INFORME DEL PROYECTO:

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS GEOESPACIAL-AMBIENTAL PARA EL ESTUDIO DE TENDENCIAS EN LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y LA DINÁMICA DEL ECOSISTEMA EN TREINTA Y DOS (32) CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE COSTA RICA: CUENCA RÍO CAÑAS

Elaborado por: Geoinn Geospatial Innovations, S.A.

19/10/2018

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo

AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS, ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI

Yo, Annette Henchoz Castro
_____

N° Cédula: 1-0725-0409
_____

Dependencia: Gerencia General

_____

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: centrodoc@aya.go.cr **N° Teléfono**: 2242-5487

Annette Henchoz Castro
Firmado digitalmente por Annette Henchoz Castro
Fecha: 2019.11.25 16:07:20 -06'00'

Firma: _____

Participantes principales

Gómez, Adolfo (SIG/Teledetección)
Geógrafo
Maestría en Sistemas de Información Geográfica
Especialista en Erdas Imagine
Correo electrónico: adolfo.gomez@geoinn.com

Piña, Alexis (Geodesia y Topografía)
Ingeniero Geodesta
Maestría en Geodesia y Catastro.
Diplomado en Tecnologías de Información Geográfica
Correo electrónico: alexis.pina@geoinn.com

Sánchez, Yalmar (SIG/Teledetección)
Ingeniero Topógrafo
Especialista en Erdas Imagine
Correo electrónico: yalmar.sanchez@geoinn.com

Salazar, Javier (SIG/Teledetección)
Geógrafo
Especialista en Erdas Imagine.
Correo electrónico: javier.salazar@geoinn.com

Ramírez, Tatiana (SIG/Teledetección)
Geógrafa
Especialista en Erdas Imagine.
Correo electrónico: tatiana.ramirez@geoinn.com

Solano, Vanessa (SIG/Teledetección)
Geógrafa
Especialista en Erdas Imagine.
Correo electrónico: vanessa.solano@geoinn.com

Molina, María José (SIG/Teledetección)
Geógrafa
Especialista en Erdas Imagine.
Correo electrónico: maria.molina@geoinn.com

Tabla de contenido

Lista de Figuras 4
Lista de Cuadros 4
Lista de Gráficos 5
Objetivos 6
Objetivo General 6
Objetivos Específicos 6
Sinopsis 6
Introducción 6
Metodología 10
Etapa 1. Datos y software 10
Imágenes Satelitales 10
Datos de Erosión y Sedimentación 13
Etapa 2: Geodesia y Reconocimiento de Campo 14
Procedimiento de Medición de puntos de Control para apoyo geométrico y clasificación de coberturas 15
Etapa 3: Procesamiento de Imágenes, Teledetección y Aplicación de los Modelos de Simulación y Análisis Geoespacial-Ambiental 18
Ortorrectificación 18
Corrección Atmosférica 19
ATCOR2 (algoritmo empleado la corrección atmosférica de las imágenes) 20
Proceso de Clasificación Supervisada 22
Análisis de cambio y Modelo de predicción de cambios a futuro 27
Obtención del modelo digital del terreno, modelo digital de superficie, curvas de nivel a partir de datos de RADAR-SAR 34
Cálculo y estimación de Erosión y Sedimentación 36
Etapa 4. Elaboración de cartografía temática 43
Análisis de Resultados 43
Cuenca Río Cañas 43
Análisis Histórico en el Cambio del Uso de la Tierra 44
Estimación de Sedimentación y Erosión anual potencial para el periodo 2016 51
Tendencia de cambios a futuro en el uso de la tierra 56
Conclusión 60
Referencias 60

Lista de Figuras

Figura 1. Cuencas hidrográficas agrupadas en 14 AOIs. 7
Figura 2. Visor gráfico del servicio Earth Explorer de la USGS..... 10
Figura 3. Detalle de las imágenes SPOT adquiridas. 11
Figura 4. Verificación de Parcelas. 17
Figura 5. Comprobación en Campo de Usos de la Tierra. 17
Figura 6. Dos imágenes nivel básico vinculadas.. 19
Figura 7. Dos imágenes a nivel ortorrectificado. 19
Figura 8. Izquierda imagen original, derecha pre visualización de la eliminación de neblina. 21
Figura 9. Izquierda imagen original, derecha después de la reducción de neblina y corrección atmosférica..... 21
Figura 10. Módulo de calibración espectral SPECTRA, donde se valida el dato de campo. 22
Figura 11. Modelo para el procesamiento de imágenes satelitales 24
Figura 12. Análisis general y por clase de uso de suelo de las matrices de contingencia. 25
Figura 13. Cálculo del índice Kappa 25
Figura 14. Ejemplo de resultados de la clasificación no supervisada 26
Figura 15. Corrección de los Usos mediante la herramienta Fill. 26
Figura 16. Flujo de proceso de clasificación. Fuente J.F Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011. 28
Figura 17. El Área a Suministrar con Datos de Elevación es de 6.043 Km^2 35
Figura 18. Resoluciones de MDT..... 35
Figura 19. Esquema metodológico del procedimiento aplicado a calcular RUSLE actual. 38
Figura 20. Ubicación del área de estudio. 44
Figura 21. Mapa de cambios en el uso de la tierra para las décadas de 1996-2006 y 2006-2016. .. 47
Figura 22. Usos de la tierra períodos alrededor de 1976 y 2016..... 50
Figura 23. Mapa de Exportación de sedimentos para la Cuenca Río Cañas, año 2016. 53
Figura 24. Mapa de retención de sedimentos para la Cuenca Río Cañas, año 2016. 54
Figura 25. Mapa de Pérdida de Suelo USLE para la Cuenca Río Cañas, año 2016. 56
Figura 26. Mapa de cambio de uso de la tierra, periodos 2001, 2015 y la proyección para el 2029. 59

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Cuencas hidrográficas del Proyecto. 8
Cuadro 2. Cuencas hidrográficas del Proyecto (continuación)..... 9
Cuadro 3. Imágenes satelitales actuales adquiridas 12
Cuadro 4. Tabulación cruzada 31
Cuadro 5. Esquema de codificación de transición. 32
Cuadro 6. Ejemplo para cuatro clases. 32
Cuadro 7. Cobertura de la tierra asociada a los factores definidos C y P. 41
Cuadro 8. Riesgos de erosión en toneladas por hectárea por año y su equivalencia en milímetros por año 42
Cuadro 9. Usos de la tierra para las décadas de 1996 -2006 y 2006-2016 46

Cuadro 10. Usos de la tierra períodos alrededor de 1976 y 2016. 48
Cuadro 11. Áreas que cuantifican la exportación de sedimentos hacia ríos y quebradas según los rangos (ton/pixel/año). 52
Cuadro 12. Áreas que cuantifican la retención de sedimentos por rangos (ton/pixel/año)..... 54
Cuadro 13. Áreas que cuantifican la pérdida de suelo según los rangos (ton/pixel/año). 55
Cuadro 14. Uso de la tierra por área (km^2) para 1985, 2015 y para la proyección de 2045. 57

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Comparación porcentual del uso de la tierra entre 1988 y 2014. 50
Gráfico 2. Cambios temporales para los años 2001, 2015 y 2029..... 58

Objetivos

Objetivo General

- Aplicar modelos de simulación y análisis geoespacial-ambiental para el estudio de tendencias en la cobertura y uso de la tierra y la dinámica del ecosistema en treinta y dos (32) cuencas hidrográficas de Costa Rica.

Objetivos Específicos

- Suministrar Modelos Digitales de Terreno, Modelos Digitales de Elevación, e imágenes satelitales para las cuencas de interés.
- Determinar y analizar las coberturas y usos de la tierra actuales, sus cambios históricos y la tendencia de cambios a futuro para las cuencas de interés.
- Determinar la dinámica de erosión hídrica y sedimentación para las cuencas de interés.

Sinopsis

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) plantea mediante este proyecto, la necesidad de adquirir una robusta base de datos y análisis correspondientes, que les permita conocer las tendencias en la cobertura y uso de la tierra, y la dinámica del ecosistema en treinta y dos (32) cuencas hidrográficas de Costa Rica.

Para lograr este cometido, es necesario adquirir insumos como Modelos Digitales de Terreno (MDS), Modelos Digitales de Elevación (MDE), e imágenes satelitales para las cuencas de interés. A partir de estos datos y la aplicación de modelos de simulación y análisis geoespacial-ambiental, es posible determinar las coberturas y usos de la tierra actuales, sus cambios históricos y la tendencia de cambios a futuro; además de la dinámica de erosión hídrica y sedimentación para las cuencas de interés.

Por lo tanto, el presente informe expone las metodologías, productos y análisis generados en este estudio.

Introducción

Para generar los insumos necesarios (MDS, MDE e imágenes satelitales) para los procesos de detección de las coberturas y usos de la tierra actuales, sus cambios históricos y la tendencia de

cambios a futuro; además de la dinámica de erosión hídrica y sedimentación en las cuencas solicitadas en el presente proyecto, se realizó un agrupamiento de las cuencas hidrográficas por AOIs (Áreas de Interés por sus siglas en inglés).

Los AOIs se establecen en función de los requerimientos de los gestores de búsqueda en línea de las imágenes satelitales y los MDS y MDE, que requieren un mínimo de 5 Km entre nodos o vértices de los polígonos (AOIs) utilizados para las búsquedas. Se toma en consideración, además, que generalmente las imágenes satelitales cubren porciones de terreno superiores a las cuencas por separado, por lo que el agrupar dichas cuencas en AOIs, sirve para mostrar un área de interés que abarque mayor proporción de las imágenes satelitales.

Se conformaron por lo tanto, 14 AOIs que contienen la totalidad de las cuencas hidrográficas del proyecto. Tal como se aprecia en la Figura 1:

Figura 1. Cuencas hidrográficas agrupadas en 14 AOIs.

Tal como el nombre de este proyecto lo indica, este estudio iba en función de 32 cuencas hidrográficas de Costa Rica, definidas según los intereses del AyA. Sin embargo, el AyA, en lugar de proporcionar 32 cuencas hidrográficas, proporcionó un total de 54 cuencas hidrográficas; lo cual planteó la necesidad de redefinir las cuencas mediante la agrupación de éstas. Por lo tanto, de común acuerdo, GEOINN y el AyA redefinieron las cuencas a trabajar según la clasificación y nomenclatura que se muestra en el Cuadro 1 y en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Cuencas hidrográficas del Proyecto.

AOI	Cuencas Anteriores	Área (Km^2)	Cuencas Redefinidas	Área (Km^2)
1	Cuenca río Negro	4.89	Cuenca Río Liberia	40.57
	Cuenca Quebrada Zopilote	2.15		
	Cuenca Quebrada Parque Rincón de la Vieja	2.08		
	Cuenca Quebrada Provisión	3.68		
	Cueca Quebrada Rancho Grande	6.48		
	Cuenca Río Liberia	21.3		
2	Cuenca Río Cañas	39.34	Cuenca Río Cañas	39.34
	Cuenca Río Sarai	15.19	Cuenca Río Sarai	15.19
3	Cuenca Quebrada Tigra	1.61	Cuenca Quebrada Tigra	1.61
4	Cuenca Río Quiriman	160.11	Cuenca Río Quiriman	160.11
	Cuenca Río Potrero Nicoya	33.82	Cuenca Río Potrero Nicoya	33.82
5	Cuenca Río Bongo	287.25	Cuenca Río Bongo	287.25
6	Cuenca Río Tenorio	351.35	Cuenca Río Tenorio	351.35
	Cuenca Río Cañas - río Higuerón	365.88	Cuenca Río Cañas - río Higuerón	365.88
7	Cuenca Río Tres Amigos	576.48	Cuenca Río Tres Amigos	576.48
	Cuenca Río San Carlos	990.94	Cuenca Río San Carlos	990.94
	Cuenca Río Barranca	422.84	Cuenca Río Barranca	422.84
	Cuenca Quebrada Los Mora	0.59	Cuenca Quebrada Los Mora	0.59
	Cuenca Río Machuca	19.75	Cuenca Río Machuca	19.75
8	Cuenca Quebrada Piedra Bruja	2.35	Cuenca Quebrada Piedra Bruja	2.35
9	Cuenca Río Siquirres	11.50	Cuenca Río Siquirres	11.50
10	Cuenca río Banano	179.12	Cuenca río Banano	179.12
	Cuenca Río Bananito	109.13	Cuenca Río Bananito	109.13

Cuadro 2. Cuencas hidrográficas del Proyecto (continuación).

AOI	Cuencas Anteriores	Área (Km²)	Cuencas Redefinidas	Área (Km²)
11	Cuenca Río Macho	28.46	Cuenca El Llano	282.49
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 1	1.46		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 2	2.45		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 3	1.17		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 4	3.11		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 5	2.94		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 6	0.38		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 7	0.42		
	Cuenca Zona Hídrica Orosi 8	0.31		
	Cuenca Río Purisil	29.92		
	Cuenca Río Humo	9.56		
	Cuenca Río Grande de Orosi	186.13		
	Cuenca Río Pejibaye	16.19		
12	Cuenca Río Oro	3.01	Cuenca río Oro	3.01
	Cuenca Quebrada Lajas	0.83	Cuenca Quebrada Lajas	0.83
	Cuenca Río Poás	6.29	Cuenca ríos Poás-Limón	7.74
	Cuenca Río Limón	1.44		
	Cuenca Quebrada Navajas	2.68	Cuenca ríos Uruca-Navajas	6.46
	Cuenca Río Uruca	3.79		
	Cuenca Río Negro	7.02	Cuenca ríos Negro-Tabarcia	14.62
	Cuenca Río Tabarcia	7.60		
	Cuenca Río Jorco	5.67	Cuenca río Jorco	5.67
13	Cuenca Río Damas	1.42	Cuenca ríos Damas-Tanques	2.46
	Cuenca Quebrada Tanques	1.04		
14	Cuenca Río Tiribí	14.00	Cuenca río Tiribí	14.00
	Cuenca Río Macho	23.86	Cuenca AOI 14	53.82
	Cuenca Quebrada Piedras	2.18		
	Cuenca Río Virilla	21.06		
	Cuenca Río Purral	6.73		

Una vez redefinidas a 31 cuencas hidrográficas y agrupadas éstas en 14 AOIs, fue posible realizar las búsquedas y adquisiciones de imágenes satelitales correspondientes, así como de los Modelos Digitales de Superficie y los Modelos Digitales de Elevación.

Metodología

Etapa 1. Datos y software

Imágenes Satelitales

Desde el sitio del Servicios Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), denominado EARTH EXPLORER, se procedió a descargar las imágenes históricas de los últimos 40 años de los distintos sensores LANDSAT, como por ejemplo: MSS (1972-1987), TM (1984-1997), ETM+ (1999-2003). En este sitio, se pueden introducir distintos criterios de búsqueda (fechas, porcentajes de nubes, sensor, entre otros) (Figura 2).

Cabe destacar que los análisis se realizaran para los últimos 40 años en periodo de estación seca, para cada una de las cuencas en estudio. Donde para los años que van de 1972 al 2000 se realizaron análisis de cada 10 años, mientras que del 2000 al 2016 fue para cada 5 años. Esto debido a la cantidad de imágenes que se adquirieron para todo el periodo de 1972 al 2016.

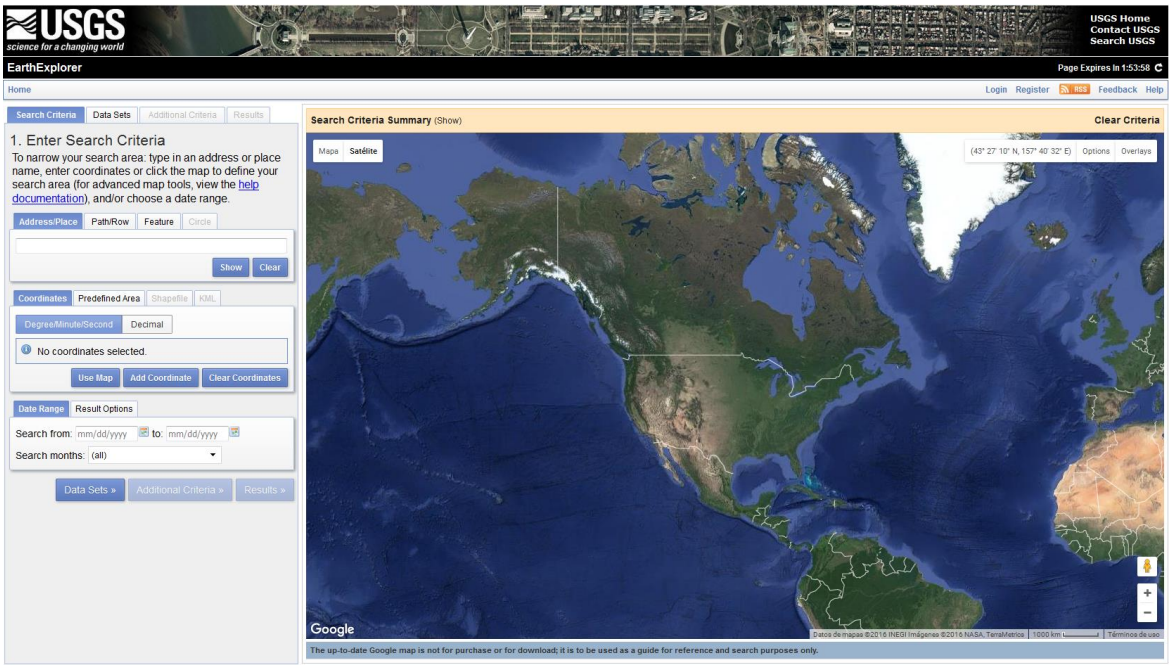


Figura 2. Visor gráfico del servicio Earth Explorer de la USGS.

Por otro lado, para obtener el uso actual de la tierra se recurrió a las imágenes SPOT de fechas recientes para las cuencas en estudio. A continuación, se muestra el detalle de cada una de las imágenes SPOT adquiridas (ver Figura 3).

