

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL.

**MAPEO DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA LA
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN LA ZONA DE
INFLUENCIA DEL CENTRO AGRÍCOLA CANTONAL DE
OREAMUNO, CARTAGO, COSTA RICA, 2018.**

**PROYECTO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA.**

JOSELINE ARIAS CASCANTE.

CARTAGO, COSTA RICA,

2018.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL.

**MAPEO DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA LA
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN LA ZONA DE
INFLUENCIA DEL CENTRO AGRÍCOLA CANTONAL DE
OREAMUNO, CARTAGO, COSTA RICA, 2018.**

**PROYECTO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA.**

JOSELINE ARIAS CASCANTE.

CARTAGO, COSTA RICA,

2018.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual
4.0 Internacional.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN.

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por el investigador Vladimir Jiménez, Sra. Viviana Carpio, los profesores Gustavo Torres y Dorian Carvajal, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Vladimir Jiménez Salazar, MS.c.

Director de Tesis.



Gustavo Torres Córdoba, MS.c.

Profesor Lector.



Viviana Carpio, Bach.

Gestión Ambiental, CACO.



Dorian Carvajal Venegas, MS.c.

Coordinador de Trabajos Finales de Graduación.



Joseline Arias Cascante.

Estudiante.

MAPEO DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL CENTRO AGRÍCOLA CANTONAL DE OREAMUNO, CARTAGO, COSTA RICA, 2018.

Joseline Arias Cascante¹.

Resumen.

El presente trabajo pretendió realizar un mapeo de las áreas prioritarias para restauración ecológica en la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno (CACO), Cartago, Costa Rica.

Se utilizó una combinación de Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), para diagnosticar el estado actual del uso del suelo y las áreas que son prioritarias para promover la restauración. Para esto se definieron cinco variables fisiográficas influyentes en la zona: uso actual, capacidad de uso, cuerpos de agua, inclinación del terreno y riesgo. Se recolectó la información cartográfica correspondiente para la zona y se aplicó una encuesta a 15 expertos en diferentes instituciones que influyen en el área para completar el diagnóstico del sitio.

Entre los resultados, se obtuvo la clasificación supervisada de una imagen satelital sentinel-2 para el año 2018, que permitió determinar el uso del suelo actual para la zona de estudio el cual se clasificó en cinco macroclases bosque (30,62%), cultivos (24,49%), pastos (36,50%), cultivos confinados (3,41%) y urbano (4,96%), esta clasificación se realizó con una exactitud total de 80% y un valor para el estadístico Kappa de 0,73 siendo estos valores considerables y confiables.

Permitió la identificación de las áreas prioritarias a restaurar las cuales se dividieron en tres categorías: alta (297,8 ha), media (1932,4 ha) y baja (1526.2 ha) sobre esta última categoría se definieron dos estrategias de restauración una para la zona de riberas de los ríos y otra para los terrenos abiertos, estas propuestas fueron establecidas con el objetivo de recuperar los servicios ecosistémicos de la zona; por

lo cual cumplen con los requisitos de adaptabilidad y beneficios indispensables (conservación de agua, evitar la erosión, estabilizar los suelos y alimento para la fauna).

Palabras Claves: Técnica de Evaluación Multicriterio, Sistemas de Información Geográfica, Restauración ecológica, imágenes satelitales, uso del suelo.

¹Arias, J. (2018). Mapeo de áreas prioritarias para la restauración ecológica en la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, Cartago, Costa Rica. (trabajo final de graduación para optar por el grado de licenciatura). Escuela de Ingeniería Forestal. ITCR. Cartago, Costa Rica.

Abstract.

The present work intends to make a mapping of the priority areas for ecological restoration in the area of influence of the Cantonal Agricultural Center of Oreamuno (CACO), Cartago, Costa Rica.

A combination of Multicriteria Evaluation Techniques (CME) and Geographic Information Systems (GIS) was used to diagnose the current state of land use and priority areas to promote restoration. For this five influential physiographic variables were defined in the area: current use, capacity of use, bodies of water, terrain inclination and risk. The corresponding cartographic information for the area was collected and a survey was applied to 15 experts in different institutions that influence the area to complete the diagnosis of the site.

Among the results, the supervised classification of a sentinel-2 satellite image was made, which allowed to determine the current land use for the study area which was classified into five forest macroclasses (30.62%), crops (24.49 %), pastures (36.50%), confined cultures (3.41%) and urban (4.96%), this classification was made with a total accuracy of 80% and a value for the Kappa statistic of 0.73 these values being considerable.

It allowed the identification of the priority areas to be restored, which were divided into three categories: high (297.8 ha), medium (1932.4 ha) and low (1526.2 ha). Two restoration strategies were defined on the latter category, one for the area of riverbanks and another for open land, these proposals were established with the aim of recovering the ecosystem services of the area; therefore they meet the requirements of adaptability and benefits to the area (water conservation, avoid erosion, stabilize the soil and food for wildlife).

Key words: Multicriteria Evaluation Technique, Geographic Information Systems, Ecological restoration, satellite images, land use.

Dedicatoria.

A Dios por darme la vida y la fortaleza para seguir siempre adelante, por guiarme en cada paso de mi camino.

A mis padres Edwin y Olga por ser mi ejemplo a seguir, por enseñarme que para lograr lo que se quiere hay que trabajar duro y hacerlo todo con humildad.

A mis hermanos Steven y Sofia por ser mis mejores amigos y confidentes.

A Mario por compartir su vida conmigo.

Agradecimientos.

A Dios infinitas gracias por dejarme culminar esta etapa de mi vida y por todas las bendiciones que me da día con día.

Al TEC por ser pilar de mi educación, a la Escuela de Ingeniería Forestal por acogerme y enseñarme lo que hoy me llevo como profesional.

Al Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno que me abrió sus puertas para realizar este proyecto, y sobre todo a Viviana Carpio que estuvo apoyándome durante todo el proceso.

A mi tutor Vladimir Jiménez por ayudarme en este proceso y apoyarme con todo, darme palabras de aliento y por la paciencia.

A mi familia Papi y Mami gracias por todo su esfuerzo para darme una educación y por enseñarme los valores que me han ayudado a seguir adelante. Sofi y Steven gracias por todo por estar siempre, escuchar mis dudas y darme consejo.

A Mario, que sin su apoyo este proceso hubiera sido totalmente diferente, por estar a mi lado, por apoyarme y luchar juntos por nuestros sueños.

A mis amigos, la familia que me escogió y escogí en este camino; María y Juanjo los mejores compañeros, Arleth, Arturo, Niko, Mariam y todos los injertados, gracias por todo y que esta amistad siga creciendo.

Índice General.

Resumen.....	i
Abstract.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Índice General.....	vi
Índice de Cuadros.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Índice de Anexos.....	xii
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos específicos.....	4
Revisión de literatura.....	5
La pérdida de servicios ecosistémicos: Restauración ecológica su importancia y estrategias.....	5
Actividad agrícola y la importancia de la zona de estudio.....	9
Utilización de los Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en estudios.....	12
Material y métodos.....	15
Descripción del sitio.....	15
Recolección de datos en campo.....	17
Clases de Cobertura.....	17
Ruta para la toma de datos.....	18

Fase I: Clasificación de la cobertura	20
Clasificación de la cobertura del suelo	20
Validación de la clasificación de la cobertura	21
Comparación con los datos tomados en campo	22
Análisis de aleatoriedad de los datos.	23
Fase II: Priorización de áreas a restaurar.	23
Selección de los criterios de priorización.....	23
Restricciones.....	24
Asignación de valores.....	25
Asignación de pesos por criterio de los expertos y productores.....	28
Procesamiento de información en Sistemas de Información Geográfica.....	28
Fase III: Plan de restauración	30
Resultados y Discusión	32
Obtención de la información cartográfica existente y su procesamiento en Sistemas de Información Geográfica	32
Capacidad de uso.....	32
Inclinación del terreno.....	35
Cuerpos de Agua.....	37
Riesgo.	39
Uso Actual.	41
Análisis de imágenes satelitales.....	41
Validación de la clasificación.....	43
Capa de uso actual del suelo.	46
Productos obtenidos de la asignación de pesos según expertos	46

Divergencias entre el uso actual y la capacidad de uso de la tierra.	48
Obtención de las áreas prioritarias a restaurar.	53
Plan de Restauración.	57
Ecosistema de referencia y evaluación del estado actual del ecosistema.	57
Barreras a la restauración.	59
Selección de especies adecuadas para la restauración.	60
Selección de sitios a restaurar.	62
Estrategias de restauración.	69
Conclusiones.	75
Recomendaciones.	77
Referencias.	78
Anexos.	85

Índice de Cuadros.

Cuadro 1. Información general del sitio de estudio, 2018.	15
Cuadro 2. Descripción de las coberturas para la clasificación de la cuenca alta y media del río Reventazón, Costa Rica, 2010.....	18
Cuadro 3. Asignación de valores nominales a las variables de estudio.	26
Cuadro 4. Escala de priorización.....	30
Cuadro 5. Columnas propuestas para la capa de capacidad de uso.	32
Cuadro 6. Columnas propuestas para la capa de pendiente.	37
Cuadro 7. Columnas propuestas para la capa de ríos.	39
Cuadro 8. Columnas propuestas para la capa de riesgo.	41
Cuadro 9. Matriz de error de la clasificación supervisada realizada para la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, 2018.	43
Cuadro 10. Valores de exactitud logrados con la clasificación realizada para la zona de estudio, Cartago, Costa Rica, 2018.	44
Cuadro 11. Escala de interpretación para el coeficiente Kappa.....	45
Cuadro 12. Columnas propuestas para la capa uso actual.....	46
Cuadro 13. Matriz de priorización para la restauración ecológica en las zonas de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, 2018.	47
Cuadro 14. Resumen de la estrategia de restauración para la Zona 1.	63
Cuadro 15. Resumen de la estrategia de restauración para la Zona 3.	66

Índice de Figuras.

