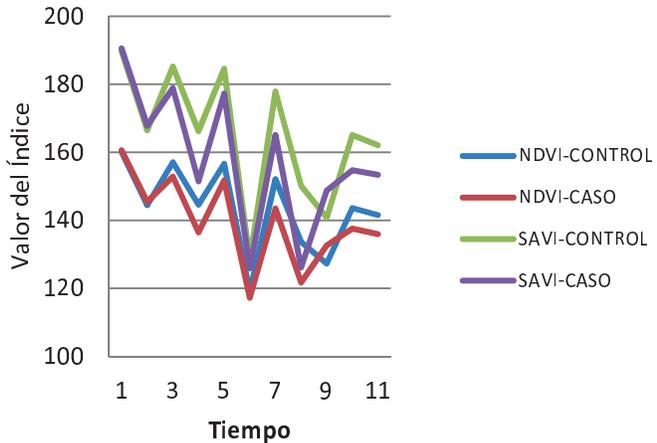


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 9 ajustado

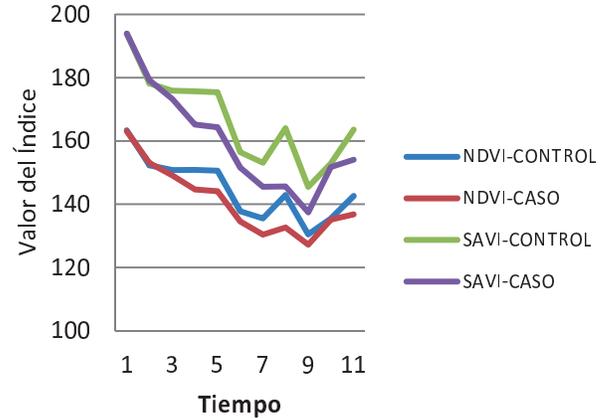


El paisaje 9 “ *Planicie aluvial terrazas orinocenses*”; presenta una tendencia negativa en la curva de sucesión vegetal esperada es decir los valores de los índices no aumentan en el tiempo lo que podría interpretarse como dificultades para el proceso de sucesión dentro del paisaje debido a características del mismo. Las diferencias entre los casos y controles se vuelven a presentar para cada uno de los índices.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 10

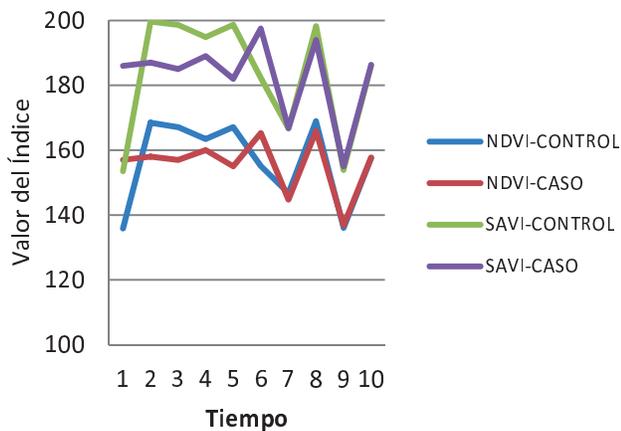


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 10 ajustado

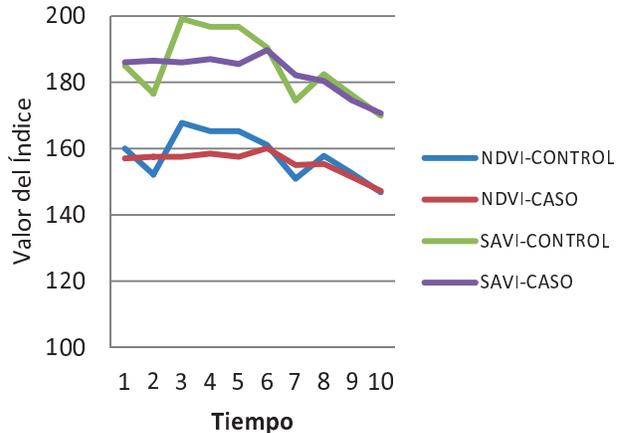


El paisaje 10, “*Lomerío fluviogravitacional amazónico*”, (San José del Guaviare, Calamar y el Retorno) presenta una tendencia negativa en gran parte del período de observación en la sucesión vegetal, encontrando al final un incremento en los valores de ambos índices que concuerda más con las curvas de sucesión esperadas para la zona. Las diferencias de nivel para casos y controles se mantienen para ambos índices.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 11