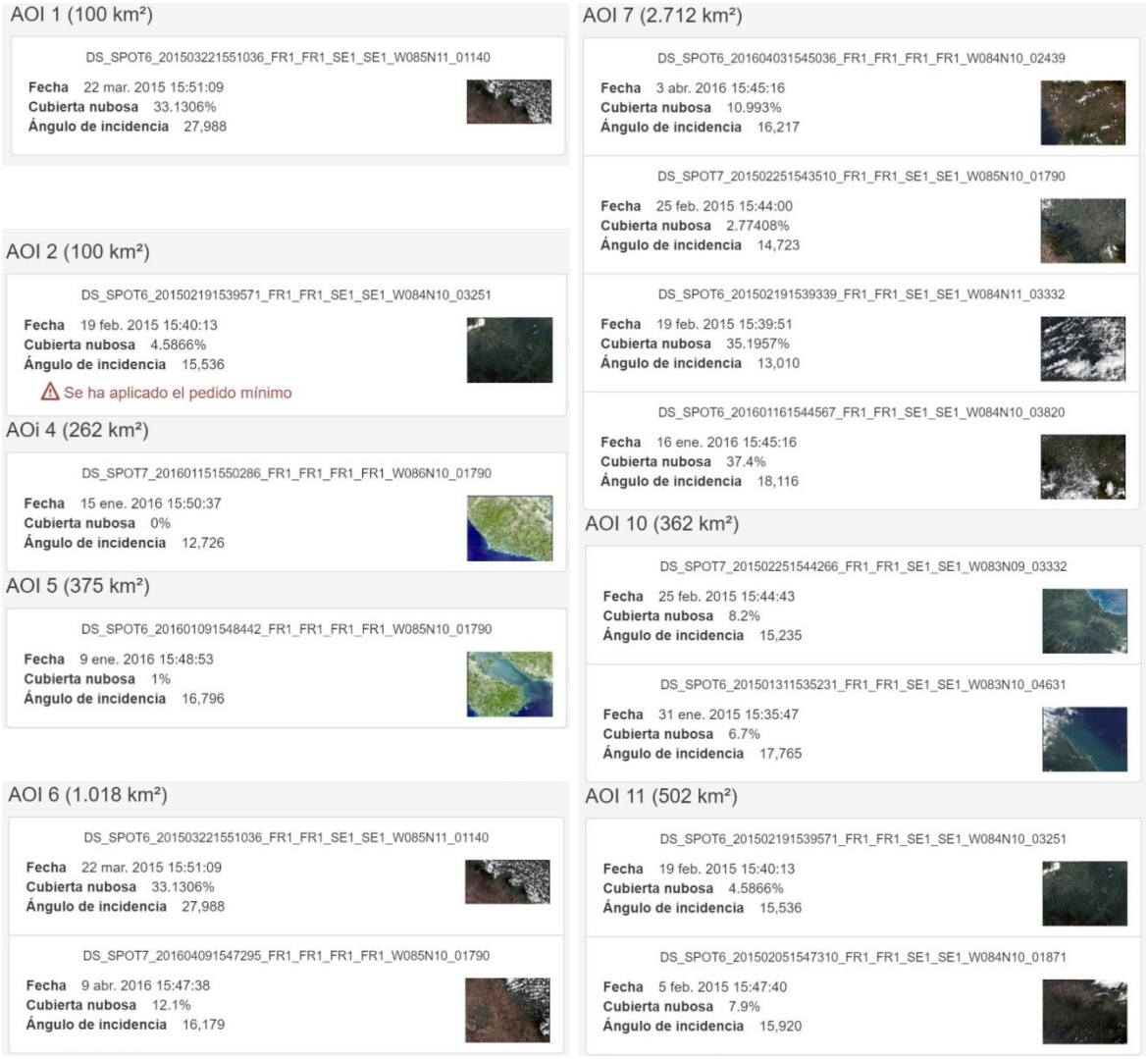


Figura 3. Detalle de las imágenes SPOT adquiridas.

Para el caso de los AOI 3, AOI 9 y AOI 14 se complementó con imágenes satelitales de DigitalGlobe de los sensores WorldView-2 y GeoEye-1, mientras que para el AOI 8, AOI 12 y el AOI 13 con imágenes de Airbus Defence and Space del satélite Pléiades-1. El detalle de todas las imágenes satelitales por AOI se muestra a continuación en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Imágenes satelitales actuales adquiridas

AOIS	IMÁGENES SATELITALES		
	Satélite	**Resolución espacial**	**Fecha**
AOI 1	SPOT 6	1.5 m	22-3-2015
AOI 2	SPOT 6	1.5 m	19-2-2015
	RapidEye-2	5 m	11-2-2013
AOI 3	WorldView-2	50cm	14-2-2015
AOI 4	SPOT 7	1.5 m	15-1-2016
AOI 5	SPOT 6	1.5 m	9-1-2016
AOI 6	SPOT 6	1.5 m	22-3-2015
	SPOT 7	1.5 m	9-4-2016
AOI 7	SPOT 6	1.5 m	3-4-2016
	SPOT 7	1.5 m	25-2-2015
	SPOT 6	1.5 m	19-2-2015
	SPOT 6	1.5 m	16-1-2016
AOI 8	Pléiades-1	50cm	25-2-2016
	Pléiades-1	50cm	30-11-2015
AOI 9	GeoEye-1	50cm	10-03-2016
AOI 10	SPOT 7	1.5 m	25-02-2015
	SPOT 6	1.5 m	31-01-2015
	RapidEye-2	5 m	13-12-2013
AOI 11	SPOT 6	1.5 m	19-02-2015 (1)
	SPOT 6	1.5 m	19-02-2015 (2)
	SPOT 6	1.5 m	05-02-2015
AOI 12	Pléiades-1	50cm	22-02-2016
	Pléiades-1	50cm	23-02-2016 (1)
	Pléiades-1	50cm	23-02-2016 (2)
AOI 13	Pléiades-1	50cm	22-02-2016
AOI 14	WorldView-2	50cm	22-01-2016
	GeoEye-1	50cm	20-02-2016
	GeoEye-1	50cm	22-03-2015

Datos de Erosión y Sedimentación

Las fuentes de datos presentadas a continuación se usaron para generar los productos hidrometeorológicos (balances hídricos) anuales, mensuales, y del modelo RUSLE (Revised Unified Soil Loss Equation basado en Wischmeier y Smith, 1978) para estimar la erosión potencial en conjunto con los datos levantados en campo además de información extraída del World DEM de alta resolución provenientes de AirBUS e imágenes de los sensores Landsat, SPOT, WorldView-2 y GeoEye-1; también se utilizaron fuentes de datos que son de libre acceso.

1. Datos hidro-meteorológicos:

    a) http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16

    La Universidad de Montana, EU ofrece productos del sensor remoto MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) procesados para estimación de la evapotranspiración actual y potencial basado en el método Penman-Monteith con resolución espacial de cerca de 1 Km^2 y cada dos semanas desde el 2000.

    b) http://www.engr.scu.edu/~emaurer/global_data/

    Este producto climatológico permite evaluar datos mensuales a resolución de 0.5° desde 1950 hasta 2099 usando un algoritmo de "downscaling" de escenarios de CMIP3 (Community Model Intercomparison Project phase 3).

2. Información de suelos:

    a) http://soilgrids.org/index.html

    El producto más reciente de información de suelos (tipo de suelos y características físicas) a nivel global con una resolución espacial de 1 Km^2.

3. Usos de la tierra:

    a) Se realizaron usos de la tierra históricos y actuales con imágenes de distintos sensores, descrito en la sección anterior.

4. Topografía:

a) Se utilizó el WorldDem de AirBUS, que presenta una resolución de 12 m por pixel, producto de imágenes radar, es un producto de alta precisión de cobertura total del terreno porque no se ve afectada por la cobertura de nubes que existe en el sitio. Es un Modelo Digital de Terreno que se adquirió para el 2014, es decir es el MDT más reciente para dicha zona en la actualidad y el de mayor uniformidad que se puede encontrar a nivel mundial.

5. Software o programas utilizados:

    a. ERDAS IMAGINE
    b. ARCGIS
    c. QGIS
    d. INVest
    e. Dinámica EGO

Etapa 2: Geodesia y Reconocimiento de Campo

Una de las técnicas más utilizadas que ha tenido grandes adelantos en cuanto al levantamiento de coordenadas para trabajos geodésicos y topográficos, es la metodología GNSS-Diferencial; la cual consiste en el Procesamiento de la data recolectada en campo por medio de mediciones Satelitales, la cual permite generar coordenadas de precisión sub-métrica. Hoy en día esta técnica es una de la más utilizadas en trabajos de producción masiva de Puntos de Control y de Apoyo para levantamientos a gran escala, con resultados en campo de una alta calidad de muy pocos centímetros por punto levantado con poco tiempo de medición.

La constelación de satélites para posicionamiento, mediante la metodología anteriormente descrita en levantamientos de coordenadas en todo el mundo, ha venido realizando grandes adelantos en el mejoramiento de la calidad en función del tiempo, tanto en el periodo de medición propiamente dicho como en la fase de procesamiento. Esto con el fin de generar resultados a corto plazo y con una alta calidad en proyectos de producción masiva como lo son las de obras de ingeniería, levantamientos topográficos, ingeniería de detalle y conceptual.

En tal sentido, de acuerdo de la naturaleza del servicio contratado, se realizó el levantamiento de Puntos GNSS, con la finalidad de realizar controles geométricos para el Proyecto, y a su vez generar una base cartográfica confiable y actualizada que permita dar respuesta inmediata a los planteamientos de ubicación espacial, para la ejecución de los diferente procesos de ingeniería que se llevaran dentro del área de estudio.

Planificación de mediciones

Se realizó la planificación del levantamiento en base a los vértices geodésicos oficiales para el trabajo, para lo cual se midieron nuevos puntos de control cumpliendo el Decreto n° 33797-MJ-MOPT que oficializa el Datum de Coordenadas Horizontales CR-05 elipsoide de Referencia WGS-84, Proyección Horizontal CRTM05 para Costa Rica, y el Decreto Ejecutivo Nº 139 del 30 de junio de 2006 aprobando la utilización del Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84 o SIRGAS2000).

Recolección de Información Preliminar

Para la planificación de las mediciones se recolectó toda la información necesaria; dicho material constó de:

a) Información general acerca de los puntos de apoyos (Puntos perteneciente a la Red de Referencia), como los puntos enmarcados en la Red Primaria de Observación Continua.
b) Diseño de especificaciones técnicas y parámetros geodésicos. Para la ejecución de las mediciones de los Puntos de Control Terrestres se establecieron las siguientes especificaciones:
    - Equipos GNSS navegador.
    - Intervalo de Captura: 1 segundo
    - Máscara de elevación: 10 º.
    - Tiempo de Medición: Dependiendo de la longitud de las líneas bases y configuración de los satélites en la hora de medición.
    - Medición de la altura de la antena: Vertical.

Visita de Campo

Para el desarrollo de este estudio se implementó un plan metodológico que implicó dos etapas principales: (1) La recolección de información primaria mediante visita al campo, así como la revisión de fuentes secundarias y (2) Procesamiento de la información con su correspondiente análisis.

Para esto se planteó el uso de equipos GPS Navegador GIS. Los datos los recogen los equipos de campo en las parcelas, subparcelas, puntos de medición, sección de uso/cubierta del terreno, clase/uso de cubierta del terreno y variaciones. Las principales fuentes de información fueron:

- Las mediciones y observaciones de campo.

- Las entrevistas con los informadores clave (externos e internos), con los grupos e individuos centrales y las familias elegidas al azar.

Estas dos fuentes principales de información implicaron el uso de diferentes métodos y enfoques que se complementan y triangulan entre sí. Dependiendo de los datos a recogidos y de las condiciones de campo, una de las fuentes pudo predominar (p.ej. áreas muy pobladas frente a las poco pobladas). Adicionalmente, se hicieron observaciones por los equipos de campo para confirmar la información obtenida a partir de las imágenes.

La visita de campo permitió identificar los cambios existentes a través del tiempo sobre recursos naturales e inventario forestal, sistemas agrícolas, y de gestión de las comunidades, población local, costumbres y sustento en el contexto socioeconómico, etc. Esto por ser de gran importancia de ser estudiados y obtener un mejor conocimiento sobre las realidades locales y sus usos del suelo.

El objetivo de esta fase fue realizar, para cada una de las parcelas que constituyen las diferentes áreas de estudios, las visitas a campo correspondientes. El fin fue obtener la información del uso del suelo de cada área de estudio. Dicho trabajo fue realizado por diferentes técnicos de campo Para la realización del mismo, cada técnico contó con un equipo de campo, el cual estuvo compuesto por:

- Vehículo de Transporte
- GPS Navegador GIS con cámara fotográfica integrada.
- Cargadores y baterías
- Discos de memoria
- Software de procesamiento de datos.
- Información digitalizada: Mapas topográficos, fotografías aéreas de diferentes fechas y cuencas digitales.

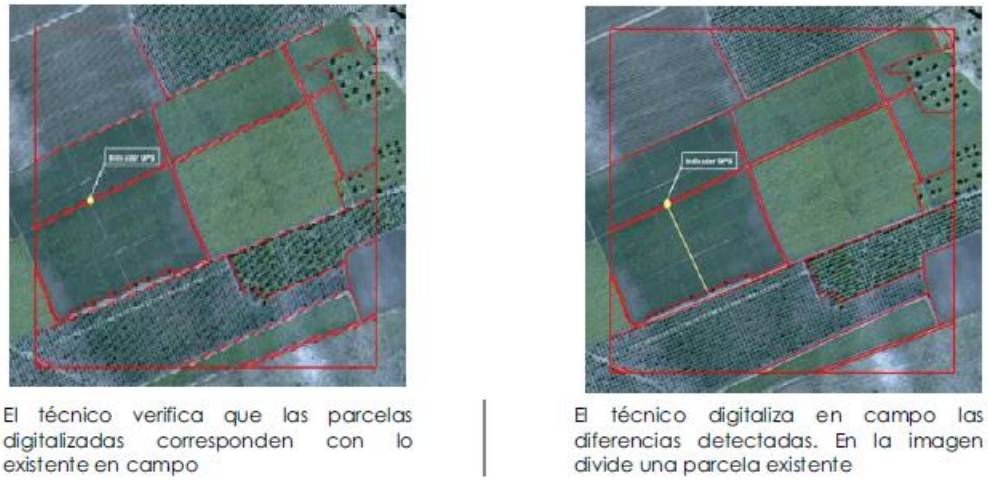
Las principales ventajas de esta tecnología son:

- Localización exacta a través del GPS
- Información de partida digitalizada
- Extracción de la información de campo en formato digital
- Se evitan posteriores mecanizaciones de la información de campo.

Una vez los equipos de campo fueron programados se les asignaron los diferentes polígonos de cada área a cada uno de los técnicos, para realizar las visitas. Estos, valiéndose del equipo de campo, procedieron a aproximarse a los polígonos asignados.

La sistemática de trabajo seguida consistió en una primera aproximación por parte del técnico al polígono a inspeccionar. Para ello se sirvió del GPS, el cual le mostró al técnico su localización, así como la ubicación de las parcelas a inspeccionar utilizando para ello el mapa topográfico.

Una vez dentro del polígono el técnico procedió a visualizar la imagen y las parcelas pertenecientes al polígono asignado. Si dichas parcelas digitalizadas coincidieron con las parcelas existentes en campo, no se procedió a realizar ninguna modificación gráfica con respecto a las mismas. En caso contrario el software instalado permitió al técnico crear nuevas parcelas o dividir y unir las parcelas existentes (Figura 4). Una vez definidas las parcelas con los diferentes cultivos el técnico procedió a levantar la información de campo, tomar fotografías de los cambios y levantar el informe de campo (Figura 5).



El técnico verifica que las parcelas digitalizadas corresponden con lo existente en campo

El técnico digitaliza en campo las diferencias detectadas. En la imagen divide una parcela existente

Figura 4. Verificación de Parcelas.

Figura 5. Comprobación en Campo de Usos de la Tierra.

Una vez finalizado el trabajo de campo, se procedió a una revisión de la información, parcela por parcela, con el objetivo de detectar posibles anomalías en la recolección de los datos de campo (tales como falta de información, incongruencias, etc.) y proceder a su corrección inmediata (si es posible su resolución o en caso contrario se vuelve a visitar en campo la parcela en cuestión). Es en oficina cuando se introduce información adicional a la recogida en campo, tal como el técnico de campo que ha visitado las parcelas, así como el técnico en oficina que ha procedido a la revisión.

Con esto se mantiene una trazabilidad completa de toda la información. Una vez revisada la información de campo y siendo la misma correcta, se procedió a la validación final de la misma.

Finalizada la fase de la revisión de la información de campo, correspondiente al uso del suelo, se procedió a una clasificación de la superficie correspondiente a los diferentes estratos. Esta clasificación fue realizada mediante fotointerpretación por parte de un técnico, valiéndose de las imágenes de satélites de archivos y fotografías actualizadas en el levantamiento de campo. El objetivo fue clasificar estas superficies conforme a los siguientes conceptos:

1. Tacotal: Territorio o bosque en recuperación que puede alcanzar los 10 m de altura. Incluye Charral y Arbustos.
2. Bosque Maduro o natural
3. Bosque Intervenido
4. Páramo
5. Áreas desprovistas de vegetación o suelo desnudo
6. Pastos arbolados
7. Pastos
8. Cultivos permanentes: Café, Palma africana, otros
9. Cultivos anuales: Piña, hortalizas, otros
10. Nubes y/o sombras
11. Plantación forestal: Teca, Melina, Pino, otros.
12. Cuerpos de agua: Lagos, Lagunas, Ríos, espejos de agua en general.

Finalizada y validada toda la superficie se procedió a su manejo y explotación para procesos posteriores. Son muchos los resultados que se obtuvieron, siendo tanto de naturaleza descriptiva como gráfica.

Etapa 3: Procesamiento de Imágenes, Teledetección y Aplicación de los Modelos de Simulación y Análisis Geoespacial-Ambiental

Ortorrectificación

Este es el nivel de producto que poseen todos los procesos del nivel básico, pero se utilizó un DEM más fino y puntos de control en campo. Esto garantiza la mayor exactitud de localización. Se crea con normas estándar de productos de cartografía. Ideal para estudios temporales.

Si se realizan estudios temporales no sólo es razonable pensar en los valores digitales de la imagen, o sea que tengan la misma resolución radiométrica sino también hay que asegurarse que cada pixel está localizado donde debe, y que en cada imagen el mismo píxel este representado en el mismo sitio, para poder hacer análisis reales y precisos. En las siguientes Figura 6 y Figura 7 se muestra un ejemplo de niveles de producto.

Figura 6. Dos imágenes nivel básico vinculadas. Se puede ver una cruz en cada ventana. Está localizada en el mismo lugar de la imagen de la izquierda. Como se puede ver hay una diferencia en la localización.