Figura 1. Modalidades de Pagos por Servicios Ambientales presentes en la provincia de Cartago.	9
Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio, Cartago, Costa Rica.	16
Figura 3. Propuesta de rutas para la toma de datos en campo.....	19
Figura 4. Diseño para la toma de datos.	20
Figura 5. Diagrama del proceso de trabaja en Sistemas de Información Geográfica, para la priorización de áreas a restaurar.....	29
Figura 6. Secuencia y relaciones de los pasos fundamentales en la restauración ecológica, aplicados en la zona de estudio.....	31
Figura 7. Mapa de capacidad de uso de las tierras forestales para la zona en estudio.	33
Figura 8. Distribución porcentual de la capacidad de uso de la tierra para el área de estudio.	34
Figura 9. Mapa de topografía para la zona de estudio por porcentajes de inclinación.	36
Figura 10. Mapa de cuerpos de agua para la zona en estudio.	38
Figura 11. Mapa de riesgos potenciales para el área de estudio.	40
Figura 12. Uso del suelo al 2018, para la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, imagen Sentinel-2.	42
Figura 13. Divergencia entre capacidad de uso y uso actual (2018) del área de estudio.	49
Figura 14. Divergencia entre capacidad de uso y uso actual (2018) del área de estudio, según clases de uso.	50

Figura 15. Mapa de divergencias de capacidad de uso de las tierras forestales y uso actual (2018) para el área en estudio.....	52
Figura 16. Histograma de frecuencias para el resultado de la priorización de áreas.	53
Figura 17. Valores de área en hectáreas obtenidos para cada valor de priorización establecidos para el estudio.....	54
Figura 18. Priorización de zonas a restaurar en la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno.....	56
Figura 19. Zona 1 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.	64
Figura 20. Zona 2 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.	65
Figura 21. Zona 3 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.	67
Figura 22. Zona 4 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.	68
Figura 23. Opción 1 de propuesta para restauración en la zona de influencia del CACO (ríos).....	70
Figura 24. Opción 2 de propuesta para restauración en la zona de influencia del CACO, (zonas de riesgo).	72
Figura 25. Opción 3 estrategia para restauración en la zona de influencia del CACO (cercas vivas y cortinas rompevientos).	73

Índice de Anexos.

Anexo 1. Formulario para la recolección de información en campo.	85
Anexo 2. Especificaciones de la imagen sentinel-2.....	85
Anexo 3. Matriz de Saaty para la recolección de información de priorización por criterio experto.	86
Anexo 4. Escala de preferencias de Saaty, para completar la priorización.....	86
Anexo 5. Modificación de la matriz de Saaty para la recolección de información para la priorización por criterio de expertos, 2018.....	87
Anexo 6. Modificación de la escala de preferencias de Saaty, para completar la priorización, 2018.....	87
Anexo 7. Lista de especies forestales recomendadas para la restauración.	88
Anexo 8. Prácticas de Conservación de suelos y agua, según clase del suelo Decreto N° 23212- MAG-MIRENEM.....	90

Introducción.

El sector norte de la provincia de Cartago es un territorio altamente productivo, el cual aporta a la economía nacional el 80% de la producción de hortalizas; el clima y los suelos de la región son excelentes para la producción de estas, la actividad agrícola es el eje de la vida local, permitiendo estabilidad socioeconómica a las familias de la zona (Ramírez, Mchugh y Alvarado, 2008), pero en los últimos años se ha dado un proceso de ocupación de ecosistemas acelerado debido a la expansión de los asentamientos humanos y el desarrollo del sector agropecuario, que han deteriorado los hábitats aledaños.

A pesar de los grandes beneficios que brinda la naturaleza, actualmente estos ecosistemas se están viendo afectados por la presión por el sobreuso y la degradación de sus recursos; las principales problemáticas que enfrentan los ecosistemas terrestres son la deforestación y la degradación (CONAFOR, 2009). En el caso de la zona de estudio además del sobreuso por la actividad agrícola y pecuaria se debe tener en cuenta la vulnerabilidad de la zona por amenaza de desastres naturales como lo es la actividad volcánica (1963-1965), deslizamientos, inundaciones y avalanchas (CNE, 2002).

Estos fenómenos implican la reducción de la cubierta vegetal lo que ocasiona problemas como modificaciones en los ciclos hídricos y cambios regionales de los regímenes de temperatura y precipitación, favoreciendo con ello el calentamiento global, la disminución en la captura de dióxido de carbono y la pérdida de hábitats y fragmentación del ecosistema (CONAFOR, 2009).

Por lo cual aparece la idea de implementar en la zona el método de restauración ecológica, para revertir estos problemas y recuperar los servicios ecosistémicos perdidos. Barrientos y Monge, (2010), definen el término de restauración ecológica como la intervención que a través de distintas herramientas para lograr el restablecimiento de la estructura, la productividad y la diversidad de las especies

originalmente presentes en el ecosistema. Con el tiempo, los procesos ecológicos y las funciones coincidirán con las del ecosistema original (CONAFOR, 2016).

La integración de técnicas que ayuden a la restauración como los Sistemas Agroforestales (SAF), cuyo objetivo es una producción sostenible a lo largo del tiempo también tienen ventaja sobre los monocultivos para responder a la demanda de una agricultura multifuncional que proveen servicios medioambientales importantes y valor estético. Herramientas como esta son necesarias en un escenario como el presente en la región, donde las personas dependen de paisajes degradados para sus actividades productivas (Calle, Calle, Garen, y Del Cid-Liccardi, eds., 2014). Además, los SAF son una herramienta complementaria para la conservación y deben ser incorporados en el manejo de los paisajes para conservar y proteger los fragmentos de bosque remanentes, aumentar la cobertura arbórea en las fincas, amortiguar y conectar las áreas protegidas (Beer, Harvey, Ibrahim, Harmand, Somarriba, y Jiménez, 2003).

La restauración ecológica-forestal a nivel de paisaje se centra en el restablecimiento de las funciones y procesos clave de los ecosistemas en la totalidad del paisaje, en vez de restaurar pequeñas áreas de forma aislada. De esta forma la restauración se puede dirigir a un mosaico de áreas con diversos usos de suelo, incluyendo tierras agrícolas y diferentes tipos de bosque, en los cuales puede existir una mezcla equilibrada entre protección, manejo y restauración, que proporcione biodiversidad y beneficios ecológicos, económicos y sociales (Barrientos y Monge, 2010).

Para crear una línea base del estado actual de la zona de estudio y así poder dirigir los esfuerzos de restauración a las zonas más necesitadas se abordó el tema a partir de la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), que ayudan a describir, analizar y correlacionar los fenómenos que afectan el medio ambiente.

La evaluación multicriterio al ser un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisión permiten: ponderar impactos ambientales provocados

por el accionar humano, a partir de confrontaciones de variables naturales o antrópicas, construir escenarios que permitan disminuir la incertidumbre en relación a la toma de decisiones y evaluar alternativas; mientras que el análisis SIG permite a partir de información espacial la construcción de modelos lógicos y clasificación de imágenes espaciales para lograr crear un diagnóstico base del estado de una zona (Valpreda, 2005).

De este modo se crean estrategias para el manejo adecuado de la cobertura vegetal que consisten en apoyar actividades que involucren conservación, protección e incremento de la masa forestal, donde se dé producción sostenible mediante sistemas agroforestales y proyectos de restauración los cuales son importantes para impulsar el desarrollo sostenible de las actividades agrícolas y pecuarias de la zona, que se enfrentan a problemas de conservación de los recursos suelo y agua. Sumado a esto se debe mencionar la labor del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno el cual debe velar porque sus asociados implementen prácticas de conservación de los suelos siembras en contorno, el uso del codal, el cambio en el sistema de ladera, los canales de guardia, las barreras vivas y el cambio de uso de la tierra con cultivos alternativos, reducción de agroquímicos y en general todas las alternativas para la conservación del recurso hídrico y la disminución de la degradación de los suelos. Todo esto ayudara a la rehabilitación de las laderas de los ríos, quebradas y sitios degradadas que brindarán servicios ecosistémicos a la zona y sobre todo servirán de conectores para el movimiento de la fauna presente.

Objetivos

Objetivo General

Realizar un análisis integral de las variables fisiográficas dentro del área de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno (CACO), para crear un mapa de sitios relevantes para la restauración y manejo de los recursos naturales.

Objetivos específicos

- Determinar el uso actual del suelo y elaborar un mapa de cobertura para el área de estudio.
- Establecer un modelo que combine técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar potenciales áreas de restauración y reforestación, dentro del área de estudio.
- Definir las zonas de conflicto en cuanto a uso del suelo agrícola/forestal en el área en estudio.
- Elaborar un plan de restauración enfocado en las recomendaciones técnicas para el sitio de estudio.

Revisión de literatura.

La pérdida de servicios ecosistémicos: Restauración ecológica su importancia y estrategias.