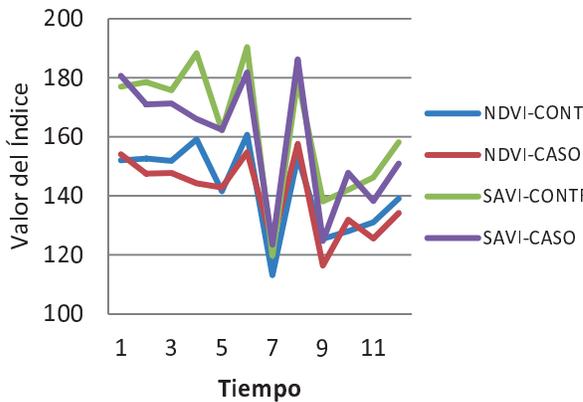


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 11 ajustado

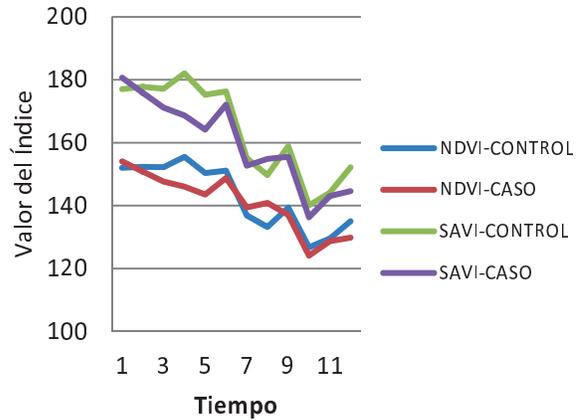


La tendencia del paisaje 11, “Lomerío fluviogravitacional ondulado amazónico” (Miraflores), es relativamente estable para los dos indicadores. En las primeras observaciones se evidencian diferencias entre casos y controles alcanzando mayores valores el grupo control. Sin embargo estas diferencias tienden a desaparecer y adoptan una tendencia negativa en las últimas observaciones que puede estar afectada por variaciones en la calidad de la imagen.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 12

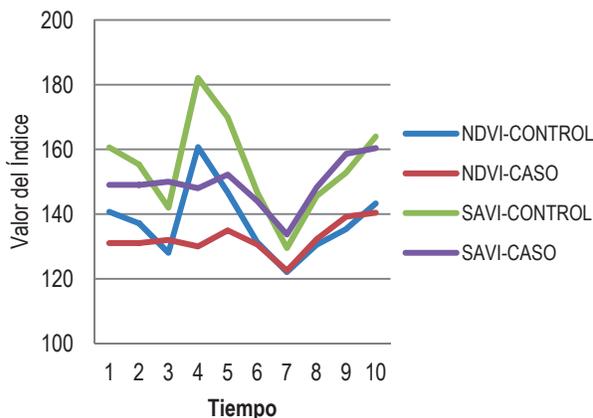


Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje 12 ajustado

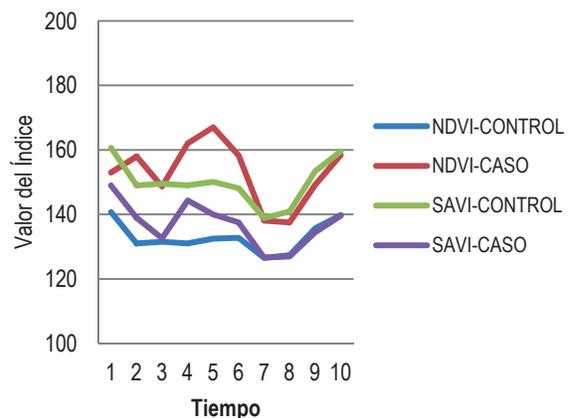


Para este paisaje 12 “Valles aluviales” durante las primeras 5 observaciones se observa una relativa estabilidad en los valores de los índices que puede corresponder a periodos de letargo en el crecimiento vegetal; las causas puede ir desde condiciones intrínsecas del paisaje hasta a regímenes climáticos espaciales durante ese periodo (posibles regímenes de sequía). Las observaciones 7 a 9 marcan una disminución en los valores de los índices sigue para iniciar un incremento en los mismos en las últimas observaciones. Las variaciones que se presentan pueden atribuirse a la diversidad de las coberturas y los tiempos de contribución de las unidades. Las diferencias entre casos y control son mayores durante las primeras observaciones y se minimizan al final del periodo.

Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje13



Perfiles promedio de los índices de estudio - paisaje13 ajustado



Este último paisaje “Mesas tabulares y afloramientos rocosos orinoamazonicos” conserva un nivel de estabilidad del índice para los controles. Se observa al inicio del período un comportamiento estable sin incrementos representativos en los valores iniciando una tendencia ascendente para las últimas observaciones homologando el comportamiento esperado de incremento de vigor y biomasa durante el proceso de sucesión. Caso contrario ocurre con los casos donde existen puntos de volatilidad continua que alteran los niveles y la tendencia de los índices. El comportamiento atípico para este grupo puede tener alguna significancia con la variable de aspersión.

## CONCLUSIONES

### Índice NDVI

- El índice de vegetación normalizado no responde a las variables de control establecidas en la metodología. Por tanto pueden existir factores externos que afecten las variables de respuesta.
- La diferencia entre casos y controles se mantiene a un 10% del nivel de significancia, es decir existe efecto de la aspersión en la sucesión vegetal.
- Existen diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.10$ ) entre los paisajes. Es decir, el comportamiento de la sucesión no es el mismo entre los paisajes.
- Se mantiene las diferencias dentro de paisajes para los casos y los controles.
- Es necesario identificar otras variables de control para homogenizar la volatilidad de la información.

### Índice SAVI

- El índice de vegetación ajustada al suelo responde a las variables de control establecidos en la metodología (Intensidad de aspersión y tamaño del polígono).
- Existen diferencias significativas en la sucesión vegetal entre los polígonos asperjados y no asperjados.
- La evolución del indicador de sucesión vegetal es la misma en tendencias para casos y controles. Las diferencias radican en los cambios de nivel de los dos perfiles., con mayores valores alcanzados para el grupo control lo que indicaría una mayor vigorosidad y biomasa para este grupo con respecto al grupo caso sin que esto implique un obstáculo para el proceso de sucesión en sí.
- Existe diferencias estadísticamente significativas ( $p=0.05$ ) entre los paisajes. Es decir, el comportamiento de la sucesión no es el mismo entre los paisajes.
- Se mantiene las diferencias dentro de paisajes. La sucesión depende de las variables de intensidad de aspersión y el tamaño del lote.
- La aspersión es un factor de riesgo para el indicador de sucesión ya que, minimiza su comportamiento natural mas no lo anula.

## ANEXO 1

**Tabla 8. Distribución de aspersiones y coca según paisajes**

<b>Tipo de Paisaje</b>	<b>Coberturas en sucesión al 2010 en el área afectada por la aspersión entre 2003 y 2010</b>							
	<b>Área de Paisaje en zonas PECIG (has)</b>	<b>Pastos y herbazales (has)</b>	<b>Área de sucesión vegetal (has)</b>	<b>Coca 2003 (has)</b>	<b>Coca 2010 (has)</b>	<b>Bosque Primario 1990 (has)</b>	<b>Bosque Primario 2010 (has)</b>	<b>Otras Coberturas (has)</b>
Lomerío estructural orinocense (4)	21.586	12.782	1.769	934	387	11.823	5.729	920
Lomerío fluviogravitacional muy húmedo orinocense (5)	3.314	912	566	348	253	2.489	1.151	433
Lomerío fluviogravitacional orinocense (6)	5.895	3.350	523	346	15	2.612	1.530	478
Lomerío fluviogravitacional ondulado seco orinocense (7)	8.375	3.584	1.116	1.113	247	6.067	2.135	1.294
Altillanura estructural orinoamazónico (8)	11.540	4.909	2.151	1.038	160	8.723	3.111	1.209
Planicie aluvial, terrazas orinocenses (9)	10.242	5.156	1.370	792	291	6.186	2.174	1.251
Lomerío fluviogravitacional amazónico (10)	50.907	22.160	4.943	3.325	898	42.705	13.946	8.960
Lomerío fluviogravitacional ondulado amazónico (11)	24.468	7.637	5.453	732	809	21.179	8.254	2.314
Valles aluviales orinoamazónicos (12)	18.855	8.034	2.459	1.473	591	13.523	5.456	2.317
Mesas tabulares y afloramientos rocosos orinoamazónicos (13)	1.639	836	191	95	42	1.095	364	206
Otros paisajes (0)	1.066	407	159	15.594	3.589	365	140	-3.230
<b>Total general</b>	<b>157.887</b>	<b>69.767</b>	<b>20.700</b>	<b>25.789</b>	<b>7.282</b>	<b>116.767</b>	<b>43.987</b>	<b>16.151</b>