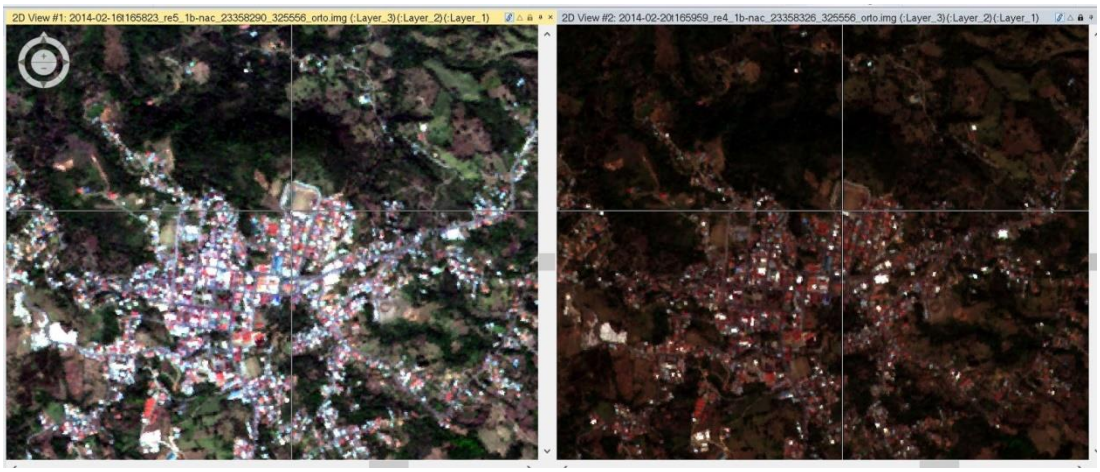


Figura 7. Acá se pueden ver que las 2 imágenes están a nivel ortorrectificado. Se puede ver que no hay desfases de localización.

Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica sirve para realizar el proceso de calibración que es importante aplicarlo a las imágenes satelitales con el objetivo de corregir elementos relacionados a intervenciones atmosféricas, entre otros. Ya que se utilizaron varios sensores para el análisis, fue esencial el convertir la información de los niveles de gris (Números digitales DN por sus siglas en inglés) a cantidades físicas, por ejemplo, reflectancia del terreno y temperatura.

La corrección atmosférica de las imágenes de satélite es un importante paso para mejorar el análisis de datos en muchas maneras:

- La influencia de la atmósfera y la iluminación solar es removida o al menos grandemente reducida.
- Escenas Multi-temporales tomadas bajo diferentes condiciones atmosféricas pueden ser comparadas después de la corrección atmosférica. Los cambios observados serán cambios sobre la superficie de la Tierra y no debidos a diferentes condiciones atmosféricas.
- Los resultados de detección de cambios y algoritmos de clasificación pueden ser mejorados al tomar en consideración aspectos de calibración del sensor. Algoritmos de clasificación orientados a objetos mejoran considerablemente.
- Datos de reflectancia de diferentes sensores con bandas espectrales similares (ejemplo Landsat banda 3, SPOT banda 2) pueden compararse. Esto es una ventaja particular para el monitoreo multitemporal. Debido a que los datos de ciertas áreas no estén disponibles para un sensor por su órbita o a la cobertura de nubes. La probabilidad de obtener datos con baja cobertura de nubes puede incrementar con el número de sensores.
- Los datos de reflectancia del terreno tomados a partir de las imágenes de satélite pueden ser comparadas a medidas del terreno, lo que nos da la oportunidad de verificar los resultados.

La derivación de cantidades físicas, como reflectancia del terreno, contenido de vapor de agua atmosférica, y bioquímica, son tópicos de investigación actual con sensores remotos, especialmente en espectrometría de imágenes.

ATCOR2 (algoritmo empleado la corrección atmosférica de las imágenes)

Algoritmo de corrección atmosférica y espacialmente adaptativo que trabaja en terreno plano con una base de datos atmosférica. La base de datos contiene las funciones de corrección atmosférica almacenadas en look-up tables. El modelo asume un terreno plano consistente de superficies horizontales de una reflectancia Lambertiana. El efecto de adyacencia es tomado en consideración.

ATCOR2 consiste de cuatro funcionalidades:

- **Haze Removal**: proceso que puede ser aplicado independientemente antes de la corrección atmosférica, lo que produce imágenes nítidas y presentables al remover la bruma o neblina y las nubes brillantes (Ejemplo en Figura 8 y Figura 9).
- **SPECTRA**: módulo para visualización de la reflectancia espectral, calculada a partir de los niveles de gris. La influencia de diferentes atmósferas, tipos de aerosoles y visibilidades en el espectro derivado pueden ser estudiados interactivamente. Espectros de referencia a partir de librerías espectrales pueden ser incluidos para comparación (Ejemplo en Figura 10).

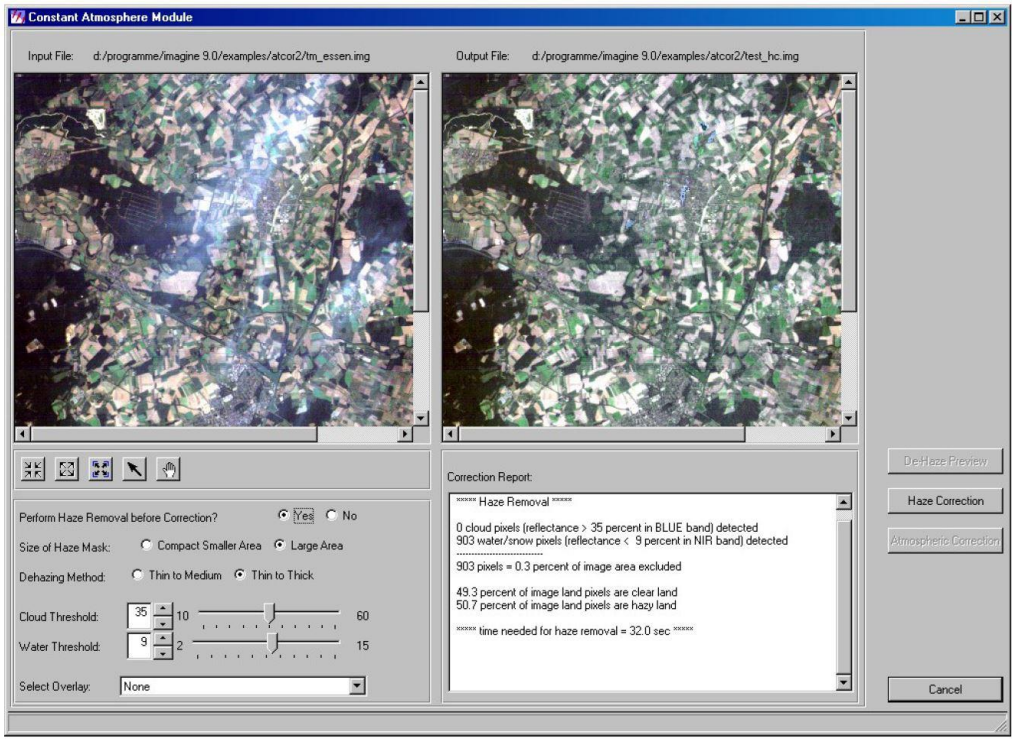


Figura 8. Izquierda imagen original, derecha pre visualización de la eliminación de neblina.

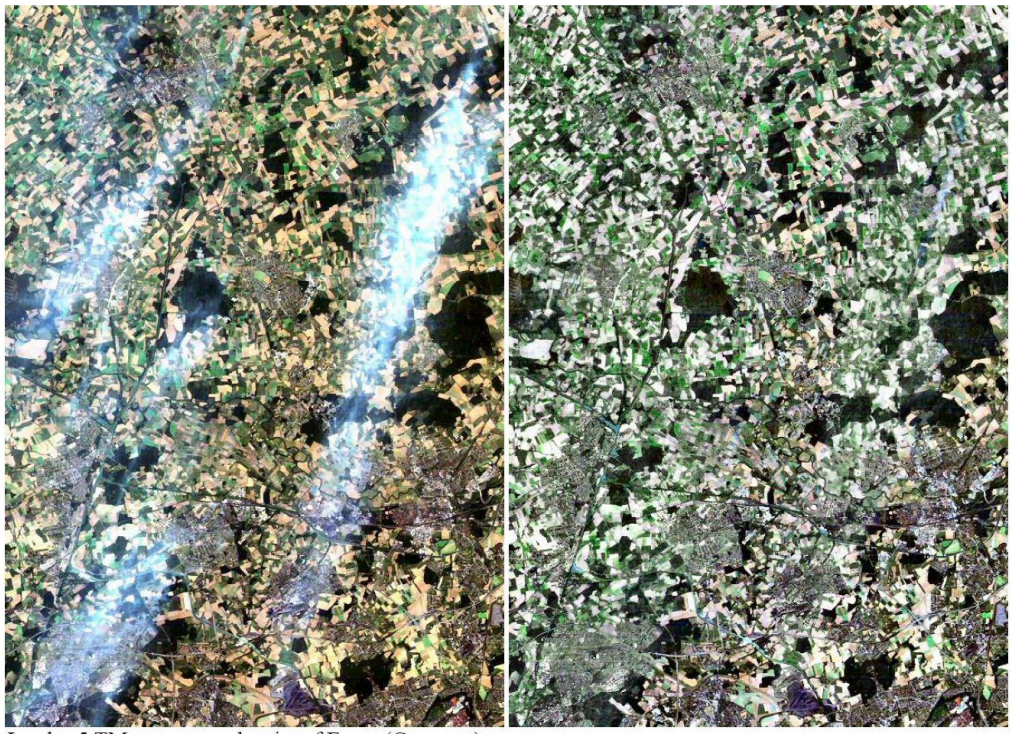


Figura 9. Izquierda imagen original, derecha después de la reducción de neblina y corrección atmosférica

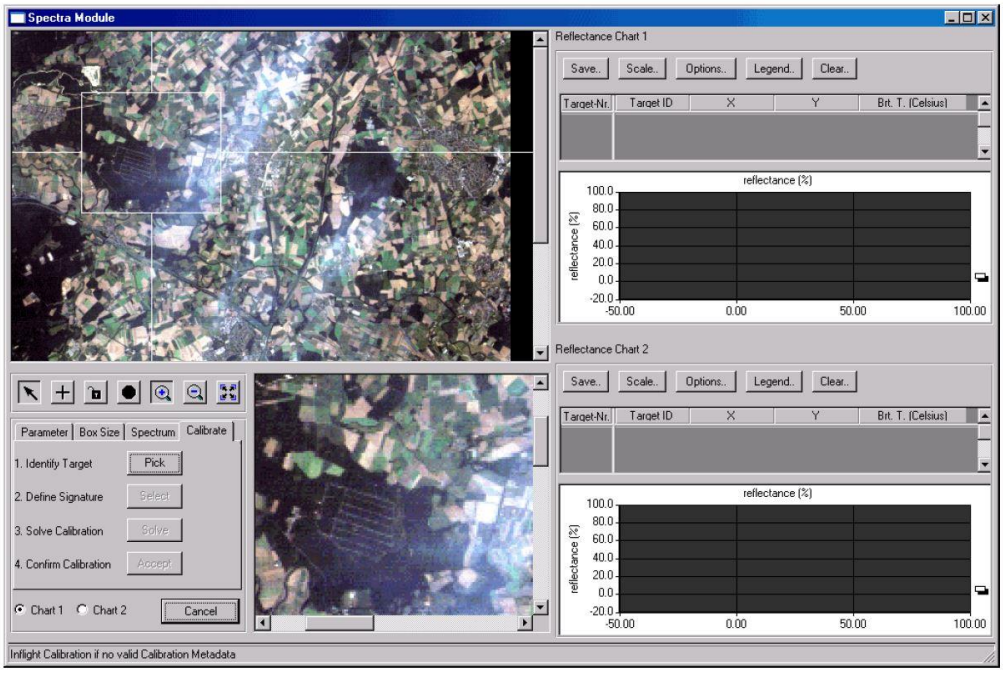


Figura 10. Módulo de calibración espectral SPECTRA, donde se valida el dato de campo.

- **Atmospheric Correction**: Corrección con condiciones atmosféricas constantes para derivar características espectrales verdaderas de superficies.
- **Value Adding Products (VAP)**: Productos de valor agregado, los productos que se derivan son Índice de Área Foliar (leaf area index, LAI), radiación fotosintética activa absorbida (FPAR), y componentes del balance de energía.

Proceso de Clasificación Supervisada

Trabajo de campo

Como se detalló anteriormente, para el proceso de identificación y clasificación de coberturas y usos de la tierra, antes se realizó trabajo de campo, con puntos de muestreo en cada cuenca hidrográfica para tener valores más representativos del tipo y localización de las distintas coberturas de la tierra.

Las clases definidas junto con el equipo técnico de GeoINN y funcionarios del AyA son las siguientes:

1. Tacotal: Territorio o bosque en recuperación que puede alcanzar los 10 m de altura. Incluye Charral y Arbustos.
2. Bosque Maduro o natural
3. Bosque Intervenido
4. Páramo

5. Áreas desprovistas de vegetación o suelo desnudo
6. Pastos arbolados
7. Pastos
8. Cultivos permanentes: Café, Palma africana, otros
9. Cultivos anuales: Piña, hortalizas, otros
10. Nubes y/o sombras
11. Plantación forestal: Teca, Melina, Pino, otros.
12. Cuerpos de agua: Lagos, Lagunas, Ríos, espejos de agua en general.

Generación de clases y firmas espectrales

Luego de las giras realizadas en las cuencas, se requirió implementar un método de entrenamiento que permitiera delimitar sobre la imagen unas zonas representativas de las distintas categorías que se pretendían discriminar. Dichas zonas se conocen como áreas de entrenamiento que sirven para que el software ERDAS IMAGINE, pueda reconocer las distintas categorías. A partir de estas áreas de interés el ERDAS IMAGINE calcula diversos parámetros estadísticos de los Niveles Digitales (ND) que definen cada clase, para luego clasificar el resto de píxeles en una categoría determinada atendiendo a sus ND.

Clasificación Supervisada

Se debió de realizar la clasificación supervisada, generando modelos para identificar con precisión el uso de la tierra. Con la utilización de un Sistema de Información Geográfica especializado para el manejo de Imágenes satelitales, en este caso ERDAS IMAGINE, se implementó para realizar la clasificación supervisada de las imágenes. En la Figura 11, se observa el flujo de trabajo que conlleva el proceso de análisis de imágenes satelitales.

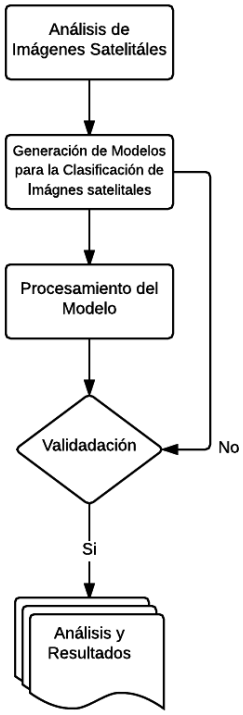


Figura 11. Modelo para el procesamiento de imágenes satelitales

Clasificador de máxima probabilidad

Este método considera que los ND de cada categoría se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Así podemos calcular la probabilidad de que un determinado píxel pertenezca a una categoría; el cálculo se realiza para todas las categorías definidas y el píxel se clasifica en clase a la cual tenga más probabilidad de pertenecer. Este clasificador es el más complejo y, por lo tanto, el que mayor volumen de cálculo requiere, pero es el más robusto y fiable ya que se ajusta fielmente a la distribución original de los datos.

Evaluación de la Clasificación

Para que el resultado de clasificación sea fidedigno y acorde a la realidad en campo. A parte de verificar dichos resultados en las cuencas, se implementaran técnicas estratégicas que garanticen la exactitud del procedimiento de clasificación. Para mejorar la clasificación desde el principio, justo en el momento de levantar las parcelas de entrenamiento, se utilizó la herramienta de Image Alarm del software Erdas Imagine, la cual es una máscara de clasificación donde se marcaran los pixeles de la imagen que cumplen las características de esa parcela de entrenamiento. Además, posee la ventaja de poderse utilizar con varias parcelas de entrenamiento y observar problemas de sobreposición entre clases. Junto a esto se reforzó con los histogramas, para analizar la distribución de valores dentro de cada parcela de entrenamiento y a partir ahí definir con criterio si es necesario rehacer o eliminar ciertos sitios de entrenamiento.

Además, se implementaron herramientas como las Matrices de Contingencia y Feature Space de Erdas Imagine para mitigar los problemas de sobreposición que surgen. Y antes de generar la clasificación, se creó la matriz de separabilidad, para realizar los últimos ajustes a la clasificación supervisada.

Se incluye además un análisis de la exactitud de la clasificación por clases y general, verificable mediante el índice Kappa.

Table 8-11. Error Matrix of the Classification Map Derived from Landsat TM Data of Charleston, South Carolina

	Reference Data					
Classification	Residential	Commercial	Wetland	Forest	Water	Row Total
Residential	70	5	0	13	0	88
Commercial	3	55	0	0	0	58
Wetland	0	0	99	0	0	99
Forest	0	0	4	37	0	41
Water	0	0	0	0	121	121
Column Total	73	60	103	50	121	407
Overall Accuracy = 382/407 = 93.86%						

Producer's Accuracy (measure of omission error)			User's Accuracy (measure of commission error)		
Residential = 70/73 =	96%	4% omission error	Residential = 70/88 =	80%	20% commission error
Commercial = 55/60 =	92%	8% omission error	Commercial = 55/58 =	95%	5% commission error
Wetland = 99/103 =	96%	4% omission error	Wetland = 99/99 =	100%	0% commission error
Forest = 37/50 =	74%	26% omission error	Forest = 37/41 =	90%	10% commision error
Water = 121/121 =	100%	0% omission error	Water = 121/121 =	100%	0% commission error

Figura 12. Análisis general y por clase de uso de suelo de las matrices de contingencia.

Los tipos de error considerados por el índice Kappa son:

- Error de omisión: píxel correspondiendo a una clase de cobertura pero que no fue clasificado de esa manera. Su complemento es la precisión del productor
- Error de comisión: píxel clasificado como una clase de cobertura a la que no pertenece. Su complemento es la precisión del usuario

Computation of K_{hat} Coefficient

$$K_{\text{hat}} = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r}\left(x_{i+} \times x_{+i}\right)}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}\left(x_{i+} \times x_{+i}\right)}$$

where $N = 407$

$$\sum_{i=1}^{r} x_{ii} = (70 + 55 + 99 + 37 + 121) = 382$$

$$\sum_{i=1}^{r}\left(x_{i+} \times x_{+i}\right) = (88 \times 73) + (58 \times 60) + (99 \times 103) + (41 \times 50) + (121 \times 121) = 36{,}792$$

$$\text{therefore } K_{\text{hat}} = \frac{407(382) - 36{,}792}{407^2 - 36{,}792} = \frac{155{,}474 - 36{,}792}{165{,}649 - 36{,}792} = \frac{118{,}682}{128{,}857} = 92.1\%$$

Figura 13. Cálculo del índice Kappa

Generalización

Se depuraron los datos mediante la herramienta Fill de Erdas Imagine 2015 (Figura 14 y Figura 15). Se digitalizó un AOI en las zonas más críticas, una vez digitalizado el AOI en la herramienta Area Fill, la opción Fill With se puso el valor al que corresponde el uso. Este procedimiento permitió corregir las áreas que presentaban usos erróneos con respecto a la realidad.