Según CONAFOR (2009), la restauración ecológica se define como el proceso de alteración intencional de un hábitat para establecer un ecosistema natural histórico, con el objetivo de imitar la estructura, la función, la diversidad y la dinámica del ecosistema natural. Es una actividad tecnológica que recupera en un ecosistema dañado el suelo, el agua, el aire y las especies que lo habitaron originalmente es un proceso extremadamente difícil, debido a la complejidad de interrelaciones y elementos que están presentes.

Es de importancia crear conciencia y estrategias para la recuperación de estos recursos, donde la restauración ecológica entra a jugar un papel importante en el establecimiento de áreas para protección. La importancia que tiene la restauración ecológica se deriva de la existencia generalizada de distintas formas de degradación de los recursos naturales y las condiciones ambientales, que tienen su manifestación en aspectos tales como la pérdida de vegetación y suelos, aguas contaminada, contaminación atmosférica, pérdida genética, el deterioro progresivo de distintos tipos de sistemas (Gálvez, 2002).

Según Barrientos y Monge, (2010), existen diversas estrategias encaminadas a lograr la restauración de los ecosistemas, entre las más importantes se puede mencionar la rehabilitación, el saneamiento o reclamación, reemplazamiento vegetal y el recubrimiento vegetal o revegetación. A continuación, se definen algunos términos de importancia en las actividades de restauración:

- a) Rehabilitación: Acciones orientadas al restablecimiento de la productividad y de algunas otras funciones ecológicas. Se busca la reintroducción de alguna pero no necesariamente todas las especies animales y vegetales originalmente

presentes. Por razones ecológicas o económicas, el nuevo bosque puede incluir especies que no estaban originalmente presentes.

- b) Saneamiento o reclamación. Su objetivo es recobrar la productividad en un sitio degradado. La diversidad biológica original no se recupera y la mayoría de los servicios ecológicos pueden ser restablecidos (entre ellos la de protección).
- c) Reemplazamiento vegetal: Es el proceso por el que se induce la formación de un ecosistema diferente al original, generalmente no se considera la condición natural histórica del sitio.
- d) Recubrimiento vegetal o revegetación: Esta estrategia puede lograrse únicamente fortaleciendo procesos como la sucesión vegetal, la productividad, la ecología del suelo, la incorporación de nutrientes, entre otros; el objetivo principal es permitir que el sistema regrese por sí sólo a su estado original utilizando especies nativas.

Algunos puntos que se mencionan en el proceso de restauración ecológica son que los trabajos de restauración deben realizarse con especies nativas y evitar el uso de especies introducidas; el uso de especies introducidas puede desencadenar problemas ecológicos, como la pérdida de biodiversidad, el incremento de enfermedades, la disminución de alimento y nutrientes para las especies nativas, (Barrientos y Monge, 2010). Además, la cooperación entre distintos sectores de la sociedad para la formulación y operación de los planes contribuye a la gobernabilidad de los procesos de restauración (Barrientos y Monge, 2010). La conciliación de múltiples puntos de vista y el equilibrio de poderes son fundamentales para construir sistemas eficaces de gestión del paisaje; además, la participación social también crea las condiciones que dan legitimidad a las acciones y metas establecidas en los planes de restauración (Méndez, Martínez, Ceccon, y Guariguata, 2017).

Una técnica utilizada en el área de estudio para restablecer procesos ecosistémicos es la creación de corredores biológicos cuyo fin es la conectividad la cual se define como la facilidad o dificultad de movimiento de la biota entre fragmentos de hábitat (Alonso, Finegan, Brenes, Günter y Palomeque, 2017). Los corredores son más que

soluciones a problemas de conservación, son oportunidades de hacer gestión ambiental adecuada que lleve a una mejoría de la calidad de vida de las personas involucradas (García, 2002).

Otra tecnología que ha tomado auge en los últimos años es la creación de agro-paisajes mediante el establecimiento de Sistemas Agroforestales; varios trabajos científicos sugieren que esta práctica provee a la sociedad de servicios ambientales fundamentales y contribuyen en forma significativa a la conservación de la biodiversidad, sin sacrificar la productividad y rentabilidad de las actividades agrícolas (Calle et al., 2014.)

Los servicios ecosistémicos o ambientales son los múltiples beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad (Barrientos y Monge, 2010). La calidad de estos servicios está intrínsecamente relacionada con la diversidad existente en los ecosistemas. (Latterra, Jobbágy y Paruelo, 2011). La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA) define los servicios ecosistémicos como los beneficios que las personas obtienen (directa o indirectamente) de los ecosistemas o ambientes naturales (MEA, 2005).

De acuerdo con MEA (2005), los servicios ecosistémicos pueden ser divididos en 4 grandes grupos o categorías:

- a) Servicios de base o apoyo: servicios necesarios para la producción de los demás servicios de los ecosistemas.
- b) Servicios de suministro: productos o bienes que se obtienen de los ecosistemas.
- c) Servicios de regulación: beneficios provenientes de la regulación de los procesos de los ecosistemas.
- d) Servicios culturales: beneficios intangibles adquiridos a partir de la relación humana con los ecosistemas.

En Costa Rica existe el Programa de Pago de Servicios Ambientales (PSA), que consiste en un reconocimiento financiero por parte del Estado, a través del Fondo

Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), a los propietarios de bosques y plantaciones forestales por los servicios ambientales que éstos proveen y que inciden directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente. (FONAFIFO, 2014).

De acuerdo con la Ley Forestal N° 7575, Costa Rica reconoce los siguientes servicios ambientales (Leyes y Decretos, 1996):

- a) Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (fijación, reducción, secuestro, almacenamiento y absorción).
- b) Protección del agua para uso urbano, rural o hidroeléctrico.
- c) Protección de la biodiversidad para su conservación y uso sostenible, científico y farmacéutico, de investigación y de mejoramiento genético, así como para la protección de ecosistemas y formas de vida.
- d) Belleza escénica natural para fines turísticos y científicos.

En la Figura 1, se presenta el desglose de las diferentes modalidades de PSA para la provincia de Cartago, donde los cantones de interés Oreamuno y Cartago presentan un total de 14 y 13 contratos de PSA respectivamente, para el periodo (2015-2018). Donde se aprecia que entre ambos cantones solo se encuentran 6 contratos correspondientes a PSA-SAF, mientras que en la modalidad de conservación de bosques presentan 8 y 7 contratos respectivamente. Más específicamente dentro del área de estudio solo se presentan 5 contratos de PSA, 2 correspondientes a la modalidad de protección de bosque y 3 en modalidad PSA-SAF.

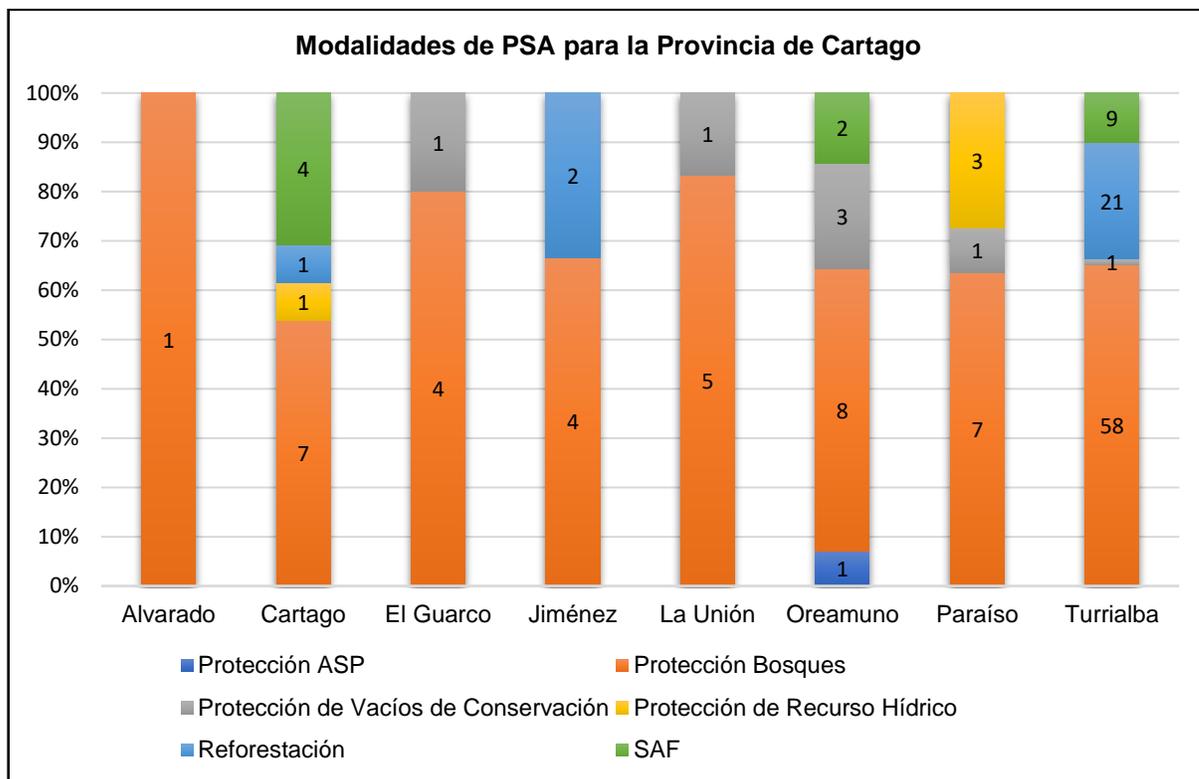


Figura 1. Modalidades de Pagos por Servicios Ambientales presentes en la provincia de Cartago.