## ANEXO 2

**Tabla 9. Coberturas a 2010 en áreas no intervenidas por PECIG**

Tipo de Paisaje	Coberturas fuera del área afectada por la aspersión entre 2003 y 2010							
	Área de Paisaje (has)	Pastos y herbazales (has)	Área de sucesión vegetal (has)	Coca 2003 (has)	Coca 2010 (has)	Bosque Primario 1990 (has)	Bosque Primario 2010 (has)	Otras Coberturas (has)
Lomerío estructural orinocense (4)	886.718	248.206	<b>57.613</b>	2.516	488	720.905	547.785	32.626
Lomerío fluviogravitacional muy húmedo orinocense (5)	450.405	67.860	<b>21.649</b>	706	104	419.576	350.272	10.521
Lomerío fluviogravitacional orinocense (6)	1.223.774	776.981	<b>27.333</b>	400	112	202.339	147.797	271.551
Lomerío fluviogravitacional ondulado seco orinocense (7)	528.078	249.282	<b>25.826</b>	929	62	230.238	223.680	29.227
Altillanura estructural orinoamazónico (8)	1.019.093	506.662	<b>31.623</b>	1.297	140	211.078	158.775	321.893
Planicie aluvial, terrazas orinocenses (9)	906.431	185.564	<b>69.708</b>	1.775	341	605.155	544.343	106.474
Lomerío fluviogravitacional amazónico (10)	2.448.935	141.107	<b>39.509</b>	3.552	861	2.335.742	2.198.211	69.248
Lomerío fluviogravitacional ondulado amazónico (11)	1.668.958	19.616	<b>27.185</b>	1.135	467	1.645.737	1.601.581	20.110
Valles aluviales orinoamazónicos (12)	1.114.185	237.047	<b>60.217</b>	2.764	782	741.383	649.412	166.727
Mesas tabulares y afloramientos rocosos orinoamazónicos (13)	504.222	24.603	<b>10.780</b>	242	110	395.731	383.149	85.580
<b>Total general</b>	<b>10.750.800</b>	<b>2.456.927</b>	<b>371.443</b>	<b>15.316</b>	<b>3.467</b>	<b>7.507.884</b>	<b>6.805.005</b>	<b>1.113.957</b>

## ANEXO 3

### MODELO GENERAL MIXTO

El análisis de varianza que corresponden a estos modelos está determinado por

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_j + \pi_{i(j)} + \beta_k + \alpha\beta_{jk} + \beta\pi_{ki(j)} + \gamma(X_{ijk} - \bar{X}_k) + \varepsilon_{ijk}$$

$y_{ijk}$ : Corresponde a la observación registrada para el sujeto  $i$  del grupo  $j$  en el ensayo  $k$  sobre la variable dependiente  $y$ , para el caso particular la variable respuesta corresponde a el índice de sucesión vegetal

$\mu$ : Es la media global de la variable dependiente.

$\alpha_j$ : Es el efecto atribuible al factor de agrupamiento (aspersión-no aspersión).

$\pi_{i(j)}$ : Es el efecto atribuible al factor individuo.

$\beta_k$ : Es el efecto atribuible al factor de medias.