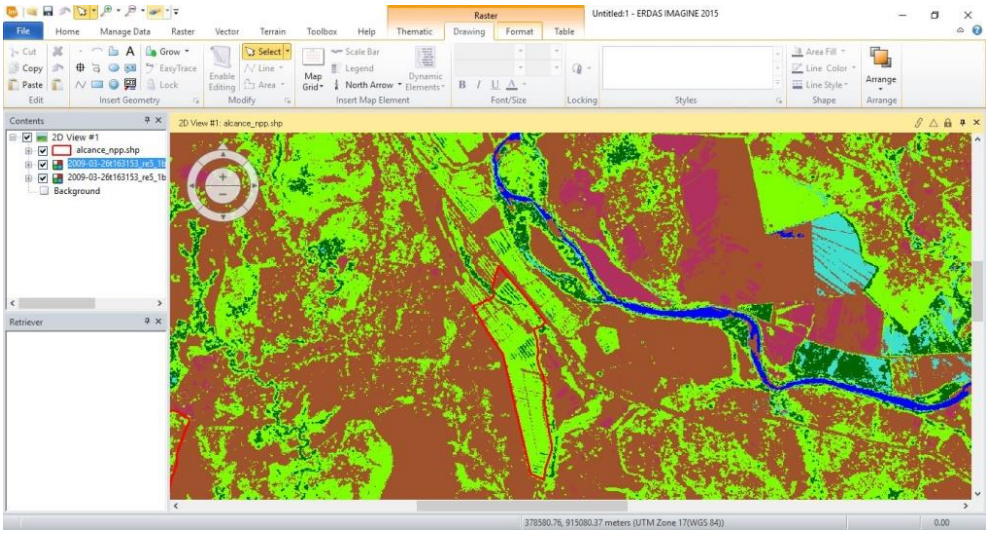


Figura 14. Ejemplo de resultados de la clasificación no supervisada

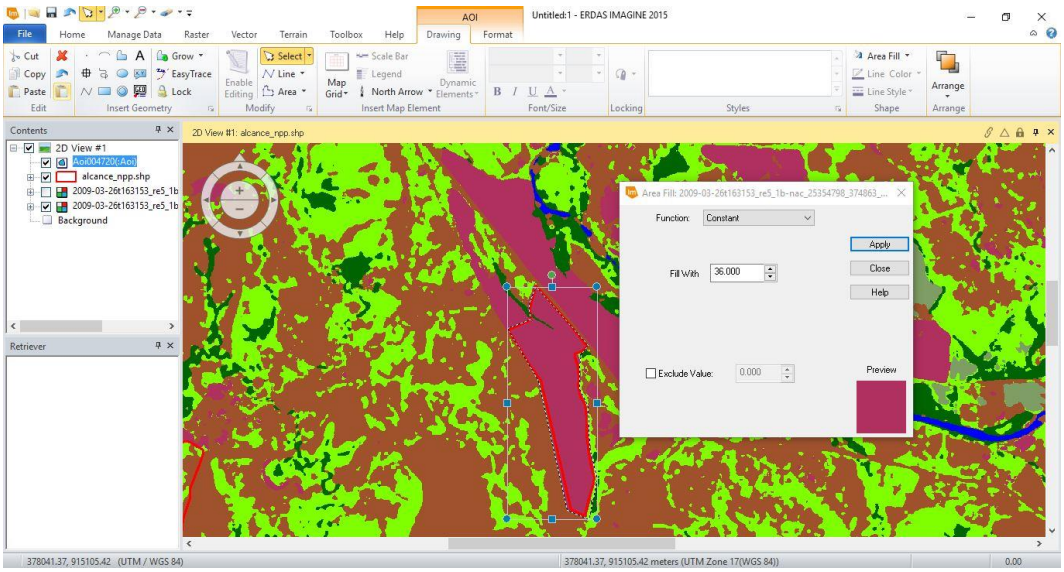


Figura 15. Corrección de los Usos mediante la herramienta Fill.

Una vez realizado los procedimientos anteriores se obtuvieron mejores resultados en la clasificación supervisada.

Análisis de cambio y Modelo de predicción de cambios a futuro

El análisis de detección de cambios a través de clasificación supervisada por medio de la observación de diferentes escalas temporales es un factor indispensable para la supervisión y manejo de los recurso naturales, ya que permite cuantificar su distribución espacial. (Santana et al. 2010). A la vez, es una herramienta para emitir lineamientos para un adecuado manejo del recurso hídrico.

El proceso de modelación se basa en el análisis de los cambios pasados que permite evaluar las tasas de cambio entre los diferentes tipos de coberturas / uso de la tierra y la relación entre la localización de estos cambios y variables "explicativas" que influyen la distribución espacial de los cambios. Con base en este análisis, se pueden identificar las áreas más propensas a los cambios (mapas de probabilidad de cambio) y elaborar mapas prospectivos de cobertura de la tierra (J. F. Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011). Un modelo basado en un escenario tendencial utiliza los mismos patrones de cambio que los observados en el periodo anterior. Se puede también elaborar escenarios en los cuales estos patrones se alteran debido a un cambio del entorno socio-ambiental (nuevas políticas agropecuarias o de conservación, cambios socio- económicos…) de la región modelada. Finalmente, se puede evaluar el mapa simulado comparándolo con un mapa "observado", por ejemplo derivado del análisis de una imagen de satélite, que sirve de referencia. La Figura 16 presenta los principales pasos de la modelación, los cuales se describen con más detalle a continuación. (J. F. Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011)

Tal y como se muestra en la Figura 16, existe una etapa de calibración del modelo, donde se analizarán los periodos desde 1972 hasta el 2016 para la época seca, con el fin de evaluar los patrones y brindar información al modelo para cuantificar el nivel de cambio, el tipo de transición y su respectiva localización. Luego de realizar los análisis para esos 40 años, se generará un mapa de Cambio de Cobertura /Uso del suelo y una matriz de cambio que indica la superficies de transición durante el periodo de observación. Dicha matriz se puede transformar en una de probabilidad de cambio (Matriz Markov) que indica la probabilidad de ocurrencia de cada transición durante un año y permite realizar proyecciones sobre una base anual (Soares-Filho et al. 2002 citado por J.F Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011).

Para identificar las áreas más propensas a los cambios, se realizará una comparación entre los mapas generados, para cada transición, la localización de los cambios respeto a diferentes variables explicativas cartografiadas. Esta comparación permite establecer una relación entre el potencial de cambio y las variables a través de pesos de evidencia que se basa en probabilidades condicionales. (Soares-Filho et al. 2002 citado por J.F Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011).

El cálculo de los pesos de evidencia se realizó para cada transición tomando en cuenta variables explicativas binarias (dentro/fuera de un área protegida) o con múltiples categorías (tipos de tenencia de la tierra, rangos de pendiente). Para ello, las variables continuas (distancias, pendiente) se transformaron en variables categóricas aplicando rangos. Para una discusión más detallada sobre el cálculo de los pesos de evidencia ver Soares Filho et al. 2010 citado por J.F Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011).

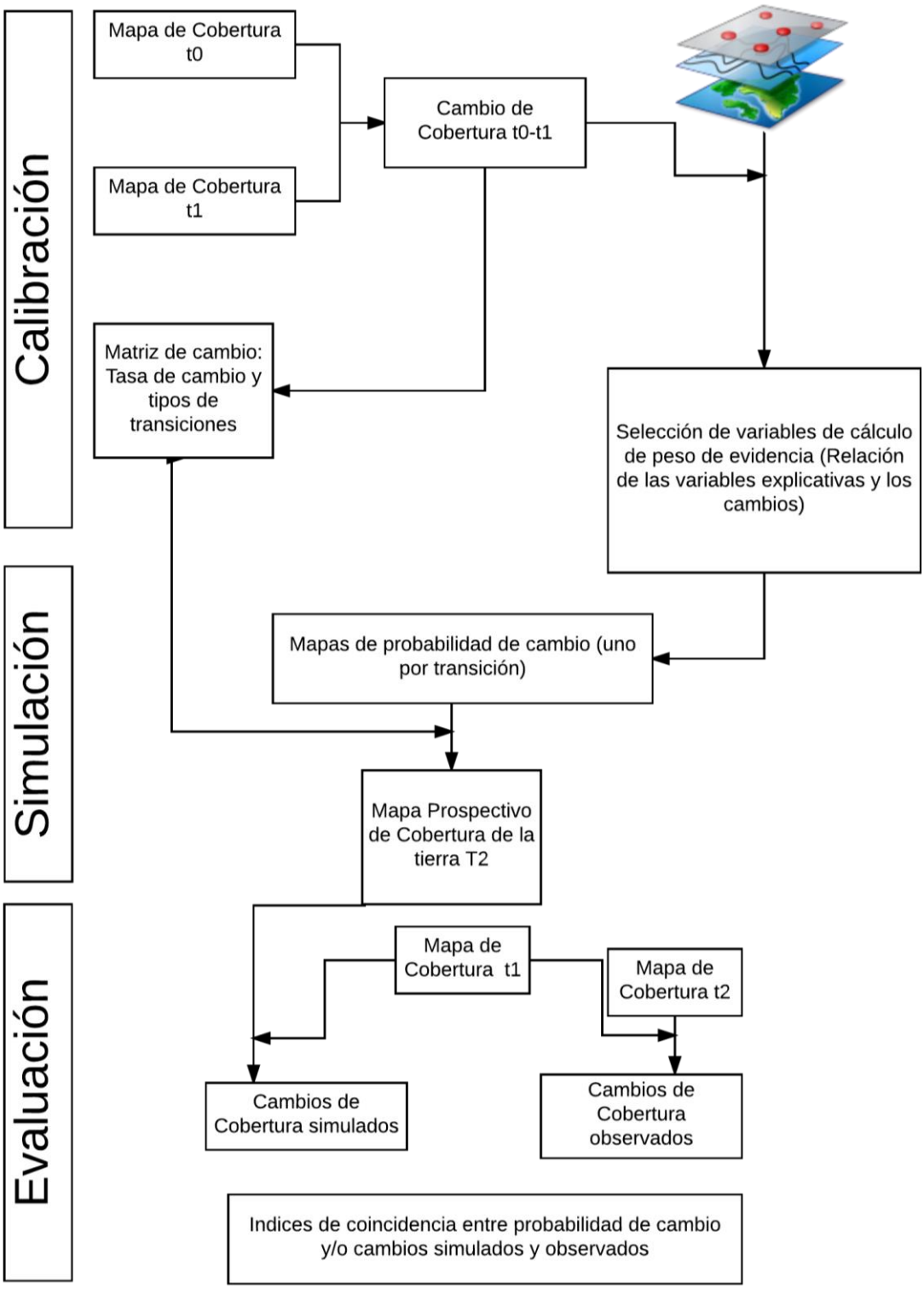


Figura 16. Flujo de proceso de clasificación. Fuente J.F Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011.

Para la etapa de simulación, con base en los pesos de evidencia y los mapas de variables explicativas para cada uno de las cuencas en estudio, se elaborará el mapa de probabilidad para cada transición. Con base a estos mapas de probabilidad se desarrollaran los mapas prospectivos de Cambio de Uso del Suelo. Para que los resultados sean más verosímiles, se utilizaran autómatas celulares que permiten reproducir patrones espaciales de cambio.

Finalmente, para la etapa de evaluación, consistirá en comparar la coincidencia espacial entre las probabilidades de cambio y los Cambios de Cobertura simulados con los cambios observados. Para esto se utilizará un índice de diferencia de potencial de cambio (DPC) (Eastman et al. 2005; Pérez-Vega et al. 2011). El índice consiste en calcular la diferencia entre la probabilidad promedio de las áreas de cambio y de permanencia (Eastman et al., 2005). Un índice de cero indica que no hay diferencia entre la probabilidad de cambio de las áreas que cambiaron y las que permanecieron (modelo "nulo"). Un valor de uno correspondería al caso hipotético en el cual todos los pixeles de cambio tuvieron una probabilidad de cambio igual a uno y todos los de permanencia a cero. Un valor negativo indica que fueron los pixeles con menos probabilidad de cambio los que cambiaron más. (J. F. Mas y A. Flamenco Sandoval, 2011).

Análisis de cambios de uso utilizando Molusce (Métodos de evaluación de cambios de uso por sus siglas en inglés) métodos y algoritmos

La herramienta a usar (software QGIS - Complemento MOLUSCE) implementa los siguientes procesos.

1. Toma raster de categorías de uso de la tierra para un periodo A (pasado), y un raster de categorías de uso de la tierra para un periodo B (presente o cercano) y raster de variables explicativas o factores.
2. Entrena un modelo que predice los cambios de uso de la tierra del pasado al presente.
3. Predice los cambios de uso futuro de la tierra usando un modelo derivado, a partir del estado actual y los factores actuales.

Terminología utilizada:

- *Modelo* es un algoritmo que es usado para predecir los cambios de uso de la tierra (transiciones).
- *Raster estado* es un raster de una sola banda donde cada píxel es asignado con una categoría de uso.
- *Raster estado de entrada* es un raster de una sola banda describiendo el pasado.
- *Raster de estado de salida* es un raster de una sola banda que describe el presente. Este es el resultado de la predicción para un modelo (el usuario entrena al modelo a predecir (raster de entrada, factores) → raster de salida).
- *Raster de factores* es un raster de variables explicativas. Este raster puede ser unibanda o multibanda.

- *Clases de transición o una simple transición* es una información acerca del cambio de uso de la tierra. Cada cambio (por ejemplo Bosque -> No Bosque) puede ser visualizado como una transición de cambio de categoría de uso (codificada como pixel) a partir del raster del pasado y el del presente.
- *Mapa de cambio* es un ráster entero de una banda que almacena información acerca de las transiciones. Valores de categorías de cambio son mapeadas una a una a clases de transición.

Requerimientos de los raster:

Todos los raster de estado inicial y de salida junto con las variables explicativas deben de tener las siguientes características para utilizar cualquier algoritmo de modelado de cambio.

- Misma cantidad de categorías de uso. Si en el raster de inicio hay 4 categorías (por ejemplo, urbano, bosque, caminos, agua) en la de salida deben de existir esas mismas categorías.
- Los raster de entrada y salida deben de ser del tipo entero. Las variables explicativas pueden ser flotantes.
- Tanto los raster de entrada y salida y variables explicativas deben de tener la misma proyección espacial y escala (esto significa que tienen que deben de cubrir las mismas coordenadas y la misma cantidad de pixeles).

El modulo o aplicativo MOLUSCE consta de tres módulos utilitarios:

- Proveedor de datos: Provee los procesos para leer y escribir los datos raster y las funciones similares.
- Tabulación Cruzada: Provee las funciones para crear las tablas de contingencia.
- Sampler: Provee el proceso de muestreo.

Descripción del proceso de muestreo

Sampler funciona con píxeles individuales y un vecindario de píxeles. Esto significa que un usuario puede tener en cuenta un conjunto de píxeles alrededor del píxel actual. La implementación del algoritmo utiliza el vecindario de Moore. Por ejemplo, si el usuario configura una vecindad de 1 tamaño, el procedimiento de muestreo lee el píxel actual y todos los píxeles situados en la vecindad inmediata (tamaño de ventana 3x3). Si el usuario establece un vecindario de 2 tamaños, el procedimiento de muestreo lee el píxel actual y todos los píxeles ubicados en el tamaño de la ventana 5x5 y así sucesivamente. Cada vecindario se almacena como vector (9 elementos, 25 elementos y así sucesivamente). El muestreo se realiza para cada ráster de entrada (ráster de estado inicial y factores).

Así, una muestra contiene:

- Coordenadas del pixel,
- Datos de entrada (consta de 2 partes):

- El vector de píxeles de estado es el vecindario que se lee de ráster de 1 banda, este ráster contiene estados iniciales (categorías). El ráster se divide en un conjunto de variables ficticias antes del muestreo (véase más abajo).
- Los vectores de píxeles de factor son los vecindarios extraídos de rasters de factor (pueden ser multibanda).

- Los datos de salida se leen de ráster de 1 banda, este ráster contiene estados finales.

Existen varios modos de muestreo:

- "Todas". Este modo extrae información para todos los píxeles de los rasters de entrada y salida. Entre otros métodos este modo de muestreo necesita la mayor cantidad de RAM y tiempo de CPU.
- "Aleatorio". Este modo extrae información para muestras seleccionadas aleatoriamente: si la trama tiene N píxeles, entonces cada píxel tiene una probabilidad de 1 / N de ser seleccionado.
- Estratificado Este modo subestima aleatoriamente categorías principales (áreas grandes) y / o sobre muestre categorías menores (áreas pequeñas). Si C es el recuento deseado de muestras y K es el número de categorías de salida, entonces el procedimiento de muestreo selecciona K grupos aleatorios de píxeles de igual tamaño C / K. Cada grupo contendrá píxeles de una categoría determinada.

Tabulación Cruzada

Tabulación cruzada es un módulo que se utiliza en varios lugares del flujo de trabajo. El propósito principal del módulo es crear tablas de contingencia. Por ejemplo, se utiliza durante la creación de la matriz de transición. En este caso, el método calcula la estadística de transición: cuántos píxeles se han cambiado. El resultado se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Tabulación cruzada

	Categoría 1	Categoría 2	...	Categoría N
Categoría 1	Conteo de píxeles inalterados de la Categoría 1	Conteo de transición Categoría 1 -> Categoría 2	...	Conteo de transición Categoría 1 -> Categoría N
Categoría 2	Conteo de transición Categoría 2 -> Categoría 1	Conteo de píxeles inalterados de la Categoría 2	...	Conteo de transición Categoría 2 -> Categoría N
”’	...	...	...	...
Categoría N	Conteo de transición Categoría N -> Categoría 1	Conteo de transición Categoría N -> Categoría 2	...	Conteo de píxeles inalterados de la Categoría N

El otro módulo de MOLUSCE es el algoritmo:

Para iniciar con la parte del módulo de algoritmos se debe de iniciar con el análisis de áreas.

El propósito principal del módulo de análisis de área es el cálculo del mapa de cambios. El módulo utiliza el siguiente esquema de codificación de transición (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Esquema de codificación de transición.

	Categoría 1	Categoría 2	...	Categoría N
Categoría 1	0	1	...	N -1
Categoría 2	N	N + 1	...	2N -1
...	...	...	...	...
Categoría N	(N-1)*N	(N-1)*N + 1	...	N*N -1

Por ejemplo, si en la categoría de rasters de estado "Bosque" codificada como "3", la categoría "No forestal" codificada como "2", entonces la transición "bosque" -> "no forestal" en el mapa de cambio será codificada como "7".