Actividad agrícola y la importancia de la zona de estudio.

Los sistemas productivos formados por la agricultura y la ganadería ocupan cerca de 40% de la superficie terrestre, consumen 70% del recurso hídrico disponible del planeta y representan uno de los principales factores responsables por la deforestación y la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente en América Latina donde estos impactos son más evidentes. A pesar de su crucial e incuestionable importancia para el bienestar humano (alimentos, empleos, energía, etc.) aún enfrentan enormes desafíos socioambientales a escala mundial (Veluk, 2010).

En cuanto a la realidad del país, la cuenca del río Reventado se localiza en la zona Norte de Cartago (zona de estudio) la cual aporta a la economía nacional el 80% de la producción de hortalizas esta actividad permite estabilidad socioeconómica a las

familias de la zona; tanto así que comunidades como Llano Grande y Tierra blanca son eminentemente agrícolas, ya que 80% del terreno se dedica a la agricultura y el otro 20% a ganadería (Ramírez, Mchugh y Alvarado, 2008). En esta área se encuentra según el IV Censo Nacional Agropecuario (INEC, 2015) el 52,87% de las fincas productoras de hortalizas del país. Debido a ser un territorio de alta productividad presenta una explotación intensa y desmedida de los suelos.

Otro aspecto importante de estas subcuencas (subcuenca río Reventado y subcuenca río Paez-Birrisito) es que son tributarias del río Reventazón y al ser parte de su área de drenaje representa para el país relevancia económica y social, debido al potencial que posee en el campo de recursos naturales y generación hidroeléctrica. La cuenca alta del Río Reventazón, es donde se origina el 50% del agua que se consume en el Área Metropolitana de Costa Rica, ocupando el cuarto lugar en importancia en el país contemplando la fuente de agua para consumo humano, la producción agrícola y la producción de energía hidroeléctrica (COMCURE, 2016) siendo así una región de suma importancia para el desarrollo del país

Debido a la sobreexplotación de la tierra que se da en la zona, el desafío que deben tomar los productores es la búsqueda de nuevas técnicas y estrategias de conservación para aplicar en sus fincas como lo es la agricultura sostenible la cual es un sistema de producción agraria conservador de recursos, ambientalmente sano y económicamente viable, (Villalva y Fuentes, s.f). Otra técnica importante es la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) la cual es una forma de utilizar la tierra combinando especies forestales, cultivos agrícolas y ganadería (Leyes y Decretos, 1996), esta técnica tiene diferentes categorías, (ONF, 2013):

- Sistemas agrosilvicultural: sistema donde se combinan árboles con cultivos agrícolas en el mismo sitio.
- Sistemas agrosilvopastoriles: sistema donde se combinan árboles con cultivos agrícolas y pastos para producción animal, en forma simultánea o en forma secuencial.

- Sistema silvopastoril: sistema donde se integran pastos para ganado en una misma unidad de tierra, en asociación con árboles para leña, madera, frutos y forraje.

Para un manejo sostenible de los agroecosistemas, se deben considerar la productividad, resiliencia, estabilidad y equidad, considerando las dimensiones ecológica, social y económica, (Ramírez et al., 2008). Uno de los retos fundamentales del sector agropecuario es producir a partir de un uso racional de los recursos naturales, combinando criterios económicos, de equidad y respeto ambiental. Para ello se debe promover un desarrollo centrado en la búsqueda del mejoramiento de la calidad de vida humana, sin agotar la capacidad de carga de los ecosistemas, de manera que los beneficios de la naturaleza y la sociedad alcancen no solo para las generaciones presentes, sino de las venideras (Ramírez et al., 2008).

Se debe tener en cuenta que la cobertura y uso del suelo son dos de los elementos que mejor evidencian la transformación de la superficie terrestre por parte de la acción humana a través del tiempo; el proceso del sobreuso del suelo deriva en impactos que se relacionan con la deforestación y fragmentación de los ecosistemas, alteración de los ciclos hidrológicos, la pérdida de diversidad biológica y el incremento de la vulnerabilidad de las poblaciones humanas (Reyes, Aguilar, Aguirre y Trejos, 2006), si bien existen alteraciones naturales, en las últimas décadas el impacto de las actividades humanas se ha convertido en uno de los principales agentes transformadores de los ecosistemas.

La transformación de la cubierta terrestre tiene implicaciones ecológicas y económicas, dependiendo de del tipo de cubierta y actividad económica que allí se realice, los cambios contemporáneos en los usos y cobertura del suelo suelen implicar como primer impacto una reducción de la producción primaria neta de los ecosistemas, como consecuencia de ella, un aumento de los requerimientos de materiales y energéticos para asegurar el funcionamiento del sistema económico asociado, (Murray, Blázquez y Rullan, 2005).

Utilización de los Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en estudios.

El conocimiento de la cobertura de los ecosistemas es indispensable para definir, determinar y cartografiar unidades ecológicas homogéneas; existen diferentes tipos de cobertura los cuales se agrupan en clases de acuerdo con sus características. El entendimiento de la cobertura y uso de la tierra constituye uno de los aspectos más importantes dentro del análisis físico-biótico para el ordenamiento territorial por ser indispensable no sólo en la caracterización y especialización de las unidades de paisaje, sino también, por su influencia en la formación y evolución de los suelos. (Municipio de Miranda-Cauca, 2001).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son un potente instrumento para la recogida, almacenamiento, gestión, análisis y representación de datos geográficos referidos a un territorio concreto; debido a esta capacidad son sistemas utilizados en la obtención de cartografía temática (Sánchez, Fernández, y Illera, 1999).

Las herramientas SIG son capaces de estudiar zonas o escenarios de paisajes multifuncionales con una gran cantidad, diversidad y complejidad de información, facilitando así la toma de decisión y la inversión óptima de recursos y actividades en diferentes proyectos de restauración (Veluk, 2012).

En este caso de estudio, la función de SIG utilizada es clasificación supervisada que se define como un proceso en el cual píxeles de identidad conocida (respuesta espectral), distribuidos dentro de áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar píxeles de identidad desconocida. Dando como resultado un conjunto de firmas espectrales o criterios estadísticos. (Fallas, 2016).

Es importante la validación del resultado dado por estas funciones de SIG, por lo cual uno de los métodos utilizados para determinar la aleatoriedad de los datos se utiliza el estadístico Kappa (K_{hat}), el cual mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado, y el que podría ser producto simplemente del azar. K_{hat} se calcula con la

fórmula (Abraira, 2001). Además, de las validaciones de campo y uso de matices de error.

$$K_{hat} = \frac{N * \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum (x_{i+} * x_{+i})}$$

Donde:

r: Número de filas en la matriz

x_{ii}: Suma de observaciones en la fila i, y columna i (los valores en la diagonal mayor).

x_{i+}: Total de observaciones en la fila i (el total en la fila i a la derecha de la matriz).

x_{+i}: Total de observaciones en la columna i (total en la columna i debajo de la matriz).

N: Número total de observaciones o puntos de control usados en la validación

Un valor de $K_{hat} = 1$ indica un total acuerdo entre la clasificación hecha en el mapa y la realidad, mientras que un valor de 0 sugiere que los acuerdos en la clasificación mostrados en la diagonal mayor son producto del azar, (Abraira, 2001).

Otra técnica indispensable para este estudio es la Evaluación Multicriterio, (EMC) la cual es un método utilizado para la priorización, este constituye un modelo de evaluación que afronta el problema de preferencia o selección entre un conjunto de alternativas reales, en presencia de criterios diversos, delimitados entre sí (Galacho y Ocaña, 2006).

Se fundamentan en la evaluación de un conjunto de alternativas basándose en una serie de criterios (Richters, 1986). Un método de EMC puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente una serie de alternativas a partir de criterios que hayamos considerado pertinentes en una evaluación (Pozzobon y Gutiérrez, 2003).

Para este caso se utilizó el proceso de EMC llamado Método de Sumatoria Lineal Ponderada este es utilizado ampliamente en el mundo debido a su simplicidad y utilidad en casos reales, (Lamelas, 2012). Consiste en la suma lineal del producto de los pesos ponderados de cada criterio por el valor asignado a las clases que lo integran (peso de cada atributo de la clase) (Oliveira, Morales, García, Jaimez, López, Estrada, y Campos, 2011).

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j p_{cij}$$

Donde:

R_i: es el nivel de adecuación de la alternativa i.

W_i: es el peso ponderado de cada criterio.

P_{cij}: es el valor asignado a las clases en cada criterio.

La combinación de Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio (SIG-EMC) tienen aplicaciones en la gestión de los recursos naturales; dentro de estos los recursos forestales constituyen un ámbito cuya gestión requiere la integración de datos referidos tanto a la realidad presente como a las previsiones futuras (Rodríguez, González y Arias, s.f.). Para el manejo y análisis de toda esta información estas técnicas son en la actualidad una herramienta imprescindible y de gran utilidad para la toma de decisiones respecto al manejo de los recursos en lo que respecta al análisis, modelización y predicciones para la toma de decisiones de gestión en el espacio y el tiempo (Sánchez et al.,1999). Además, permite diseñar modelos de adecuación óptima de diferentes usos y ocupaciones del suelo, combinar diferentes objetivos y criterios y disminuir los costos y el tiempo de la recolección de información, así como aumentar el detalle de la información de una zona en específico (Pozzobon y Gutiérrez, 2003).