$\alpha\beta_{jk}$ : Es el efecto de la interacción de los factores de agrupamiento y medias

$\beta\pi_{ki(j)}$ : Es el efecto de la interacción de los factores de individuo y medias

$\gamma$ : Es el coeficiente de regresión intragrupo, promediada para los grupos existentes sobre una covariante  $X$  y  $X_k$  es la media de tal covariante en el ensayo  $k$ ;

$\varepsilon_{ijk}$ : Es el error residual no atribuible a componentes anteriormente especificados.

La siguiente ecuación expresa los contrastes usados en la construcción de las curvas de crecimiento o perfiles de respuesta de los grupos de caso-control.

$$L = A \square C t$$

con  $A(h-1) \times h$  la matriz que mide el comportamiento de los tratamientos o grupos y  $C(t-1) \times t$  de los tiempos.

## BIBLIOGRAFÍA

Baeza, S., Paruelo, J., & Altesor, A. (2006). caracterización funcional de la vegetación del Uruguay mediante el uso de los sensores remotos. *Interciencia* .

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel ciencia.

Delgado, R., & Pons, X. (1999). Seguimiento de la regeneración vegetal post-incendio mediante el empleo del NDVI. *Teledetección. Avances y aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección*. Albacete: España.

Farina, A. (2011). *Ecología del Paisaje*. España.

Huesca, M., Litago, J., Escribano, P., Palacios-Orueta, A., & Merino de Miguel, S. (2009). Utilidad del índice espectral para caracterizar tipos de vegetación en zonas bioclimáticas distintas mediante análisis de series de tiempo. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la asociación española de teledetección*.

Huete, A. G. (1992). Normalization of Multidirectional Red and Near-Infrared Reflectances with the SAVI. En *Remote Sensing of Environment* (págs. 1-20).

Huete, A. (1988). Remote sensing of environment. En *A soil Adjusted Vegetation Index ( SAVI)* (págs. 295-309).

International Institute For Geo-Information Science and Earth Observation. (2004). *Principles of Remote Sensing*. Enschede, The Netherlands.

Jensen, J. R. (2000). *Remote Sensing of the environment an earth resource perspective*. Prentice Hall.

Jong, F. D. (2006). *Basic Principles and Prospective Applications*. Springer.

Lozano, F. (2007). Caracterización pluriescalar del régimen de incendios y la regeneración post-fuego mediante índices espectrales derivados de sensores Landsat. Aplicación en espacios protegidos ( N.O.España). *Revista de Teledetección* , 91-92.

M.A. Gilabert, J. G.-P.-H. (1997). Acerca de los índices de Vegetación. *Revista de Teledetección* , 1,10.

Navarro, J., Meléndez, I., & Almendro, C. (2008). *Segmentación de imágenes mediante el empleo de índices de vegetación para la estimación de parámetros edáficos.*(.). Recuperado el Noviembre de 2012, de [http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/XII\\_2/080%20-%20Navarro%20Pedreno%20et%20al.pdf](http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/XII_2/080%20-%20Navarro%20Pedreno%20et%20al.pdf)

Quintano, C., Shimabukuro, Y., Fernández, A., & Delgado, J. (s.f.). A spectral unmixing approach for mapping Burned areas in Mediterranean countries. *International Journal of Remote Sensing* , 1493-1498.

Salvador, R., & Pons, X. (1996). *Analysis of the discrimination of burnt sites temporal evolution in a mediterranean area*. Barcelona, España.

Sanger, J. (1971). Quantitative investigation of leaf pigments from their inception in buds through autumn coloration to decomposition in falling leaves. *Ecology* , 1075-1089.

Serrano, V., & Begueria, S. I. (2006). *Diversidad espacial de la actividad vegetal en campos abandonados del Pirineo Central español: análisis de los procesos de sucesión mediante imágenes Landsat ( 1984-2001)*. Zaragoza, España.

Simmons, E. (2004). *Landscape ecology, the concepts*. Elsevier .

Tucker, C. (1979). Red and photographic infrared lines combination for monitoring vegetation. . En C. Tucker, *Remote sens. Environment* (págs. 127-150).

Woodcock, C. S. (Noviembre de 2003). Monitoring Forest Succession With Multitemporal Landsat Images: Factors of Uncertainty.

Zonneveld, I. (1995). *Land Ecology, an Introduction to Landscape Ecology*. Amsterdam, Holanda.