Por ejemplo, para 4 clases (N = 4), hay 4 * 4 = 16 posibles transiciones (ver Cuadro 6)

Cuadro 6. Ejemplo para cuatro clases.

	Agricultura	Bosque	Urbano	Agua
Agricultura	0	1	2	3
Bosque	4	5	6	7
Urbano	8	9	10	11
Agua	12	13	14	15

La salida de la fase de Análisis de Área es un mapa de cambio en el que cada píxel tiene asignado un valor entero que indica su transición.

La siguiente fase del módulo de algoritmos es la parte de Modelación.

Modelación

Un usuario tiene varios factores, raster de estado inicial y raster de estado final. El objetivo de la etapa de modelado es crear un modelo que pueda predecir los cambios en el uso de la tierra entre esos estados. Antes de discutir los métodos de predicción necesitamos explicar la etapa de preparación común.

La primera subsección de esta sección discute los tipos de datos de entrada y salida y las manipulaciones necesarias con los datos, las subsecciones siguientes describen las realizaciones concretas de los modelos de predicción.

Tipos de datos y procedimientos de inicialización

Los siguientes supuestos son utilizados actualmente por el complemento:

- Los rásteres de estado inicial y final son rasters categóricos de una banda, por lo tanto, un mapa de cambios es también ráster categórico de una banda.
- Para los rasters de factor de modelo ANN (redes neurales artificiales por sus siglas en inglés), WoE (Pesos de Evidencia por sus siglas en inglés), MCE (Evaluación Multicriterio por sus siglas en inglés) y LR (Regresión Logística por sus siglas en inglés) asumidos ordinales o continuos (una banda o multibanda), pero no categóricos.

El usuario escogerá uno de estos algoritmos y el siguiente paso de este módulo es el Simulator.

Simulación

El módulo *Simulator* realiza el procedimiento de evaluación del cambio de uso del suelo. Toma como entrada los siguientes datos:

- Ráster de estado inicial;
- Rasters de factores;
- Modelo. Ya sea ANN, WoE, MCE o LR

El ráster de estado inicial contiene información sobre las categorías de uso de la tierra actuales, los rasters de factores contienen información sobre variables explicativas. El modelo es un predictor que calcula los potenciales de transición en la condición de los factores y el uso actual de la tierra. Así que el módulo no utiliza reglas de transición implícitas, utiliza potenciales de transición generados por los modelos. El efecto de vecindad se logra si un modelo utiliza el vecindario durante el entrenamiento, por ejemplo, la regresión logística tiene un coeficiente para cada vecino y el coeficiente afecta al potencial de transición. Si el modelo no utiliza vecindario, *Simulator* sólo tiene en cuenta los patrones generales.

El módulo funciona como sigue esquema:

1. *Simulator* toma las probabilidades de transición de la matriz de transición y calcula el conteo de píxeles que tiene que ser cambiado (para cada clase de transición);

2. *Simulator* llama a un modelo, pasa a él raster de estado inicial y rasters de factor;
3. El modelo escanea los píxeles de los rasters (y sus vecinos si el modelo usa neigborhood) y calcula los potenciales de transición de cada clase de transición;
4. *Simulator* construye un raster certancia: el píxel del ráster es la diferencia entre dos potenciales más grandes de píxeles correspondientes de rásteres de potencial de transición. Como resultado, el ráster contiene la confianza del modelo: cuanto mayor es la diferencia, mayor es la confianza;
5. *Simulator* construye una trama de las transiciones más probables: los píxeles de la trama son la clase de transición con el mayor potencial de transición. Este raster es un raster auxiliar usado durante la siguiente etapa;
6. Para cada clase de transición Simulator busca en la trama de las transiciones más probables un número necesario de píxeles con la mayor confianza y cambia la categoría de los píxeles. Si la confianza de dos o más píxeles está cerca, entonces se elige una selección aleatoria del píxel.

El módulo da las siguientes salidas:

- Rasters de potencial de transición (escalado a porcentajes) que se emiten de los modelos;
- Raster de la diferencia entre los dos potenciales más grandes o 'certeza';
- Resultado de la simulación.

El esquema descrito se utiliza si un usuario especifica sólo una iteración de simulación. Si se tienen que preformar varias iteraciones, en general el esquema es el mismo, pero los rasters de estado inicial se cambian en las siguientes iteraciones: el primer mapa simulado es el mapa de estado inicial para la segunda iteración, el resultado de la segunda iteración es el inicial Estados de la tercera iteración y así sucesivamente.

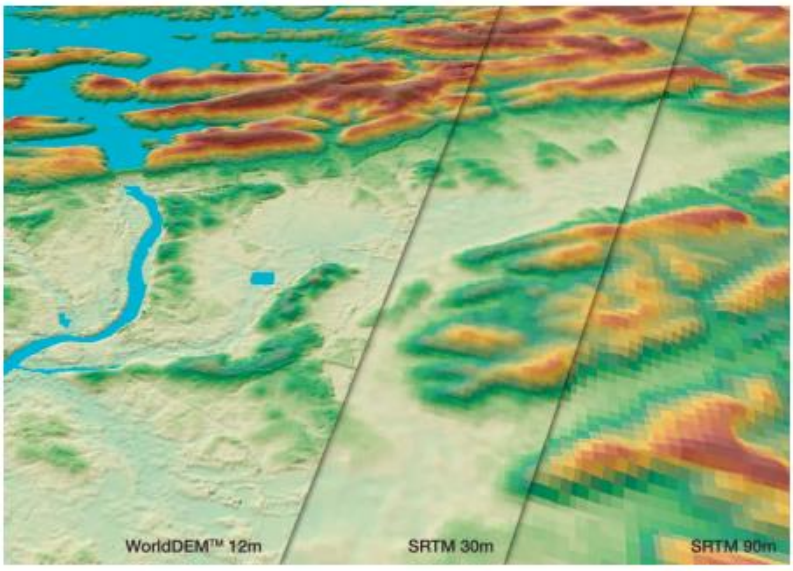
Obtención del modelo digital del terreno, modelo digital de superficie, curvas de nivel a partir de datos de RADAR-SAR

Los mapas base topográficos son esenciales para algunos análisis y para la toma de decisiones en una gran cantidad de actividades de monitorización y planificación.

En este proyecto planteamos trabajar con datos de TerraSAR-X / TamDEM-X el cual ofrece capacidades independientes de cualquier situación meteorológica y una geolocalización y precisión que facilita la creación de mapas topográficos. Para esto se utilizan métodos y aplicaciones de cartografía para Radar SAR (TerraSAR-X / TamDEM-X) el cual permite la generación de modelos de elevación (Superficie y Terreno) y curvas de nivel para las cuencas contempladas en el estudio.

Las Áreas a Suministrar con Curvas de Nivel a 5m de Equidistancia, Modelo Digital del Terreno (el cual es una representación visual y matemática de los valores de altitud con respecto al nivel medio del mar) y Modelo Digital de Superficie (representa todos los valores existentes presentes en la superficie terrestre como vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente) a 12m de Pixel, se muestran en la siguiente Figura 17.

Figura 17. El Área a Suministrar con Datos de Elevación es de 6.043 Km^2



WorldDEM™ provides a superior level of detail and accuracy compared to SRTM data. Location: Arkansas, USA

Figura 18. Resoluciones de MDT.

En la Figura 18 anterior se muestran las diferencias de los modelos digitales de terreno de resolución gruesa (30 m y 90 m) en comparación con el WorldDEM de 12 m de pixel.

Cálculo y estimación de Erosión y Sedimentación

En esta parte del estudio se contemplaron los siguientes modelos:

- RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation/Ecuación Revisada de la Pérdida Universal del Suelo) que simula la pérdida del suelo provocada por el agua en campos y pasturas no canalizadas.
- SEDIMENTATION (Sedimentación) que evalúa el movimiento neto del suelo (erosión o deposición) dentro de segmentos, campos o cuencas de ríos

La revisión de USLE (RUSLE) es un modelo empírico de erosión (Renard et al., 1991), para predecir pérdidas de suelo promedio anual por hectárea, debido a erosión laminar originalmente formulado por Wischmeier y Smith (1978). Utiliza un método de análisis por factores, los cuales corresponden a la erosividad de las precipitaciones (factor R), la erodabilidad del suelo (factor k), la topografía del paisaje descrito por la longitud e inclinación del terreno (factor LS), la cubierta vegetal (factor C) y finalmente las prácticas de conservación (factor P).

La pérdida de suelo (A) en ton/ha/año, se estima a través de la Ecuación 1.

$$A = R * K * L * S * C * P \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde,

- **Factor R:** es un índice de erosión pluvial (parámetro que representa la energía cinética de la lluvia).
- **Factor K:** es un factor de erodabilidad del suelo (parámetro que define su mayor o menor capacidad para ser disgregado)
- **Factor L**: el factor longitud de pendiente (ladera de máxima pendiente).
- **Factor S**: el factor pendiente (como variable que condiciona la mayor o menor escorrentía del agua).
- **Factor C**: un factor de cobertura de la tierra (como variable capaz de proteger al suelo de la actuación de la energía cinética de la lluvia).
- **Factor P:** un factor prácticas de conservación (se refiere a las prácticas de labranza que modifican la susceptibilidad del suelo a ser erosionado).

En la Figura 19, se muestra el flujo de trabajo que se realizó para obtener la erosión potencial del suelo en las zonas de estudio.

1. Factor K

El *factor K* determina la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. Su valor va a depender del contenido de materia orgánica, la permeabilidad, estructura y textura del suelo. Para el cálculo de este índice se utilizó la información proporcionada por ISRIC, que es el centro mundial de datos del suelo, en su página http://soilgrids.org/index.html. La resolución espacial del raster que contiene los valores de suelos es de 1 km el pixel (0.08333 grados decimales en el sistema WGS84). Dado que el índice para estimar el Factor K está dado por la fórmula del Grupo Tragsa (1998):

$$K = [10\text{-}4 * 2.71 * M1.14 *(12\text{-}mo) + 4.20 (s\text{-}2) + 3.23 (p\text{-}3)] /100 \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde,

K = Factor de erodabilidad del suelo, expresado [t*m2*hr/ha*J*cm]

MO = Materia orgánica [%]

s = Código de la estructura del suelo

p = Código de permeabilidad

M = Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (%limo+%arena)*(100-%arcilla)

Además estos valores se verificaron en campo y se reforzaron con el mapa de suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica a escala 1:200000.

En lo posible se usaron los mapas de suelos existentes para cada cuenca hidrográfica a las escala 1:50.0000. Aunque la ecuación 3 se puede utilizar, ya existen tablas que relacionan el factor con los tipos de suelos. (Marchamalo, 1994).

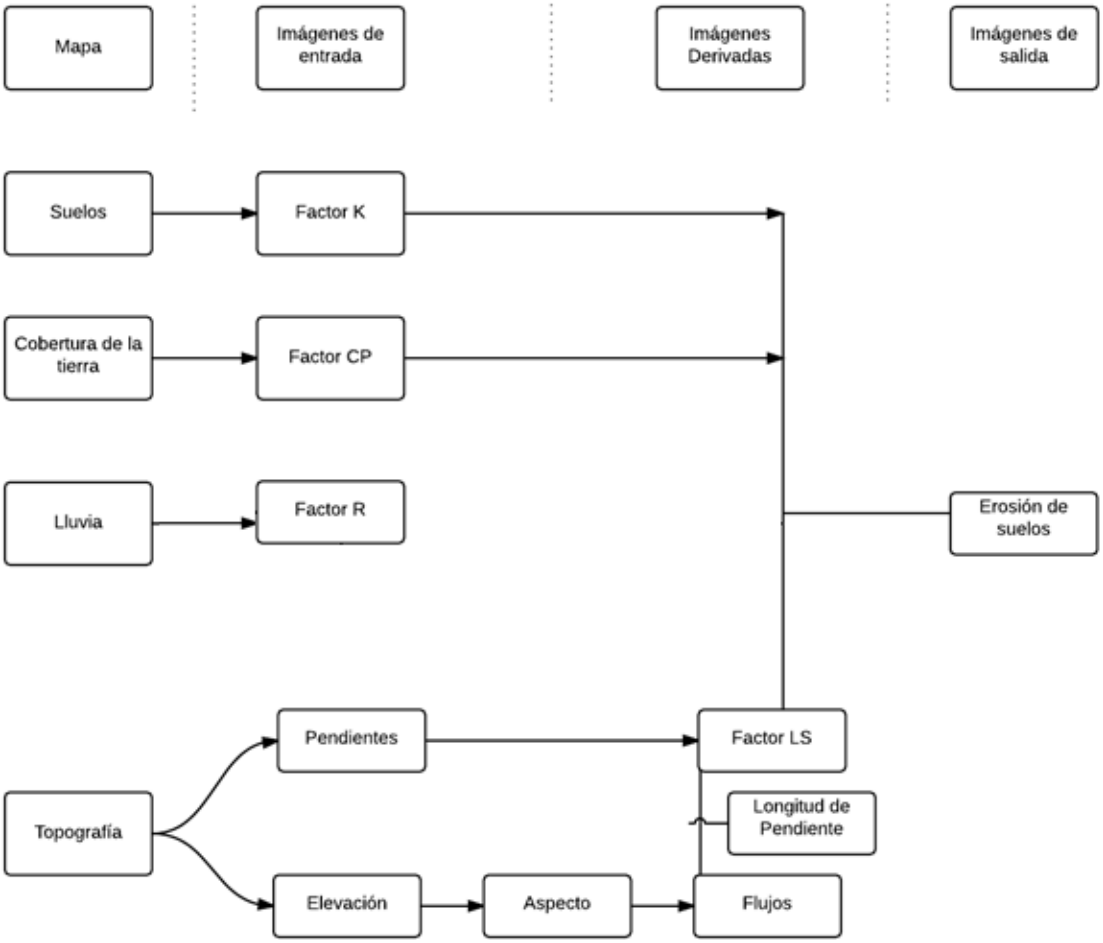


Figura 19. Esquema metodológico del procedimiento aplicado a calcular RUSLE actual.

2. Factor LS

En el caso del factor LS responde tal como lo explican Ibáñez et al. (Sin año), al efecto combinado de la longitud y el ángulo de inclinación de las laderas, donde ambos son imposibles de individualizar. Su valor sirve para estimar las pérdidas de suelo que se producen en un terreno en pendiente comparativamente a las pérdidas por unidad de área que se producirían si una misma lluvia cayera sobre una parcela de 22 m de longitud y 9 %. Este factor toma tanto el ángulo como la distancia de la pendiente; ya que, el ángulo de la pendiente modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que circula por la superficie del terreno, independiente del volumen de escorrentía generado. Por su parte, cuanto mayor sea la longitud y el ángulo de inclinación de una ladera mayor será la energía cinética que alcanzará el agua circulante por su superficie, por lo que mayor será su capacidad de desagregación y transporte.

El primer paso para la obtención de este factor es contar con un modelo de elevación digital (MDE) de alta resolución, el cual es el WORLD DEM de AIRUS.

Para obtener el factor LS, se requieren calcular los valores F y m, ya que la ecuación del condicionante L está dada por:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{m}$$ **Ecuación 3**

El componente **m** se expresa mediante la siguiente formula:

$$m = \frac{F}{1+F}$$ **Ecuación 4**

Y finalmente le componente **F** corresponde a:

$$F = \frac{\left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)}{(3(\sin\beta)^{0.8}+0.56)}$$ **Ecuación 5**

Para obtener los valores de F en radianes y poder realizar los cálculos correctamente es preciso multiplicar la capa de pendientes por 0.01745, tal como se muestra en el siguiente procedimiento:

- F=((Sin((pendientes)*0.01745/0.0896)/(3*Power(Sin((pendientes)*0.01745), 0.08)+0.56))
- m= (F)/(1+(F))

Finalmente se obtuvo el Factor L que responde a la Ecuación 6 de acuerdo a Desmet y Govers (1996).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)}+D^{2})^{m+1}-A_{(I,J)}{}^{m+1}}{x^{m}*D^{m+2}*(22.13)^{m}}$$ **Ecuación 6**

Donde,

- A(i,j)(m) es el área aportadora unitaria en la entrada de un pixel (celda),
- D es el tamaño del pixel, y
- "x" es el factor de corrección de forma.

Y se expresa en la calculadora raster de la siguiente manera:

L= (Power (((acumulación) + 100), ((m)+1)) - Power ((acumulación), ((m)+1))) / (Power (10, ((m)+2)) * Power (22.13, (m))) **Ecuación 7**

Por su parte el condicionante S según McCool, et al. (1989) depende del valor del ángulo, entonces se utilizará la condicionante "con" para su cálculo en una calculadora raster y se expresa de la siguiente manera en la calculadora raster.

S= Con(Tan((pendientes)*0.01745) < 0.09,(10.8*Sin((pendientes)*0.01745)+0.03),

(16.8*Sin((pendientes)*0.01745) – 0.5)) **Ecuación 8**

Finalmente, para obtener el Factor LS se multiplican los condicionantes antes calculados:

Factor LS= (Factor L) * (Factor S) **Ecuación 9**

Por lo general el LS se debe acotar debido a imperfecciones del modelo.

3. Factor R

El cálculo de este factor se llevó a cabo mediante el uso del índice modificado de Fournier (Renard and Freimund, 1994; Segura et al., 2014). Este índice caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula de la siguiente forma (ecuación 8):

$$\boldsymbol{IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i{}^2}{P}}$$ **Ecuación 10**

Donde,

IFM índice de Fournier modificado en mm

pi … precipitación del mes i en mm.

P… precipitación total anual, en mm.

Para estimar este factor fue preciso hacer una sumatoria de la lluvia mensual, para generar un archivo de la precipitación anual en el área de estudio. La información necesaria para realizar este procedimiento se obtuvo mediante la precipitación promedio mensual estimada anteriormente. Se generaron curvas o isoyetas cada 10 mm, para cada mes, y se realizó una interpolación mediante el método Topo to raster, con una celda de salida de 20 m el pixel. Para el caso de la suma de cuadrados de cada mes, se recurrió al uso de la calculadora raster y seguidamente se hizo la división entre el producto resultante de este paso y la sumatoria de la precipitación anual.

Se confrontará el IFM con el mapa de Varhson, para este parámetro. Lo ideal sería realizar el cálculo con estaciones meteorológicas, siempre que estén disponibles.