Material y métodos

Descripción del sitio

La zona de estudio abarca distritos de los cantones de Cartago y Oreamuno los cuales corresponden a una parte importante del área de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno (CACO), la información de los distritos más relevantes se recopila en el Cuadro 1. Además, se presenta la Figura 2, la cual muestra la ubicación del área de estudio.

Cuadro 1. Información general del sitio de estudio, 2018.

Cantón	Coordenadas Geográficas	Distrito de estudio	Área (km ²)	Índice de desarrollo	Zonas de vida	Precipitación promedio (mm)	Temperatura promedio (°C)	Altitud promedio (msnm)	Actividades de la zona
Cartago	09°47'15" Latitud Norte y 83°55'41" Longitud Oeste	Tierra Blanca	12,79	67 (Medio)	Bosque húmedo Premontano (bh-P), Bosque húmedo	1400-2000	19,2	1435	Comercio, industria manufacturera, agricultura y ganadería
	09°43'57" Latitud Norte 83°54'51" Longitud Oeste	Llano Grande	29,81	62 (Medio)	Montano Bajo (bh-MB) y Bosque muy húmedo				
Oreamuno	09°43'57" Latitud Norte 83°54'51" Longitud Oeste	Cot Potrero Cerrado	15,06	65 (Medio)	Montano (bhm-M)				

Fuente: INEC, 2011; INDER, 2016.

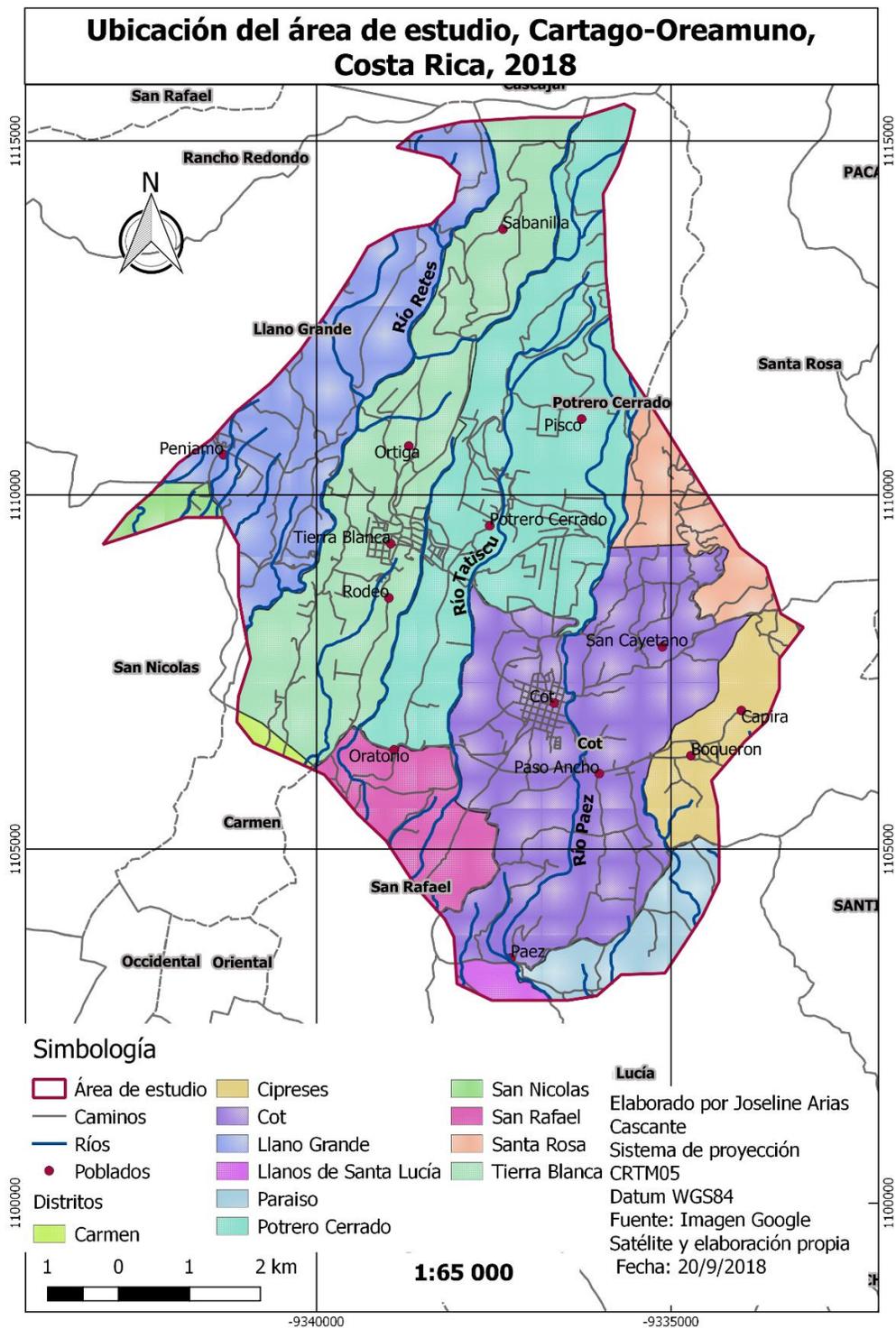


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio, Cartago, Costa Rica.

Recolección de datos en campo

Los datos recolectados en campo describen las características de cobertura encontradas en las zonas evaluadas; la información se recaudó utilizando el formulario que se muestra en el Anexo 1, y que se detalla a continuación:

- Punto de ubicación: este dato se obtuvo mediante el uso de un instrumento de posicionamiento global (GPS). Se tomó un punto en el borde de la cobertura cada vez esta fue diferente según las clases propuestas.
- Coordenadas X, Y: este dato es tomado como respaldo de los datos almacenados en el GPS.
- Distancia: este dato se tomó de forma que aproxima la distancia desde donde se tomó el punto con el GPS hasta el centro de la cobertura evaluada.
- Azimut: se produce una medida en grados la cual se ubica en dirección de la cobertura identificada, del mismo modo el dato se toma desde el dónde generó el punto con el GPS.
- Clase: se identifica la clase a la cual pertenece la cobertura, esta fue obtenidas al observar las coberturas en los puntos evaluados; y se hizo según el detalle que se muestra en el Cuadro 2.
- Observaciones: las observaciones describen características específicas de la cobertura evaluada o detalles en la ubicación del punto entre otras.

Clases de Cobertura

Las clases de cobertura utilizadas estuvieron basadas en la propuesta de Campos (2010), pero se modificaron según los fines del proyecto, estas describen a continuación en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción de las coberturas para la clasificación de la cuenca alta y media del río Reventazón, Costa Rica, 2010.

Cobertura	Descripción
Bosque	Cobertura vegetal conformada por especies con tallo y tronco leñoso; que se encuentran tanto en el bosque tropical lluvioso como el tropical seco. Entre esta categoría están incluidos bosque natural, bosque secundario y charral.
Cultivos	En esta clase están incluidos los cultivos anuales que presentan un ciclo vegetativo dura un año o menos y solo producen una cosecha durante ese periodo (ejemplo: papa, cebolla, etc.); y los cultivos permanentes cuyo ciclo vegetativo dura más de dos años y ofrecen durante este periodo más de dos cosechas (ejemplo: caña de azúcar, café. etc.).
Cuerpos de Agua	Se refiere a ríos, quebradas, Embalses y lagunas. (artificiales y naturales). Cuerpos de agua artificiales o naturales, estáticos o en movimiento.
Pasto	Formaciones vegetales compuestas por gramíneas que se consideran dominantes de hierbas y en ocasiones acompañadas con árboles y arbustos esparcidos; frecuentemente son dedicadas a la ganadería extensiva, pero en algunos casos no presenta ningún uso.
Cultivos confinados	Corresponde mayormente a helechos y algunos cultivos de flores de la zona, que se desarrolla en invernaderos o ambientes controlados.
Infraestructura	Es el fraccionamiento y habilitación de un terreno para fines urbanos, mediante la apertura de calles y provisión de servicios. Trazados de vías públicas y áreas a reservar para usos o servicios comunales.

Fuente: Adaptación a la metodología de Campos (2010).

Ruta para la toma de datos

El recorrido para la toma de datos se realizó en los distritos más representativos de la zona agrícola de Cartago los cuales son: Cot, Llano Grande, Tierra Blanca y Potrero Cerrado. Para la recolección de datos se crearon rutas a seguir con ayuda del software QGis 2.18.11 (Figura 3).