4. **Factor C**

El factor C es usado para reflejar el efecto de la cobertura de la tierra y prácticas de manejo en las tasas de erosión. Este factor mide como el potencial de pérdida de suelo será distribuido en el tiempo durante la construcción de actividades, rotación de cultivos, y otros esquemas de manejo. Este factor se basa en una capa vectorial de polígonos que contiene la cobertura del suelo que se obtuvo a partir la clasificación de imágenes para cada cuenca. El uso fue clasificado según criterios aportados por Wischmeier and Smith (1998), Renard and Freimund (1994) y Segura et al. (2014). De estas fuentes se obtuvieron los índices "c" (asociado directamente a la categoría de uso) y "p" (relacionado con las prácticas de conservación de suelos) y que al ser multiplicados entre sí dan como resultado los valores de este Factor. El Cuadro 7 muestra los valores del Factor C y Factor P utilizados, y que además depende la pendiente del terreno y las prácticas específicas de cultivo; esto último para el caso del Factor P.

Cuadro 7. Cobertura de la tierra asociada a los factores definidos C y P.

TIPO DE COBERTURA	FACTOR C	FACTOR P
USO URBANO	0.1	1
SUELO DESCUBIERTO	1	1
PASTOS	0.2	1
BOSQUE	0.003	1
CAMINOS	0.1	1
CUERPOS DE AGUA	0.01	1
CAFÉ (CULTIVOS PERMANENTES)	0.135	varía
OTROS CULTIVOS	0.4	varía

Determinación del Índice de Aporte de Sedimentos

Una vez creado el mapa de erosión utilizando los parámetros de la EUPS, se procede al cálculo del índice de aporte o distribución (delivery index) siguiendo la secuencia:

1. determinación de la producción por flujo y pendiente
2. determinación de la capacidad mínima de transporte y
3. determinación del índice final

El índice final se normaliza usando una escala logarítmica antes de ser salvado en formato byte con un rango de 0 a 255. Esto provoca que los valores "DI scale y offset" se modifiquen en forma dinámica en el archivo de proyecto (extensión .INF, a modo de ejemplo, ver contenido del archivo Savegre.INF en el anexo). El cálculo del índice de aporte de sedimentos "Delivery Index", realizado en forma de imagen, para cada píxel, se puede expresar como (Saborío, J.2002):

DI: Capacidad de Transporte/Sedimento suplido

$$DI = Pa^{2.32} \min (F^{0.66} S^{1.44}) / SE \qquad \textbf{Ecuación 11}$$

Dónde:

Pa = lluvia anual en mm.
F = número de rutas de flujo que convergen
S = pendientes en grados
SE = erosión

Estimación de las Pérdidas de Suelo

La erosión real, estimada mediante el modelo USLE y utilizando SIG se representará en una imagen que muestra la pérdida de suelo en Mg ha-1 año-1 en cada una de las celdas de una hectárea de superficie en que se dividida el área de estudio.

El análisis en el SIG se realiza multiplicando la imagen que contiene cada factor: erosividad (R) x erosionabilidad (K) x el factor longitud y pendiente de la ladera (LS) x el factor manejo y cobertura (C) logrando la imagen final de pérdidas por erosión hídrica. Para sintetizar el resultado se clasifica la imagen de pérdidas de suelo, con una adaptación de los rangos definidos obteniendo al final la imagen con los distintos niveles erosivos.

El riesgo de erosión es expresado cualitativamente (alto, moderado, bajo, etc.), o cuantitativamente (toneladas por hectárea por año) según Renschler (1996). Se utiliza la siguiente Cuadro 8 para interpretar los resultados:

Cuadro 8. Riesgos de erosión en toneladas por hectárea por año y su equivalencia en milímetros por año

Riesgos de erosión	Pérdidas (t/ha/y)	Pérdidas (mm/ha)
Muy bajo	0-2	0-0.15
Bajo	2-5	0.15-0.38
Tolerable	5-10	0.38-0.77
Alto	10-20	0.77-1.54
Muy alto	>20	> 1.54

Para la conversión de la cantidad de pérdida de suelo en unidades de peso (t/ha) a unidades de longitud (mm), se utiliza el valor promedio de la densidad de masa del suelo como una constante 1.3 g/cm3 (Marshall, 1996). La densidad de masa del suelo se define como la proporción de masa de la parte sólida seca del volumen de masa del suelo constituido por los sólidos secos. Este valor de la densidad de masa debe ser transformado a 1300 kg/m3 que se ajusta más a las operaciones en el cálculo de las pérdidas de suelo en milímetros (Geler, 2000).

Etapa 4. Elaboración de cartografía temática

La naturaleza geoespacial de este proyecto implica la elaboración de cartografía temática como una herramienta de representación y análisis de los resultados obtenidos en las diversas etapas o fases del estudio.

En estos productos, la escala de representación varía en función del tamaño de cada cuenca hidrográfica analizada.

Se prepararon, por tanto, una serie de mapas temáticos para cada cuenca los cuales se pueden subdividir de la siguiente manera:

1. Mapas de cobertura actual del uso de la tierra: 2015 o 2016
2. Mapas de análisis de cambios entre periodos
   - **I.** 1976-1986/1986-1996
   - **II.** 1986-1996/1996-2006
   - **III.** 1996-2006/2006-2016
3. Mapas de análisis de cambios para dos series de tiempo
   - **I.** 1976-2016 (40 años)
   - **II.** 1988-2014 (26 años)
4. Mapas de tendencias de cambios a futuro
   - **I.** 2030
5. Mapas de erosión
6. Mapas de sedimentación

Análisis de Resultados

Cuenca Río Cañas

La cuenca hidrográfica Río Cañas del AOI 2 posee una extensión territorial total que ronda los 39.3 km^2. Se ubica en al este de la provincia de Puntarenas, al norte del Golfo Dulce.; en el cantón de Buenos Aires (ver ubicación en la Figura 20).

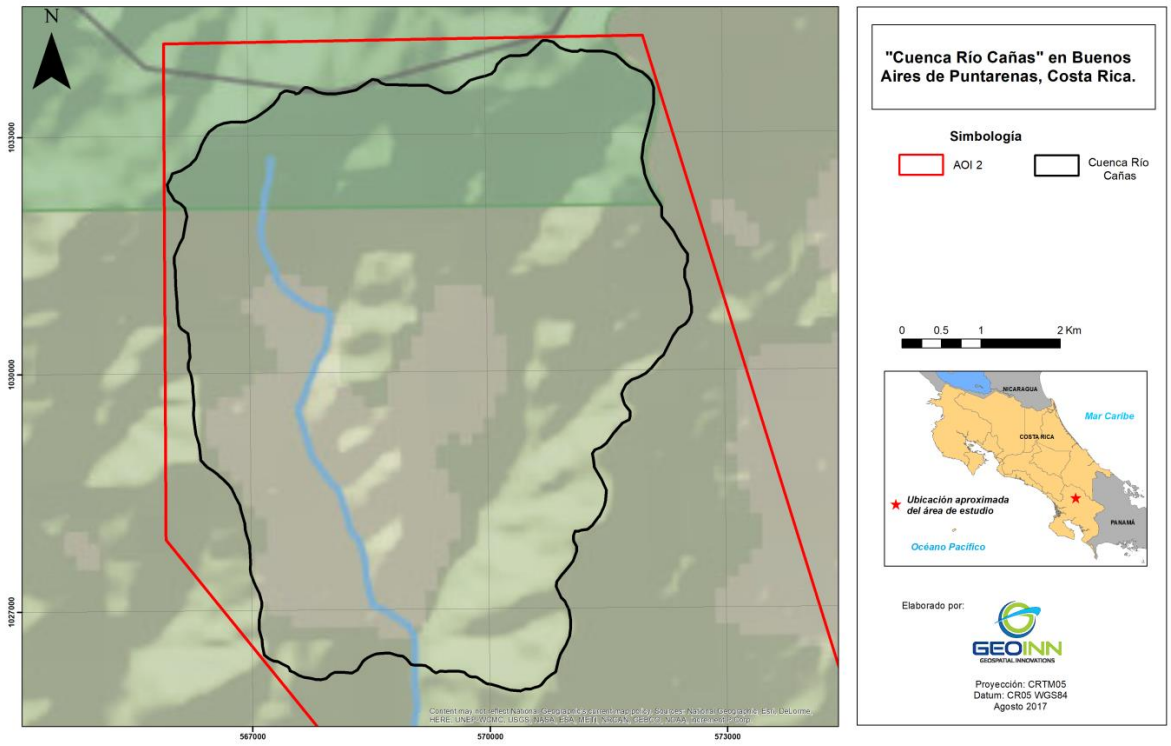


Figura 20. Ubicación del área de estudio.

Análisis Histórico en el Cambio del Uso de la Tierra

Análisis de cambios entre periodos

a. Periodo: 1976-1986/1986-1996

Este primer periodo se debe entender como los cambios de los usos de la tierra observados entre la década de 1976-1986 y la década de 1986-1996.

Sin embargo, para el caso del AOI 2 y por lo tanto, para la cuenca hidrográfica Río Cañas, no fue posible obtener imágenes satelitales históricas para la década de 1976-1986.

Se realizaron búsquedas intensivas de los archivos de imágenes satelitales Landsat para este período y área de interés, pero a pesar de ello, no se obtuvieron imágenes de calidad suficiente que cumplan con los requerimientos mínimos para poder identificar las coberturas de la tierra. Esto se debe a que, para este caso en particular, el factor nubosidad restringió la obtención de imágenes donde se puedan observar las coberturas de la superficie terrestre.

No obstante, se propuso la posibilidad de rellenarse este vacío de información mediante la búsqueda y adquisición de imágenes de otros sensores satelitales, en la medida en que se contaran con archivos para estas fechas. Sin embargo, para este caso en particular del AOI 2, se realizaron búsquedas adicionales para identificar qué otras opciones de imágenes satelitales

existen; pero se descubrió que definitivamente no hay archivos en las bases de datos históricas de ningún proveedor de imágenes satelitales para esta década de 1976-1986.

Por lo tanto, para este la cuenca Río Cañas, se procedió a iniciar el proceso en el periodo de 1996-2006, donde existen imágenes de calidad y fue posible analizar la cobertura de suelo.

b. Periodo: 1986-1996/1996-2006

Este segundo periodo se debe entender como los cambios de los usos de la tierra observados entre la década de 1986-1996 y la década de 1996-2006.

Sin embargo, para el caso del AOI 2 y por lo tanto, para la cuenca hidrográfica Río Cañas, no fue posible obtener imágenes satelitales históricas para la década de 1986-1996.

Se realizaron búsquedas intensivas de los archivos de imágenes satelitales Landsat para este período y área de interés, pero a pesar de ello, no se obtuvieron imágenes de calidad suficiente que cumplan con los requerimientos mínimos para poder identificar las coberturas de la tierra. Esto se debe a que, para este caso en particular, el factor nubosidad restringió la obtención de imágenes donde se puedan observar las coberturas de la superficie terrestre.

No obstante, se propuso la posibilidad de rellenarse este vacío de información mediante la búsqueda y adquisición de imágenes de otros sensores satelitales, en la medida en que se contaran con archivos para estas fechas. Sin embargo, para este caso en particular del AOI 2, se realizaron búsquedas adicionales para identificar qué otras opciones de imágenes satelitales existen; pero se descubrió que definitivamente no hay archivos en las bases de datos históricas de ningún proveedor de imágenes satelitales para esta década de 1986-1996.

Por lo tanto, para este caso de la cuenca Río Cañas, se procedió a iniciar el proceso en el periodo de 1996-2006, donde existen imágenes de calidad y fue posible analizar la cobertura de suelo.

c. Periodo: 1996-2006/2006-2016

Este tercer periodo se debe entender como los cambios de los usos de la tierra observados entre la década de 1996-2006 y la década de 2006-2016. Inicialmente se exponen los datos de extensión territorial, tanto en Km^2 como en porcentaje, de las diferentes categorías de usos de la tierra identificadas para cada década (Cuadro 9); y seguidamente se analizan los cambios observados entre ambas décadas estudiadas.

Para la década 1996-2006 se logró obtener una cobertura de los usos de la tierra que posee como fuente una imagen satelital del sensor Landsat 7 ETM+ de la fecha 2001-01-31. En cuanto a la década de 2006-2016, se logró obtener una cobertura de los usos de la tierra que posee como fuente una imagen satelital del sensor RapidEye-2 de la fecha 2013-2-11.

Cuadro 9. Usos de la tierra para las décadas de 1996 -2006 y 2006-2016

Cuenca Río Cañas				
Uso de la Tierra	**Área: Década 1996-2006**		**Área: Década 2006-2016**	
	(km²)	**(%)**	**(km²)**	**(%)**
Bosque Maduro	21.37	54.3	21.23	54
Bosque Intervenido	1.93	4.91	10.58	26.9
Pastos	9.8	24.9	2.78	7.08
Suelo Desnudo	3.4	8.68	1.06	2.65
Cuerpos de Agua	0.38	0.97	0.03	0.09
Tacotal	2.44	6.25	2.74	7
Urbano/Caminos	0	0	0.003	0.0008
Nubes	0	0	0.9	2.28
Total general	39.3	100	39.3	100

Para el caso de la década de 1996-2006, predominaron los Bosques Maduros que presentaron una extensión de 21.23 km^2 lo que significó aproximadamente un 54.3% de representación. La segunda categoría con mayor representación fueron los Pastos con un área de 9.8 km^2, es decir un 24.9% del total. La tercera posición la ocuparon los Suelos Desnudos con 3.4 Km^2 y un 8.68% de representación. La cuarta posición la ocuparon los Tacotales con un 2.44 Km^2 y un 6.25% de representación. Las categorías de menor presencia correspondieron en tanto, al Bosque Intervenido con un 1.93 Km^2 y un 4.91% de representación, y los Cuerpos de Agua con una cobertura de 0.38 km^2 o bien 0.97% del área total de la cuenca.

Por otro lado, para la década de 2006-2016 dominó el Bosque Maduro con un área de cobertura de 21.23 km^2 lo que significó aproximadamente un 54% de la cuenca. La segunda categoría con mayor representación fue el Bosque Intervenido con 10.58 km^2 o 26.9%. La tercera categoría la ocuparon los Pastos con un área de 2.78 km^2, es decir un 7.08% de la cuenca. La cuarta categoría constituye los Tacotales que cubrieron 2.74 km^2 de la cuenca, o bien 7% de esta. Las categorías que ocuparon menos terreno fueron los Suelos Desnudos con 0.9 km^2 y 2.28% del área de la cuenca, los Cuerpos de Agua, y lo Urbano y Caminos estas categorías juntas suman menos de un 0.1% de cobertura, es decir, menos de 0.05 km^2. En este caso se presenta un 2.28% de nubosidad.

Los cambios geoespaciales entre la década de 1996-2006 y la década de 2006-2016 se pueden apreciar en la Figura 21.

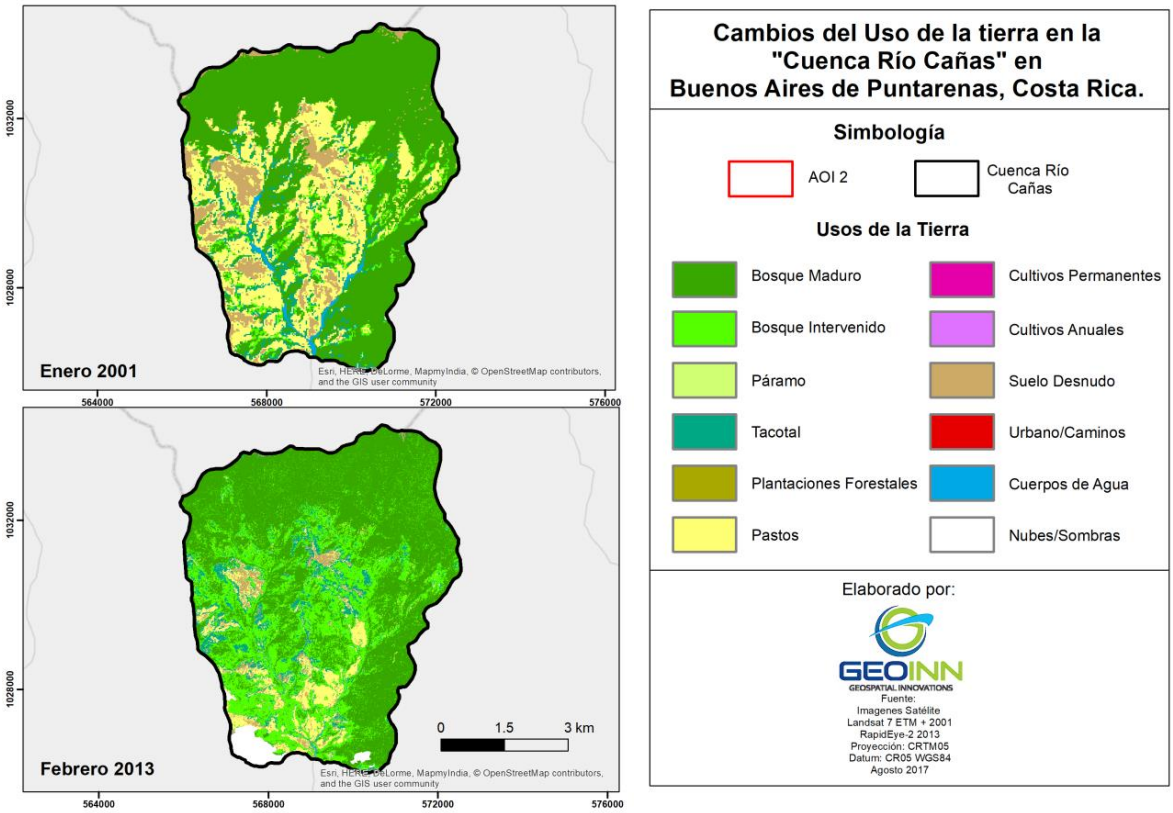


Figura 21. Mapa de cambios en el uso de la tierra para las décadas de 1996-2006 y 2006-2016.

Se puede evidenciar cambios muy importantes, en el período de estudio, a favor de la regeneración de la vegetación natural de la cuenca. Se da una reducción importante en la cobertura de Pastos, pasando de 9.1 km^2 en 2001 a 2.78 km^2 en 2013, y un aumento significativo en el área ocupada por Bosque Intervenido, pasando de 1.93 km^2 en 2001 a 10.58 km^2 en 2013. Además de la aparición de tacotales los cuales cubrieron 2.74 km^2 en 2015, y constituyen un estado inicial de la vegetación en sucesión temprana.

Por otro lado, los datos exhiben una disminución de casi 6% en la cobertura de Suelos Desnudos entre 2001 y 2013; y un aumento de casi 0.001% en el área de ocupación urbana y caminos. El crecimiento urbano es, entonces, incipiente y despreciable durante el período de estudio en este apartado.

Análisis de cambio para dos series de tiempo

a. Periodo: 1976-2016 (40 años)

Este periodo de análisis se debe entender como los cambios de los usos de la tierra observados en aproximadamente 40 años, entre el año 1976 (o fecha más próxima con imágenes satelitales disponibles en la década 1976-1986) y el año 2016 (u otra fecha de imágenes satelitales disponibles más cercanas a la actualidad).

Sin embargo, para el caso del AOI2 y por lo tanto, para la cuenca hidrográfica Río Cañas, no fue posible obtener imágenes satelitales históricas cercanas al año 1976.

Se realizaron búsquedas intensivas de los archivos de imágenes satelitales Landsat para este periodo y área de interés, pero a pesar de ello, no se obtuvieron imágenes de calidad suficiente que cumplan con los requerimientos mínimos para poder identificar las coberturas de la tierra. Esto se debe a que, para este caso en particular, el factor nubosidad restringió la obtención de imágenes donde se puedan observar las coberturas de la superficie terrestre.

No obstante, se propuso la posibilidad de rellenarse este vacío de información mediante la búsqueda y adquisición de imágenes de otros sensores satelitales, en la medida en que se contaran con archivos para estas fechas. Sin embargo, para este caso en particular del AOI 2, se realizaron búsquedas adicionales para identificar qué otras opciones de imágenes satelitales existen; pero se descubrió que definitivamente no hay archivos en las bases de datos históricas de ningún proveedor de imágenes satelitales para este periodo.

Por lo tanto, para este caso de la cuenca Río Cañas, se omite este periodo y se continúa con el siguiente.

b. Periodo: 1988-2014 (26 años)

Este periodo de análisis se debe entender como los cambios de los usos de la tierra observados en aproximadamente 26 años, entre el año 1988 (o fecha más próxima con imágenes satelitales disponibles en la década 1986-1996) y el año 2014 (u otra fecha de imágenes satelitales disponibles más próximas al 2014). Seguidamente se exponen los datos de extensión territorial, tanto en Km^2 como en porcentaje, de las diferentes categorías de usos de la tierra identificadas (Cuadro 10); y seguidamente se analizan los cambios observados entre las fechas de interés.

Cuadro 10. Usos de la tierra períodos alrededor de 1976 y 2016.

Cuenca Río Cañas				
Uso de la Tierra	**Área en 2001**		**Área en 2015**	
	(km^2)	**(%)**	**(km^2)**	**(%)**
Bosque Maduro	21.37	54.3	27.2	69.5
Bosque Intervenido	1.93	4.91	6.93	17.6
Pastos	9.8	24.9	4.33	11
Suelo Desnudo	3.4	8.68	0.59	1.64
Cuerpos de Agua	0.38	0.97	0.03	0.17
Tacotal	2.44	6.25	0	0
Urbano/Caminos	0	0	0.04	0.09
Total General	39.3	100	39.3	100

En cuanto al periodo de 1988, para el caso de la Cuenca Río Cañas, se logró obtener una cobertura de los usos de la tierra que posee como fuente una imagen satelital del sensor Landsat 7 ETM+ de la fecha 2001-01-31. Mientras que para periodo de 2014, se utilizó una imagen satelital del sensor SPOT-6 de la fecha 2015-02-19.

Para el caso del periodo de 1988, predominaron los Bosques Maduros que presentaron una extensión de 21.23 km^2 lo que significó aproximadamente un 54.3% de representación. La segunda categoría con mayor representación fueron los Pastos con un área de 9.8 km^2, es decir un 24.9% del total. La tercera posición la ocuparon los Suelos Desnudos con 3.4 Km^2 y un 8.68% de representación. La cuarta posición la ocuparon los Tacotales con un 2.44 Km^2 y un 6.25% de representación. Las categorías de menor presencia correspondieron en tanto, al Bosque Intervenido con un 1.93 Km^2 y un 4.91% de representación, y los Cuerpos de Agua con una cobertura de 0.38 km^2 o bien 0.97% del área total de la cuenca.

Por su lado, en el periodo de 2014, predominaron los usos de Bosques Maduros que presentaron una extensión en torno a los 27.2 km^2 lo que significó casi un 70% de representación aproximadamente. La segunda categoría con mayor representación fueron los Bosques Intervenidos con un área de 6.93 km^2, es decir un 17.6% del total. La tercera posición la ocuparon los Pastos con un 4.33 Km^2 y un 11% de representación. Las categorías de menor presencia correspondieron en tanto, a los Suelos Desnudos con un 0.59 Km^2 y un 1.64% de representación, los Cuerpos de Agua con 0.03 km^2 o bien 0.17% y lo referente a Urbano y Caminos con 0.04 km^2 y 0.09%).

Los cambios geoespaciales entre ambos periodos se pueden apreciar en la Figura 22. Adicionalmente se muestra a continuación el Gráfico 1, donde se comparan los usos de la tierra entre ambas fechas de interés.

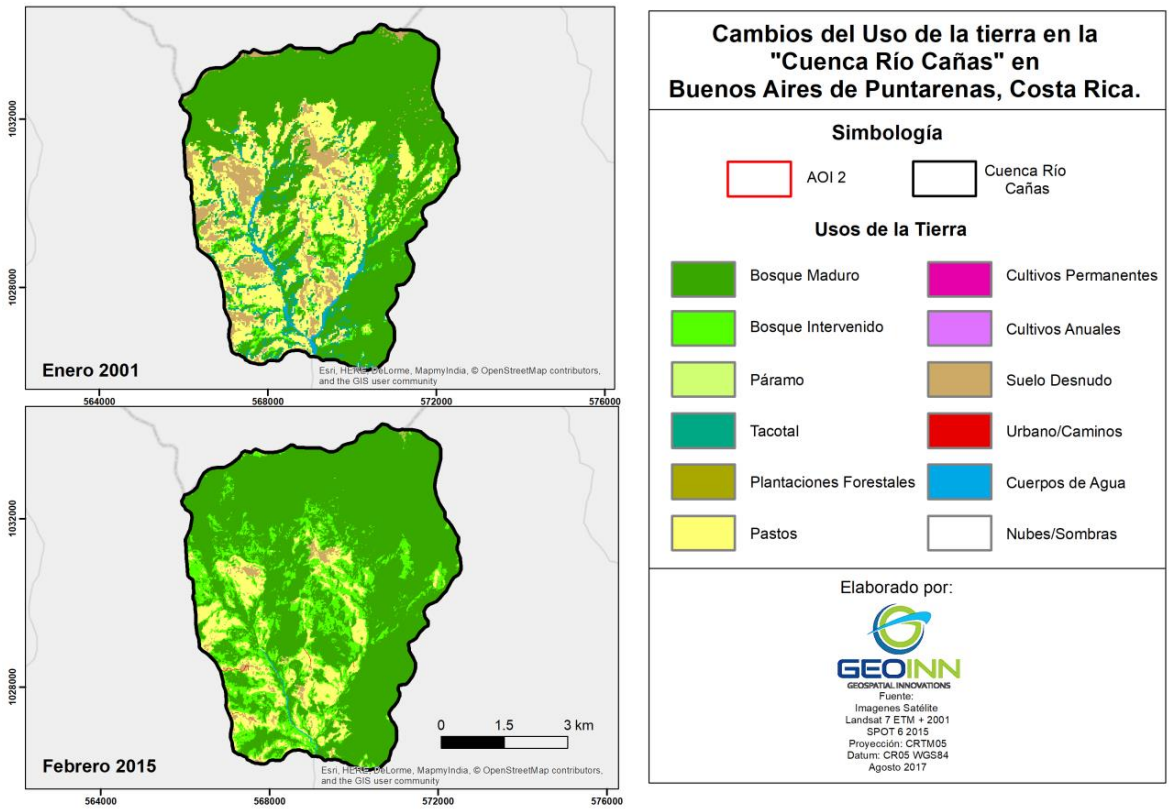


Figura 22. Usos de la tierra períodos alrededor de 1976 y 2016.

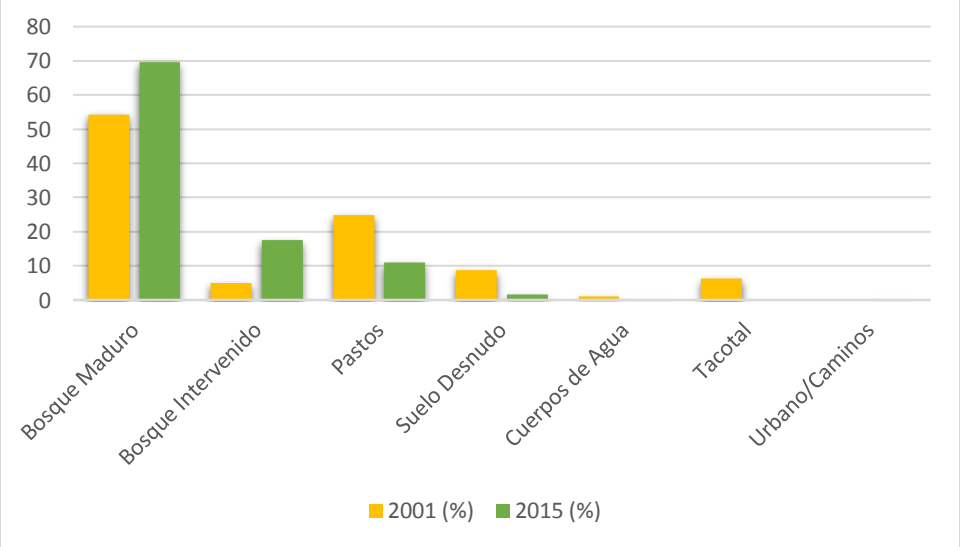


Gráfico 1. Comparación porcentual del uso de la tierra entre 1988 y 2014.

Por lo tanto, entre 2001 y 2015 en la cuenca Río Cañas, se evidencian algunos cambios y variaciones en el uso de la tierra.

El aumento en la cobertura boscosa es importante, tanto en el Bosque Maduro, que pasa de 54.3% en el 2001 a 69.5% en el 2015, como en el Bosque intervenido que cambia de 4.91% a 17

6% en el período de estudio. Esos cambios, como se observa en la Figura22, son más bruscos en el sector oeste y central de la cuenca donde se puede notar, además, una reducción significativa en el área cubierta por Pastos y Suelos Desnudos. En el caso particular de los Pastos, estos disminuyeron 13.9 puntos porcentuales de 2001 a 2015, pasando de 24.9% a 11%. Los Suelos Desnudos, por su parte, se redujeron en 7 puntos porcentuales alcanzando 1.64% de la cobertura en 2015.

Lo referente al desarrollo urbano y los caminos, muestra un aumento muy bajo y se cataloga como incipiente, llegando a cubrir menos de un 0.1% del área de la cuenca en el 2015.

Estimación de Sedimentación y Erosión anual potencial para el periodo 2016

Según la FAO (sf), en el Atlas de suelos de América y el Caribe, "el suelo es un importante recurso natural con gran influencia sobre el medio ambiente, la economía local, regional y mundial, y de él dependen, en gran medida, la supervivencia y el bienestar de la población actual y las generaciones futuras. Además, como su regeneración es muy lenta, el suelo debe considerarse como un recurso no renovable y cada vez más escaso, debido a que está sometido a constantes procesos de erosión." Variables como el clima, específicamente en época lluviosa, incrementan los procesos erosivos, principalmente en sitios con pendientes abruptas, además de las actividades antrópicas y cambios en el uso de la tierra; que son agentes que influyen en los procesos erosivos.

Seguidamente, se especifican los resultados del Sediment Delivery Ratio Model o SDR, el cual es el modelo aplicado dentro del software InVEST para estimar la Sedimentación y Erosión en las cuencas de interés:

- Exportación de Sedimentos (Sed Export): Corresponde a la suma de todos los pixeles de USLE que son transportados hacia cuerpos de agua como ríos y quebradas.
- Retención de Sedimentos (Sed Retention): Estimación de sedimentos erosionados por pixel que quedan retenidos por las coberturas de uso.
- Pérdida Potencial de Suelo o Erosión (USLE): Pérdida potencial anual de suelo por píxel en la cubierta de tierra original calculada a partir de la ecuación USLE.

Por lo tanto, las variaciones espaciales de los sitios que presentan una mayor erosión hídrica, se mostrarán en la Figura 23, 24 y 25, los cuales corresponden al mapa de Exportación de Sedimentos, Retención de Sedimentos y el USLE; con el fin de que sirvan de insumo para el manejo integral de la Cuenca Río Cañas.

Los mapas presentan una resolución de 12 m de pixel cada uno. Esta resolución dependió de la disponibilidad de los factores de entrada como C y LS correspondientes a la cobertura y la resolución del modelo de elevación digital.

A continuación se muestra el mapeo de la generación y entrega de sedimentos a quebradas y ríos, con el fin de que la información obtenida pueda ser utilizada para estudiar la dinámica de retención y pérdida de sedimentos en la Cuenca Río Cañas, esto para la gestión en la calidad del

agua. Las áreas que son más propensas a la erosión corresponden a aquellas cuyas coberturas son de pastos y suelos desprovistos de vegetación con pendientes abruptas, el resto de las áreas que son poco erosionables corresponden a sitios que presentan cobertura de bosques o zonas urbanas.

Exportación de sedimentos

La media anual de exportación de sedimentos hacia cuerpos de agua como quebradas y ríos corresponde a 0.002 ton/pixel/año, con una desviación estándar de 0.01 unidades, esto para el año 2016. La variación de la pérdida de suelo está condicionada por la cobertura y la pendiente, además de aspectos climáticos y la intervención antrópica en cuanto al manejo que se le dan a los suelos.

De manera generalizada, la Cuenca Río Cañas presenta niveles muy bajos de exportación de sedimentos, con una concentración de los valores menores ubicados en los sectores norte y este de la cuenca. La categoría más baja se presenta en 34.52 km^2 de la cuenca, es decir en un 94.1% del área total; la distribución espacial de esta categoría se muestra a lo largo de la cuenca con una aglomeración mayor al noreste, donde domina una cobertura de Bosque Maduro. Un sector menor de la cuenca (1.84 km^2, es decir 5.02%) se concentra en el segundo rango (de 0.01 a 0.05 ton/pixel/año). Existen otros sitios con mayor exportación de sedimentos, cuyos valores están entre los 0.05 y 1 ton/pixel/año y que corresponden a 0.31 km^2 (0.84%) del total de la cuenca. Las zonas que se encuentran en el cuarto rango (entre 1 y 5 ton/pixel/año), corresponden a 0.0001 km^2 del total de la cuenca, mientras que no existen sitios con una exportación de sedimentos superior a 5 ton/pixel/año abarcan apenas. En la Figura 23 se observan las distribuciones espaciales de los valores de exportación de sedimentos.

Cuadro 11. Áreas que cuantifican la exportación de sedimentos hacia ríos y quebradas según los rangos (ton/pixel/año).

Exportación de Sedimentos	
Sedimento Estimado Ton/Pixel/año	**Área Km^2**
0 - 0.01	34.52
0.01 - 0.05	1.84
0.05 - 1	0.31
1 - 5	0.0001
Mayor a 5	0

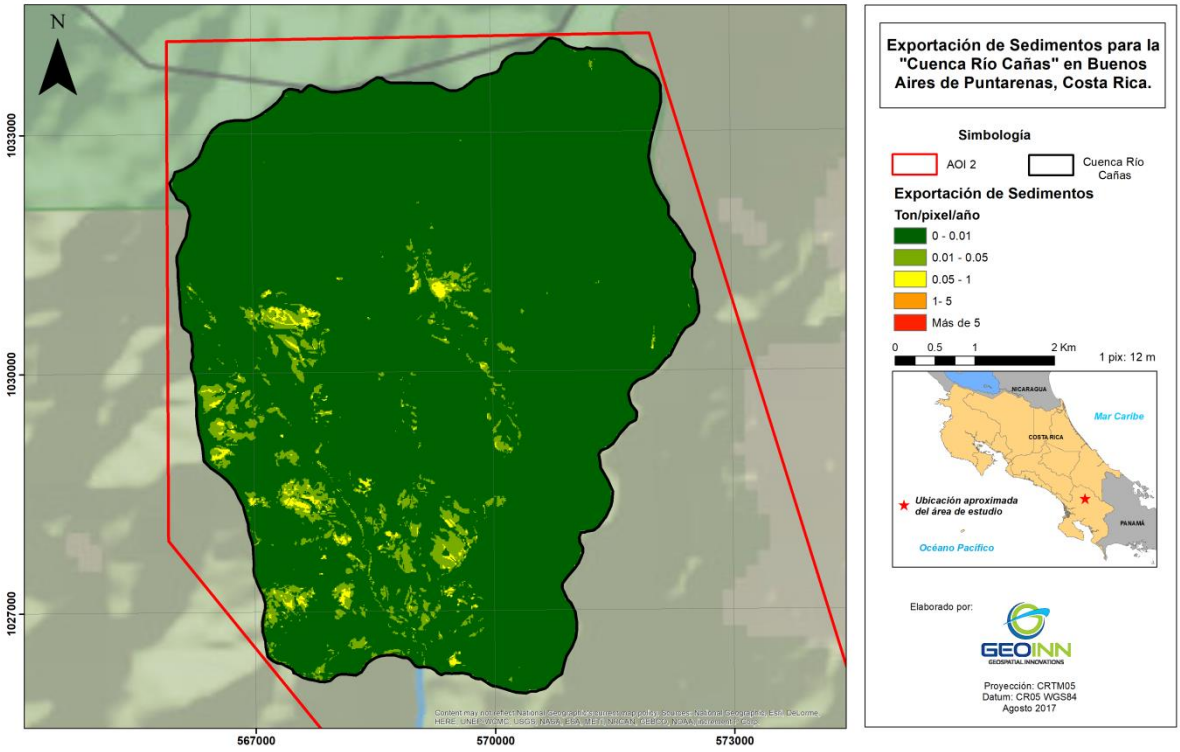


Figura 23. Mapa de Exportación de sedimentos para la Cuenca Río Cañas, año 2016.

Retención de Sedimentos

Con respecto a la retención de suelo, se estima la capacidad de un terreno para retener el sedimento, esto basado en la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE). La tasa de retención del suelo va en función de diversas variables como la cobertura de la zona, el tipo de suelo, intensidad de lluvias y la topografía. Este modelo estima cuanto sedimento erosionado en todos los pixeles quedará atrapado por la cobertura de uso, aguas abajo, basándose en la capacidad que tenga el uso principalmente si es bosque para capturar y retener el sedimento, esto a través de la trayectoria y la filtración (Izquierdo, 2012). La media anual de retención de sedimentos hacia cuerpos de agua como quebradas y ríos corresponde a 0.2 ton/pixel/año, con una desviación estándar de 0.3 unidades, esto para el año 2016.