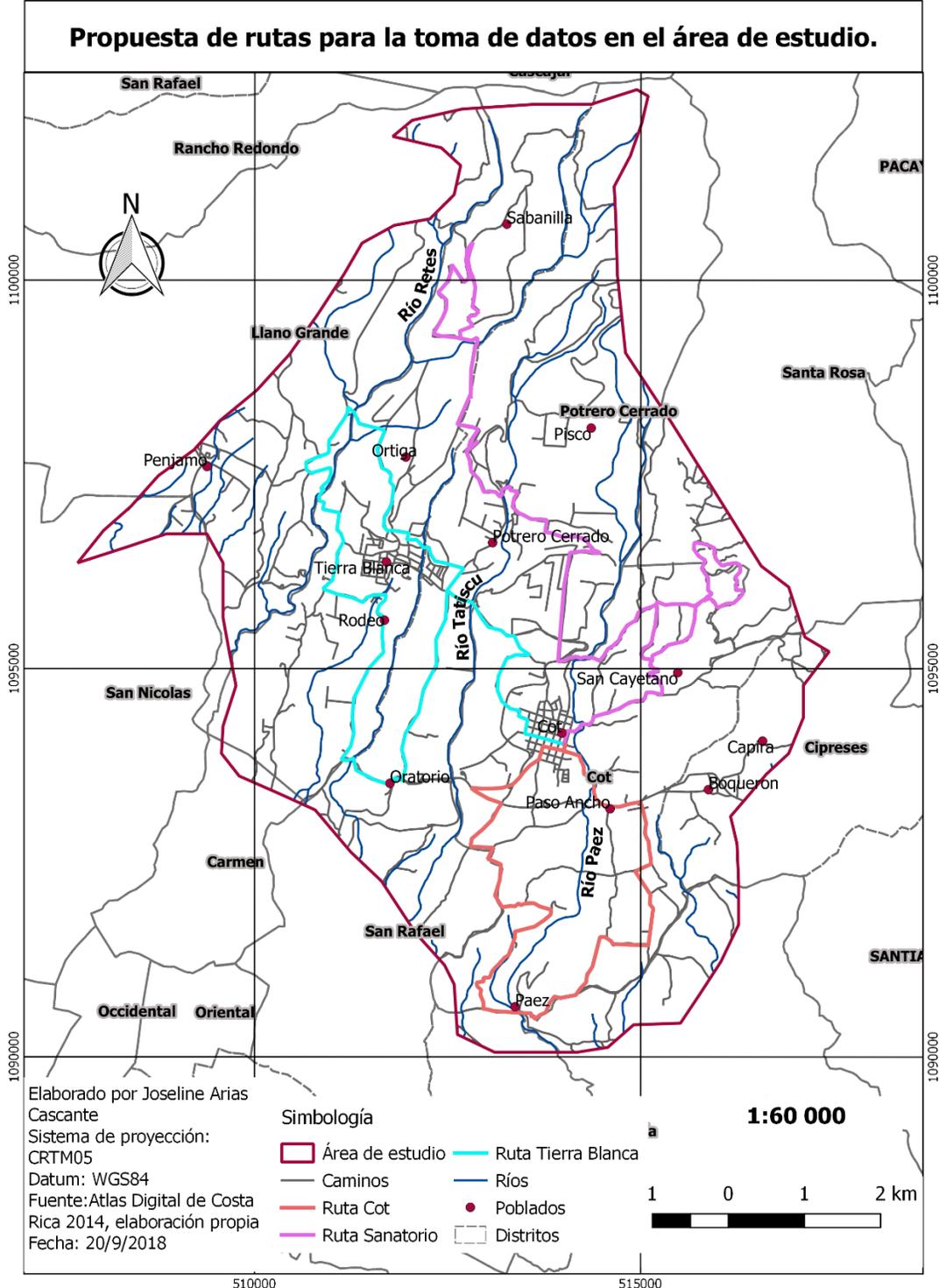


Figura 3. Propuesta de rutas para la toma de datos en campo.

Para esto se marcó un punto con el GPS cada kilómetro con ayuda de la aplicación Contador de kilómetros, donde se marcó un punto al inicio de la ruta y un punto cada kilómetro. Se recolectó la información correspondiente a las coberturas a los 50 m, 100 m y 150 m; en dirección perpendicular a la ruta y en sentidos opuestos, este diseño es el utilizado en la escuela de Ingeniería Forestal del ITCR (Figura 4).

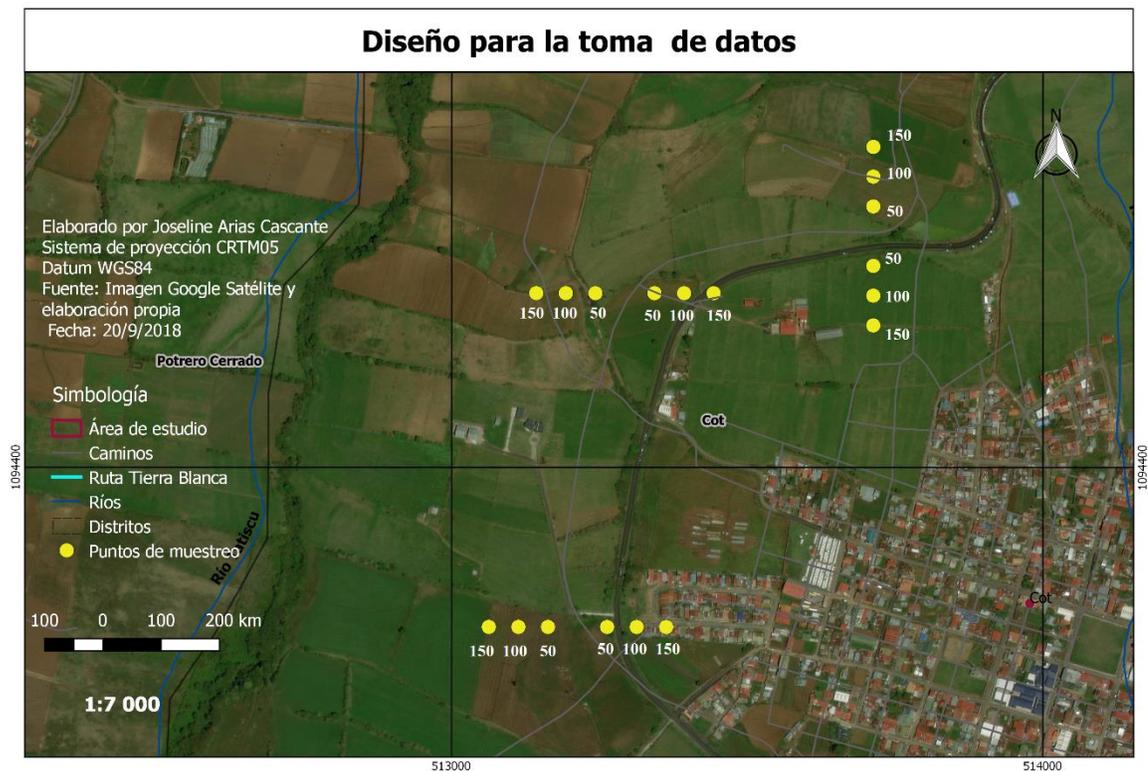


Figura 4. Diseño para la toma de datos.

Fase I: Clasificación de la cobertura

Clasificación de la cobertura del suelo

El proceso para la clasificación de la cobertura del suelo se realizó utilizando una imagen Sentinel-2 para el año 2018 (Anexo 2), la imagen fue obtenida de forma gratuita del portal web “Copernico” desarrollado por un equipo de la Unión Europea (ESA), y

se pre-proceso mediante el software QGis 2.18. 11 y el complemento SemiAutomatic classification. Luego se procedió a utilizar esta imagen en la clasificación de las coberturas mediante el software de ArcGIS 10.5.

Se realizó el preprocesamiento de la capa con los puntos de muestreo tomados en campo, esto consistió en la extracción del 30% de los puntos correspondientes a cada clase de cobertura evaluada, este proceso se realizó con el fin de utilizar estos puntos para la validación de la clasificación supervisada; los puntos restantes (70%) se utilizaron para crear la clasificación del uso actual la cual consta de tres pasos:

- a) Áreas de entrenamiento: Con ayuda de la imagen satelital para cada uno de los puntos del archivo de puntos de muestreo (70%) se dibujó un polígono alrededor del mismo para definir así las áreas de entrenamiento, creando un archivo en formato shape, con el sistema de proyección oficial (CRTM05). Cada polígono dibujado contenía pixeles con un patrón de colores lo más homogéneo posible.
- b) Creación de firmas espectrales: Con la información de las áreas de entrenamiento se creó el archivo de las firmas espectrales. Para lo cual se utilizó el software ArcGIS 10.5, para este proceso se debe verificar que la extensión análisis espacial este configurada una vez comprobado esto se empieza la creación de las firmas espectrales. En la ventana de crear firmas se seleccionó la imagen satelital a utilizar; además, en el campo de entidad de entrada se insertó el archivo de áreas de entrenamiento.
- c) Aplicación del algoritmo de clasificación supervisada: Una vez creada el archivo de firmas espectrales se procedió a aplicar el algoritmo de máxima verosimilitud para crear la clasificación se introdujo la imagen satelital y el archivo de firmas generado anteriormente, y se guardó el archivo de salida de clasificación.

Validación de la clasificación de la cobertura

Cuando se tuvo la clasificación de la cobertura se procedió a realizar la validación de esta, esto permitió demostrar que se creó una clasificación congruente con lo presente

en el campo, la validación de cobertura se realizó mediante dos métodos: comparación con los datos tomados en campo y el análisis de aleatoriedad de los datos.

Comparación con los datos tomados en campo

Para la comparación se utilizaron los datos de campo que se habían reservado anteriormente (30%), ya que estos datos son independientes de los utilizados en la clasificación. Esta comparación permite evaluar la clasificación con datos estadísticos y mayor exactitud.

El procedimiento consistió en construir una matriz de error o matriz de confusión. Se extrajeron los datos de la clasificación mediante la herramienta extraer valores de un archivo, al tener el archivo de validación y el archivo de la clasificación, se procedió a procesar la información con el software QGis 2.18.11, ejecutando una intersección ente ambos archivos. Esta información fue exportada al software Microsoft Excel 2016, para lograr obtener la matriz de error.