La mayor cantidad del área de la cuenca (98.3% o bien 36.05 km^2) presenta una retención de sedimentos que varía entre 0 y 2 ton/pixel/año. Por otro lado, 0.17 km^2 (0.46%) del total de área de la cuenca presentan una retención de sedimentos que se ubica entre las 2 y 4 ton/pixel/año. El tercer rango de retención de sedimentos (de 4 a 6 ton/pixel/año) se encuentra representado por 0.009 km^2 (0.02%) en la cuenca, mientras que los valores superiores 6 ton/pixel/año no exceden los 0.0008 km^2 para esta cuenca.

Cuadro 12. Áreas que cuantifican la retención de sedimentos por rangos (ton/pixel/año).

Retención de Sedimentos	
Sedimento Estimado Ton/Pixel/año	**Área Km²**
0 - 2	36.05
2 - 4	0.17
4 - 6	0.009
6 - 8	0.0008
Mayor a 8	0

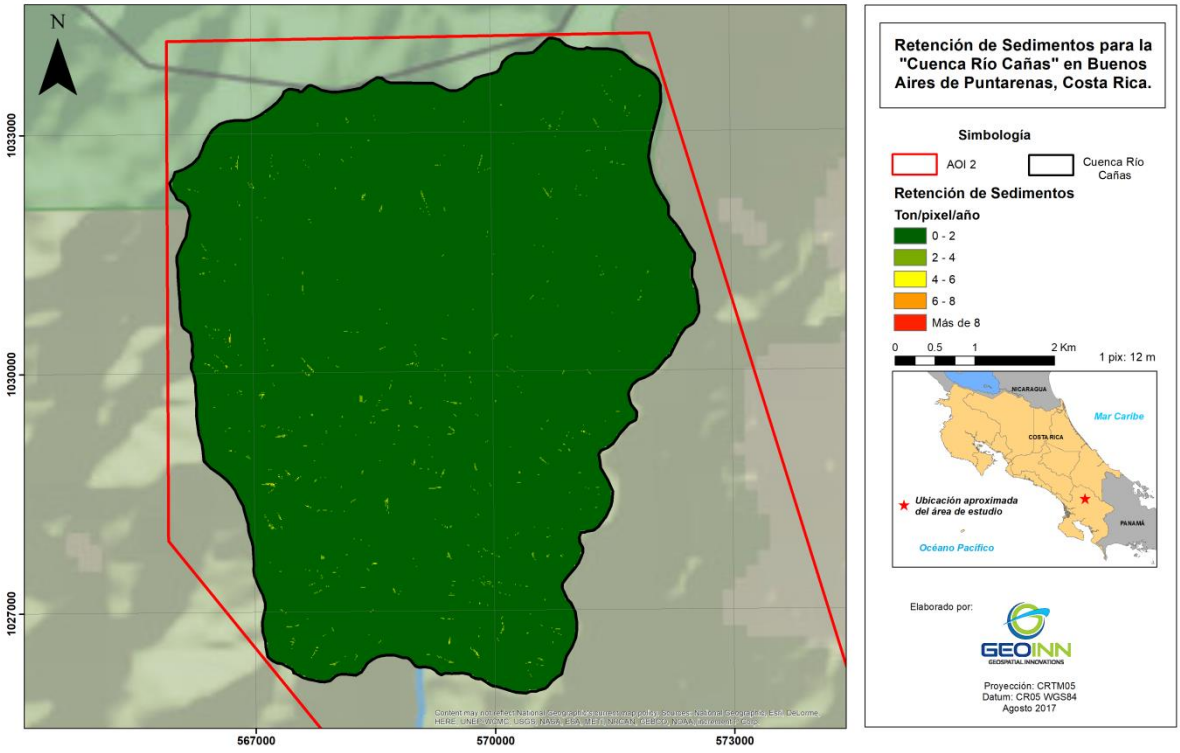


Figura 24. Mapa de retención de sedimentos para la Cuenca Río Cañas, año 2016.

Pérdida de Suelo USLE

La media anual de pérdida del suelo debido a la erosión hídrica para el año 2016 fue de 0.03 ton/pixel/año, con una desviación estándar de 0.1 unidades. La variación de la pérdida de suelo para ese periodo está condicionada por la cobertura y la pendiente principalmente, además por aspectos climáticos (proceso que se intensifica durante época lluviosa), y al tipo y manejo que se le dan a los suelos.

La categoría más baja de pérdida de suelo (entre 0 y 0.01 ton/pixel/año) se encuentra representada por 30.69 km^2 (83.7%) de la cuenca, siendo esta el área con menor pérdida de suelo a lo largo de la cuenca, esta categoría se concentra primordialmente en los sectores norte y este de la cuenca que posee una cobertura dominada por Bosque Maduro. En segunda instancia, se encuentra la categoría de erosión que va de 0.01 a 0.05 ton/pixel/año, se presenta en 1.66 km^2 lo que equivale a un 4.53% del área total de la cuenca. La tercera categoría (de 0.05 a 1 ton/pixel/año) es la que se distribuye principalmente en el sector sureste que son cubiertos, entre otros, por Pastos y Bosque Secundario y ocupa 4.2 km^2 (11.4%) del área total. La cuarta categoría representa el rango que va de 1 a 5 ton/pixel/año, abarca 0.12 km^2 (0.33% del total de la cuenca). La última categoría abarca solamente 0.002 km^2 (0.005%).

Cuadro 13. Áreas que cuantifican la pérdida de suelo según los rangos (ton/pixel/año).

Pérdida de Suelo USLE	
Erosión en Ton/Pixel/año	**Área Km²**
0 - 0.01	30.69
0.01 - 0.05	1.66
0.05 - 1	4.2
1 - 5	0.12
Mayor a 5	0.002

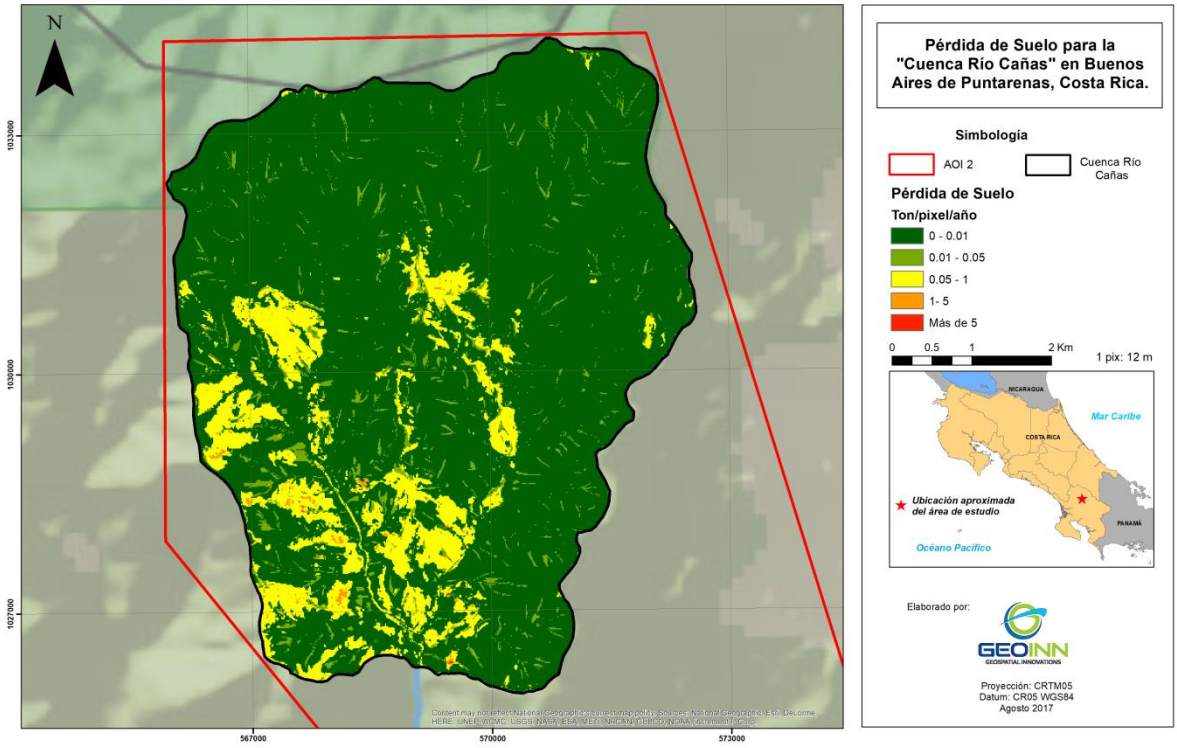


Figura 25. Mapa de Pérdida de Suelo USLE para la Cuenca Río Cañas, año 2016.

Tendencia de cambios a futuro en el uso de la tierra

Los cambios en el uso de la tierra han sido de interés con el fin de detectar las dinámicas de las actividades humanas, entre ellas el crecimiento de la población y aumento de la mancha urbana, además de la expansión de la frontera agrícola que se ha llevado a cabo en Costa Rica desde la época colonial, actividad que se intensificó a partir de la segunda mitad del siglo XX, debido a que en el país se promulgaron leyes que estimulaban la deforestación originando desplazamiento de la frontera agrícola y con ello la disminución de bosque maduro y el aumento de parches de bosque aislados (Costa Rica Contemporánea, 1999).

Con el Instituto de Tierras y Colonización (ITCO) a partir de 1961, el proceso de colonización agrícola ejerce cada vez mayor presión, debido a que surgen diversos frentes colonizadores que presionaron por establecerse desplazando las coberturas de bosque por otro tipo de actividades principalmente por la ganadería con grandes extensiones de pastos y actividades agrícolas. Ante la problemática de la disminución de los recursos forestales en el país se propuso devolver a los terrenos de aptitud forestal la cubierta boscosa, se estableció diversos incentivos para la reforestación (Costa Rica Contemporánea, 1999).

Durante el periodo de 1972-1995 el total del área reforestada manejada y conservada mediante incentivos forestales tuvo un importante aumento especialmente entre 1986 y 1991, además se incentivaron nuevas prácticas, entre ellas los sistemas agroforestales, lo cual fue favorecedor para las cuencas del país, las cuales mediante estos incentivos presentaron importantes aumentos en la cobertura de bosque.

Con respecto a la proyección de uso de la tierra para la Cuenca Río Cañas se analizarán dos períodos que corresponden a 2001 el cual es el estado inicial el cual contiene información sobre las categorías de uso de la tierra y el periodo de 2015 el cual contiene datos de uso actual con el fin de conocer las tendencias en cuanto al uso de la tierra y precisar la proyección de uso de la tierra para el año 2029, en la Figura 26 se muestra la tendencia para los 3 años.

Para la Cuenca Río Cañas la cobertura de bosque maduro mantuvo un comportamiento similar para los años 2001 y 2015, siendo el uso con mayor ocupación dentro de la cuenca. De 2001 a 2015 presentó un aumento importante pasando de 21.6 km^2 a 27.44 km^2 de extensión. La proyección de uso de la tierra para el 2029 muestra un crecimiento significativo del bosque maduro, que llega a ocupar 30.7 km^2 del área de la cuenca.

El bosque intervenido, por su parte, presenta un crecimiento de 5 km^2 entre 2001 y 2015, mientras que entre el 2015 y 2029 muestra una disminución de 1.5 km^2 aproximadamente. El comportamiento del suelo despejado es similar al del bosque intervenido sufriendo un aumento en el primer período y una disminución en el segundo. Los pastos, por otro lado, presentan una tendencia al decrecimiento entre 2001 y 2015, y 2015 y 2029; pasando de 9.86 km^2 en 2001 a 4.33 km^2 en 2015 y 2.99 km^2 en 2029.

Cuadro 14. Uso de la tierra por área (km^2) para 1985, 2015 y para la proyección de 2045.

Cuenca Río Cañas			
Tipo de Uso	**Área 2001 (Km^2)**	**Área 2015 (Km^2)**	**Área 2029 (Km^2)**
Suelo Despejado	3.52	0.64	0.71
Bosque Maduro	21.6	27.44	30.7
Bosque Intervenido	1.94	6.94	5.55
Urbano/Caminos	0	0.04	0.04
Tacotal	2.47	0	0
Pastos	9.86	4.33	2.99
Cuerpos de Agua	0.38	0.06	0.06

En el Gráfico 2 se presenta la tendencia de los usos de la tierra donde los 3 años de análisis predominan los bosques maduros los cuales se encuentran a lo largo de toda la cuenca, con una concentración mayor en el sector noreste. Para el año 2029 los usos que no corresponden a bosque se presentan en áreas muy pequeñas, siendo principalmente áreas residuales exceptuando los bosques intervenidos y los pastos.

Gráfico 2. Cambios temporales del uso de la tierra para los años 2001, 2015 y 2029

En la Figura 26 se observa que en todas las clases hubo cambios; las más dinámicas intensas fueron en los usos de pastos, suelo despejado y tacotales. Mientras que el bosque maduro mantiene una predominancia importante en todo el período.

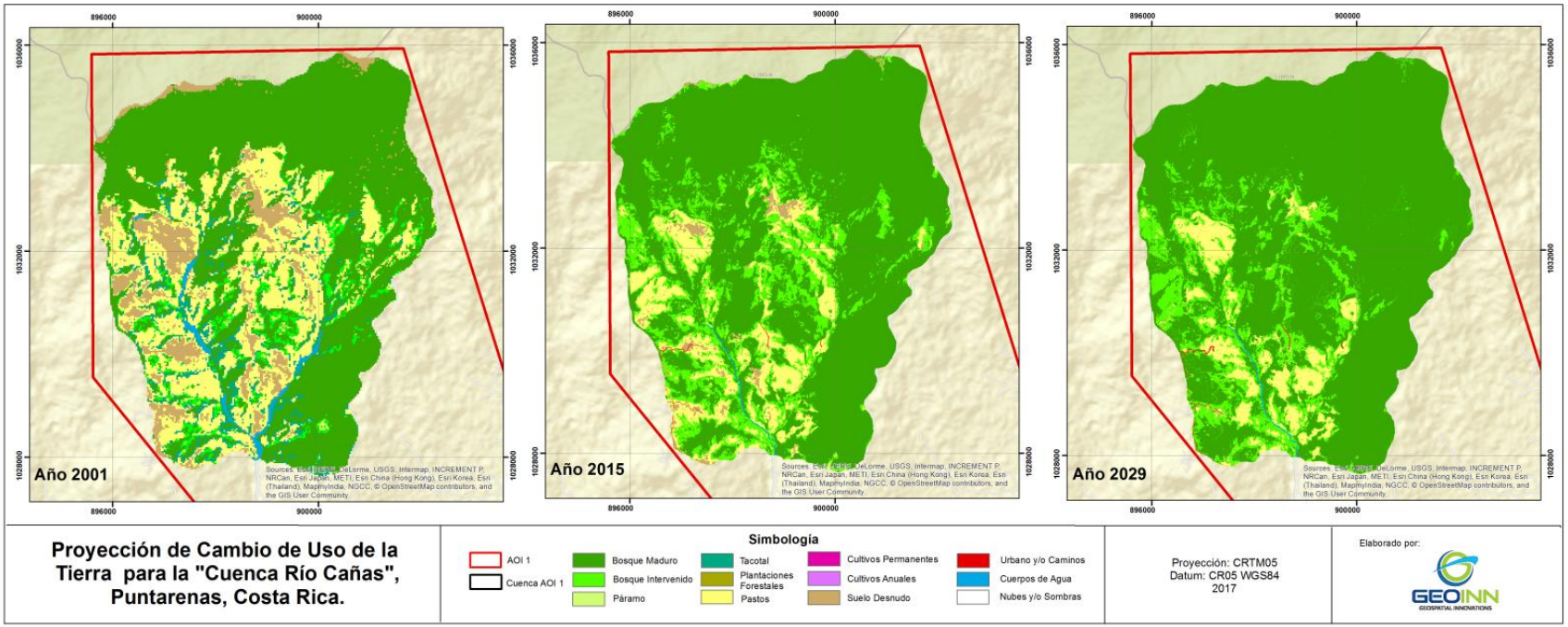


Figura 26. Mapa de cambio de uso de la tierra, periodos 2001, 2015 y la proyección para el 2029.

Conclusión

La cuenca como unidad natural permite vislumbrar con certeza la dinámica del ecosistema y la interacción entre la parte antrópica y natural, sabiendo que el ser humano conforma parte del ambiente que habita y tiene la habilidad de afectar este con su accionar. El estudio del uso del suelo pasado, presente y futuro de una cuenca permite conocer su estado y evolución a lo largo del tiempo.

Los análisis espaciales de erosión, sedimentación y, retención y exportación de sedimentos permiten distinguir las zonas más vulnerables de la cuenca a este fenómeno que puede deberse a causas naturales o antrópicas. Conjuntamente aportan información sobre la calidad de agua de la cuenca, pues debe recordarse que la turbidez por sí misma representa un tipo de contaminación, además de las partículas que viajan agregadas, absorbidas o adsorbidas en los sedimentos.

La información contenida en este informe muestra los resultados de muchas políticas implementadas a lo largo de los años, da a conocer el estado actual de las cuencas y la variación espacial que estas presentan en temas de uso, erosión y sedimentación, asimismo muestra una proyección a futuro de las cuencas. Los análisis realizados permiten a los tomadores de decisiones conocer datos necesarios para la aplicación correcta de políticas eficaces en busca de un desarrollo sostenible.

Referencias

Quesada, J et al. 1999. Costa Rica Contemporánea: raíces del estado de la nación. San José Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. Consultado en https://books.google.co.cr/books?id=qEhVTriUlB8C&pg=PA205&lpg=PA205&dq=frontera+agr%C3%ADcola+en+costa+rica&source=bl&ots=330YjDN5Uk&sig=R4aO3Q3cflGbRptGdpsp6HeR9M&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=frontera%20agr%C3%ADcola%20en%20costa%20rica&f=false

Ibáñez, S., Moreno R., Héctor, G., Blanquer, J. (Sin año). El factor LS de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Departamento Producción Vegetal, Centro Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural Tomado de: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16569/AD%20LS%20%20USLE.pdf?sequence=1 Fecha de consulta: 12/02/2016

Mas, J.F., Flamenco Sandoval, A. 2011. Modelacion de los cambios de coberturas/uso del suelo en una region tropical de Mexico. GeoTropico, 5 (1), Articulo 1: 1-24.

Renard, K.G., and J.R. Freimund. (1994) Using monthly precipitation data to estimate the R-Factor in the Revised Usle. *Journal of Hydrology* 157(1-4): 287-306.

Renschler, C.R. (1996). Soil erosion risk mapping by means of GIS and Hydrologic modelling. Internal M.Sc. (Diplom) Geo-Ecology thesis. Institute of Geography and Geo-ecology, Technical University Braunschweig, Germany, and International Institute of Aerospace Surveys & Earth Sciences, ITC, Enschede.

Wischmeier, W., and D. Smith. (1978) *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Washington, DC: US Government Printing Office. Agricultural Handbook No. 537.