Para calcular la exactitud general de la clasificación se dividió el número total de puntos de verificación en la diagonal mayor entre el número total de puntos de control, es decir la suma de toda la diagonal mayor dividida entre el número total de puntos.

La exactitud del clasificador en cada clase se calculó dividiendo el número de puntos de control correctamente clasificado de la clase, entre el total de puntos de control en esa clase, o sea, el total en la columna.

La exactitud del usuario, por otro lado, se calculó dividiendo el número de puntos correctamente clasificados, entre el total puntos clasificados en esa clase, es decir el total en la fila para esa clase. Esta proporción midió la probabilidad de que un píxel clasificado en esa clase sea realmente de ese tipo en el campo.

Análisis de aleatoriedad de los datos.

Para calcular la aleatoriedad de los datos resultantes se utilizó el estadístico Kappa (K_{hat}), cuya fórmula se mencionó anteriormente.

Una vez validada la información obtenida se procedió a elaborar el mapa de uso actual para los distritos evaluados.

Fase II: Priorización de áreas a restaurar.

Para el proceso de la Evaluación Multicriterio (EM) se decidió replicar la metodología utilizada por Hernández (2016), adaptándola a el caso en estudio, la cual cuenta con cinco etapas principales que se muestran a continuación.

Selección de los criterios de priorización.

Se evaluaron las variables con mayor relación e importancia de acuerdo con las afectaciones que sufren las zonas desprovistas de cobertura en la zona de estudio, fueron establecidos los siguientes puntos para el proceso de determinación de áreas prioritarias o áreas a restaurar.

Cobertura vegetal: Esta variable permite identificar toda la cobertura (herbácea, arbustiva y arbórea) del sitio, y en que condición se encuentra actualmente; dar una idea de cómo esta vegetación puede intervenir en el funcionamiento natural de los ecosistemas aledaños y su capacidad para producir servicios ecosistémicos. La vegetación del sitio ha sido sumamente deteriorada por la expansión de la frontera agrícola, además de procesos como la erosión.

Capacidad de uso del suelo: Esta variable muestra la categorización de cada tipo de la tierra según su función de producción y sus condiciones físico-climáticas. Por lo cual si se requieren identificar zonas en las cuales la restauración debe ser prioridad esta variable ayuda como guía sobre manejo apropiado para la productividad máxima de

un sitio, para esto se utilizó la metodología oficial usada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, la cual es establecida a nivel nacional según Leyes y Decretos (1994).

Inclinación del terreno (topografía): La inclinación y la longitud de la pendiente son características del terreno que inciden en el comportamiento de los flujos de aguas, que dependiendo de la vegetación existente o no, pueden ser precursores de problemas de erosión; a mayor inclinación y longitud de pendiente suele existir una erosión más considerable. Al ser la zona de estudio una región agrícola el recurso suelo es de suma importancia para la realización de todas sus actividades productivas. La pendiente es un elemento que se debe evaluar ya que está relacionada directamente con la pérdida del horizonte fértil del suelo.

Cuerpos de agua: Se determinaron las zonas que presentan algún grado de amenaza que afecte la calidad del recurso hídrico, para el aprovechamiento por parte de los productores de la zona o las comunidades aledañas. Además esta variable sirve de control para saber si en la región se cumple con lo establecido en la Ley Forestal N° 7575, sobre áreas de protección en las riberas de los ríos.

Zonas de riesgo: Se identifican las zonas que presente un potencial riesgo geomorfológico o natural: deslizamiento, avalancha, inundaciones o erupción volcánica las cuales son las más representativas del área en estudio, y las que mayores consecuencias pueden tener sobre la población y la actividad agrícola.

Restricciones.

Después de haber determinado las variables de priorización se definieron las restricciones de la zona de estudio, es decir las áreas en las que no se podrá desarrollar la actividad de restauración propuesta.

1. Áreas bajo alguna categoría de manejo (parques nacionales, corredores biológicos, etc.).

2. Superficies muy pequeñas de terreno para el propósito de restauración (esto se refiere a áreas menores a 0,5 ha, ya que debido a sus dimensiones son excluidas porque esto implica que pequeños productores pierdan la actividad que les genera ingresos).
3. Infraestructura y carreteras.
4. Cobertura de bosque muy denso; ya que en estos parches al igual que en áreas ya manejadas los servicios ecosistémicos están siendo protegidos.

Asignación de valores

Para cada criterio se efectuó la asignación de un valor nominal de acuerdo con las siguientes consideraciones, criterio técnico y lógica por la clase de trabajo, como se muestra y detalla en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Asignación de valores nominales a las variables de estudio.

Variable	Valor o escala asignada	Justificación
Cobertura vegetal	0 = Infraestructura, Bosques o áreas protegidas 1 = Cultivos y pastos	Según el mapa de uso actual obtenido en este estudio, se asignan los valores de la columna anterior a las clases de uso presentes. Ya que lo que es infraestructura o áreas protegidas es muy difícil cambiar el uso se les asignó el valor de 0, mientras que los cultivos y pastos tienen el valor de 1 ya que estos pueden cambiar su uso actual en pro de la naturaleza según Ley de Biodiversidad N° 7788, y la Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos N° 7779, que habla sobre el cambio de uso y su procedimiento.
Capacidad de uso del suelo	0 = Clases I, II, III, IV y V 0,5 = Clases VI y VII 1 = Clases VIII y protección	Según el decreto N°23214 Metodología para la determinación de la capacidad de usos de las tierras en Costa Rica, y lo descrito en esa metodología sobre las clases de capacidad de uso se asignaron los valores de la columna anterior. Así las clases (I,II,III,IV y V) que son clases de uso agropecuario donde sus limitaciones son leves y se puede realizar cualquier actividad se le asigna un valor de 0, donde los usos de cultivos o pastos están permitidos; mientras que las clases VI y VII se les asignó un valor de 0,5 ya que estas clases presentan limitaciones moderadas o severas y uso se restringe a cultivos semipermanentes o manejo de bosque, en estas clases también se pueden practicar la siembra de cultivos anuales con control y uso adecuado de prácticas de conservación del suelo; por otro lado las clases VIII y protección se les asignó el valor de 1 ya que estos terrenos no permiten ninguna actividad más que la protección de los recursos, o sea las áreas con estas características que tienen otro tipo de uso deben ser protegidas.

Variable	Valor o escala asignada	Justificación
Cuerpos de agua	0 = Fuera del área de amortiguamiento 1 = Dentro del área de amortiguamiento	<p>Para este criterio como es establecido en la Ley Forestal N° 7575, artículo 33, se definen las áreas de protección según el cuerpo de agua presente en este caso para las quebradas o ríos con pendientes menores a 40% se definen 15 metros de protección mientras que las que superan el 40% de pendiente se les definen 50 metros de protección, a esta área de amortiguamiento se le asigno un valor de 1, ya que es lo que interesa proteger de la invasión de otros tipos de uso, se pretende que si hay áreas que no cumplen con lo establecido en la ley cambien su uso en pro del ambiente, mientras que las restantes ubicadas fuera se les destino un valor de 0, ya que estas se pueden destinar a otros usos según su clase de capacidad de uso.</p>
Inclinación del terreno	0 = Rango 0%-40% 0,5 = Rango 40%-50% 1 = Rango 50% y mayor	<p>Los rangos para esta variable se eligieron según dos criterios, el primero son las zonas de protección establecidas en la Ley Forestal N° 7575, que como se mencionó anteriormente define los rangos de inclinación del terreno para establecer zonas de protección en ríos y quebradas, el segundo criterio fue el decreto N°23214 Metodología para determinación de capacidad de usos de las tierras en Costa Rica que describe el porcentaje de inclinación aceptable en cada clase de capacidad de uso.</p>
Riesgo	0 = Amenaza baja 0,5 = Amenaza media 1 = Amenaza alta	<p>Por último, la selección de esta escala se basó en el mapa de amenazas naturales potenciales para los cantones de Cartago y Oreamuno elaborado en 2010 (CNE) y la capa de geomorfología (referida al Atlas Digital de Costa Rica 2014), la valoración consistió en el grado de amenaza potencial, si presentaba una amenaza baja (ejemplo amenaza volcánica baja se le asignó un 0, mientras que si la amenaza era moderada o media (ejemplo alta amenaza volcánica o avalancha) se le asignó un valor de 0,5; mientras que si era un riesgo ya identificado y recurrente (ejemplo deslizamientos) se les asigno un valor de 1.</p>

Asignación de pesos por criterio de los expertos y productores.

Para poder aplicar el método de sumatoria lineal ponderada, es necesario conocer el grado de importancia entre las variables a considerar en la priorización, en este estudio se propuso que estos valores fueran determinados mediante el criterio experto de profesionales de diferentes instituciones y productores como: Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Comisión para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Reventazón, el Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, el Corredor Biológico Cubri Sura, la Junta de Desarrollo de Cot y el criterio de productores de la zona.

Para tal efecto se solicitó a 15 expertos de las instituciones mencionadas anteriormente, completar la matriz de priorización de Saaty (Anexo 3), la cual permitió valorar las siguientes relaciones e interdependencias entre las variables, para sí obtener los valores ponderados para cada variable.

Para determinar los valores se aplicó la escala de Saaty de acuerdo con los parámetros de intensidad (Anexo 4). Esta herramienta fue propuesta para establecer las importancia o preferencia de criterios en la matriz de comparaciones pares; el objetivo fue identificar homogeneidad y cierto grado de certeza entre las comparaciones.

Una vez obtenidos los datos de los consultados se procedió a analizarlos en el programa Microsoft Excel 2016, para normalizar los datos y obtener un vector de priorización que indique cual es la variable más significativa según el criterio de los expertos.

Procesamiento de información en Sistemas de Información Geográfica.

El cálculo para la priorización de las áreas a restaurar en la zona de estudio se realizó utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el caso en estudio se utilizó el software QGis 2.18.11 y ArcGIS 10.5; además del apoyo de programas para el manejo de datos Microsoft Excel 2016.

Una vez definida área de estudio se identificó la información geográfica existente y necesaria para el estudio, entre la que se encuentra:

- Mapa de cobertura obtenido en este estudio.
- Mapa de capacidad de uso del suelo.
- Mapa de curvas de pendiente.
- Mapa de cuerpos de agua.
- Mapa de zonas de riesgo.

Seguidamente, en la Figura 5, se presenta un diagrama que describe de forma gráfica y secuencial el proceso mediante el cual se obtuvieron los diferentes resultados que permitieron determinar el mapa de áreas a restaurar.

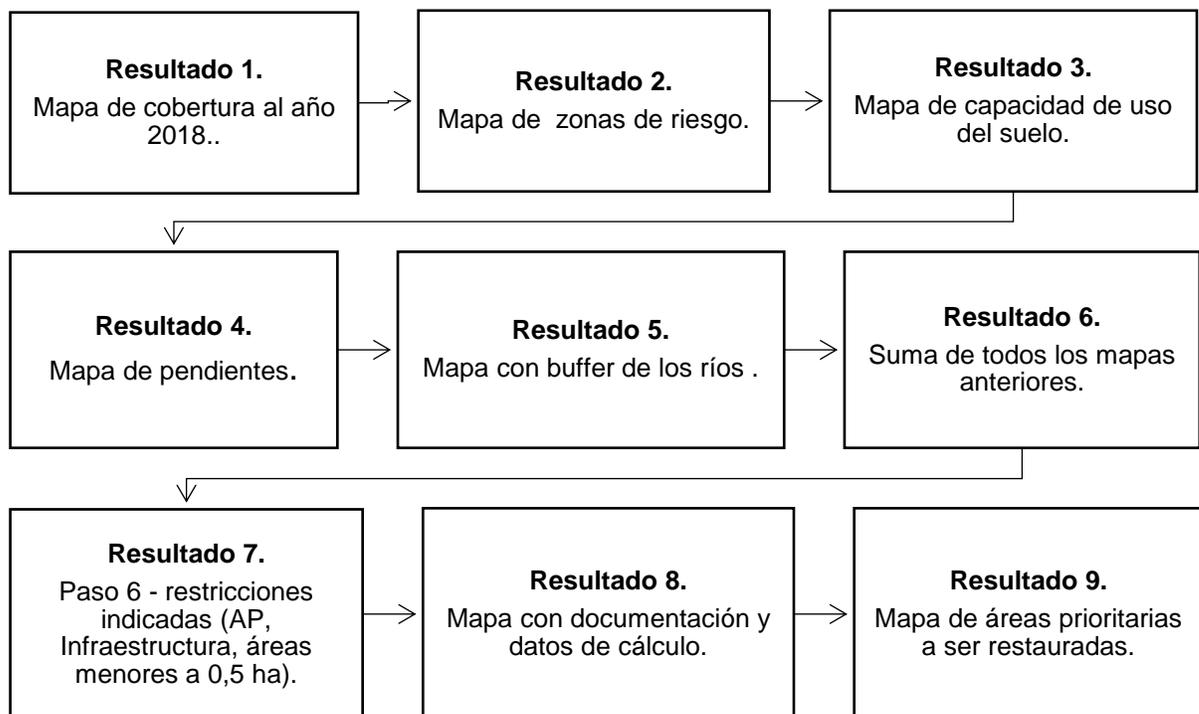


Figura 5. Diagrama del proceso de trabajo en Sistemas de Información Geográfica, para la priorización de áreas a restaurar.

Una vez obtenido el mapa con la documentación y cálculos (resultado 8), se procedió a establecer las zonas prioritarias según la siguiente escala (Cuadro 4), los valores obtenidos en la priorización se agruparon estadísticamente en tres categorías mediante el programa estadístico IBM SPSS Statistics 25, para que así estas fueran representativas.

Cuadro 4. Escala de priorización.

Pesos	Prioridad	Valores obtenidos en los cálculos
	Alta	< 0,78
	Media	< 0,48
	Baja	< 0,17

El resultado final fue un mapa con las zonas prioritarias a restaurar con las áreas y su priorización y las restricciones indicadas.

Fase III: Plan de restauración

No existen recetas para restaurar un ecosistema, ya que cada sitio es único y particular, pero si existen recomendaciones generales que se han creado de la experiencia acumulada como por ejemplo las expuestas por Vargas (2007), que presenta estrategias generales que pueden servir en diferentes ecosistemas del mundo. En su trabajo Vargas, da una guía de trece pasos para lograr una restauración ecológica, estos pasos se modificaron para utilizar los más aplicables al proyecto de restauración planteado, ya que esta es una primera fase de diagnóstico, y en ella no se evalúa ejecución y monitoreo. El desarrollo del plan o proyecto de restauración aquí propuesto se basó en estas indicaciones. En la Figura 6, se presentan los pasos generales a seguir estos no necesariamente se deben aplicar en el orden presentado, pero todos son importantes; también seguidamente se detallan los pasos y su aplicación en el proyecto.

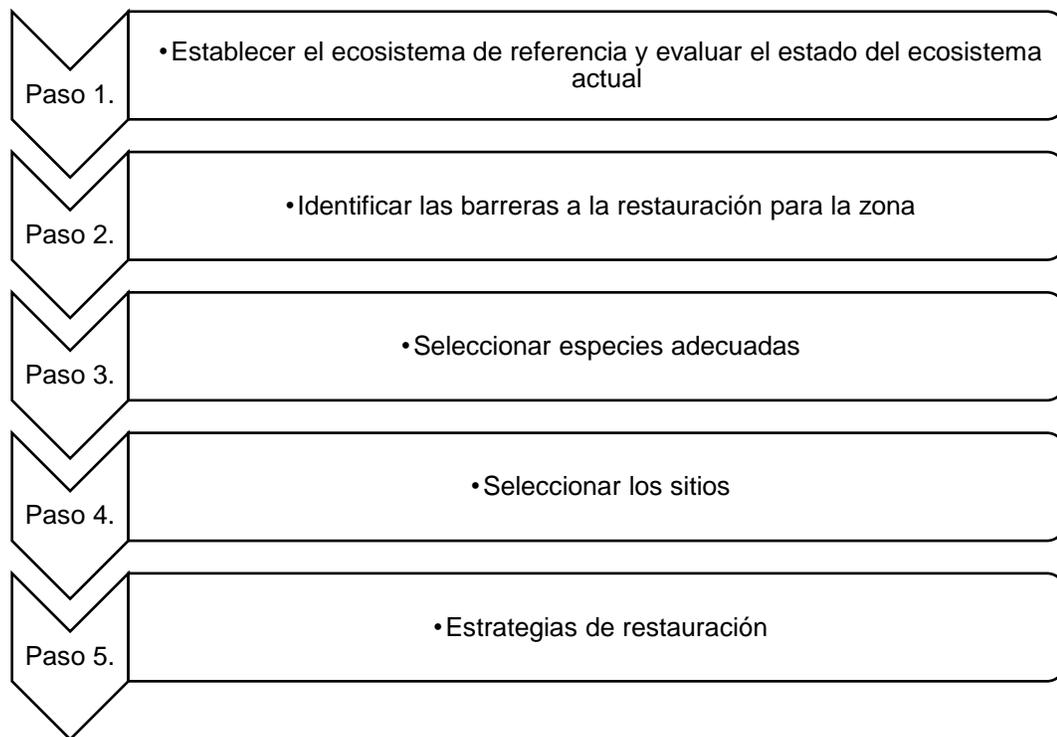


Figura 6. Secuencia y relaciones de los pasos fundamentales en la restauración ecológica, aplicados en la zona de estudio.

Resultados y Discusión.

Obtención de la información cartográfica existente y su procesamiento en Sistemas de Información Geográfica.

Capacidad de uso.

Se utilizó el mapa de capacidad de uso de las tierras forestales (Fundación Neotrópica, CCT; 1:50 000). Este producto fue elaborado por el Centro Científico Tropical y la Fundación Neotrópica en 1996 para el Ministerio de Agricultura y Ganadería, este divide el territorio nacional en zonas de uso agropecuario y zonas de uso forestal; el motivo de utilizar este mapa es debido al énfasis que tiene la cobertura forestal (Berstch, 2004). En la Figura 7, se puede apreciar la capa capacidad de uso para la zona de estudio.

La tabla de atributos de esta capa fue modificada en el software Qgis 2.18.11, para obtener las variables de interés las cuales se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Columnas propuestas para la capa de capacidad de uso.

CAPUSO	CODEUSO	NOMBRE_TIP	CAP_USO
En esta columna se detallan las unidades de manejo, que indican el o los factores específicos que limitan su utilización en actividades agropecuarias o forestales.	En este apartado se definen las clases de capacidad de uso. Grupos de tierra que presentan condiciones similares en el grado de limitaciones y riesgo de deterioro.	En esta línea se aclara el nombre específico de la clase de capacidad de uso recomendada.	En esta columna se especifican los valores unitarios propuestos para la priorización, definidos anteriormente para cada clase.

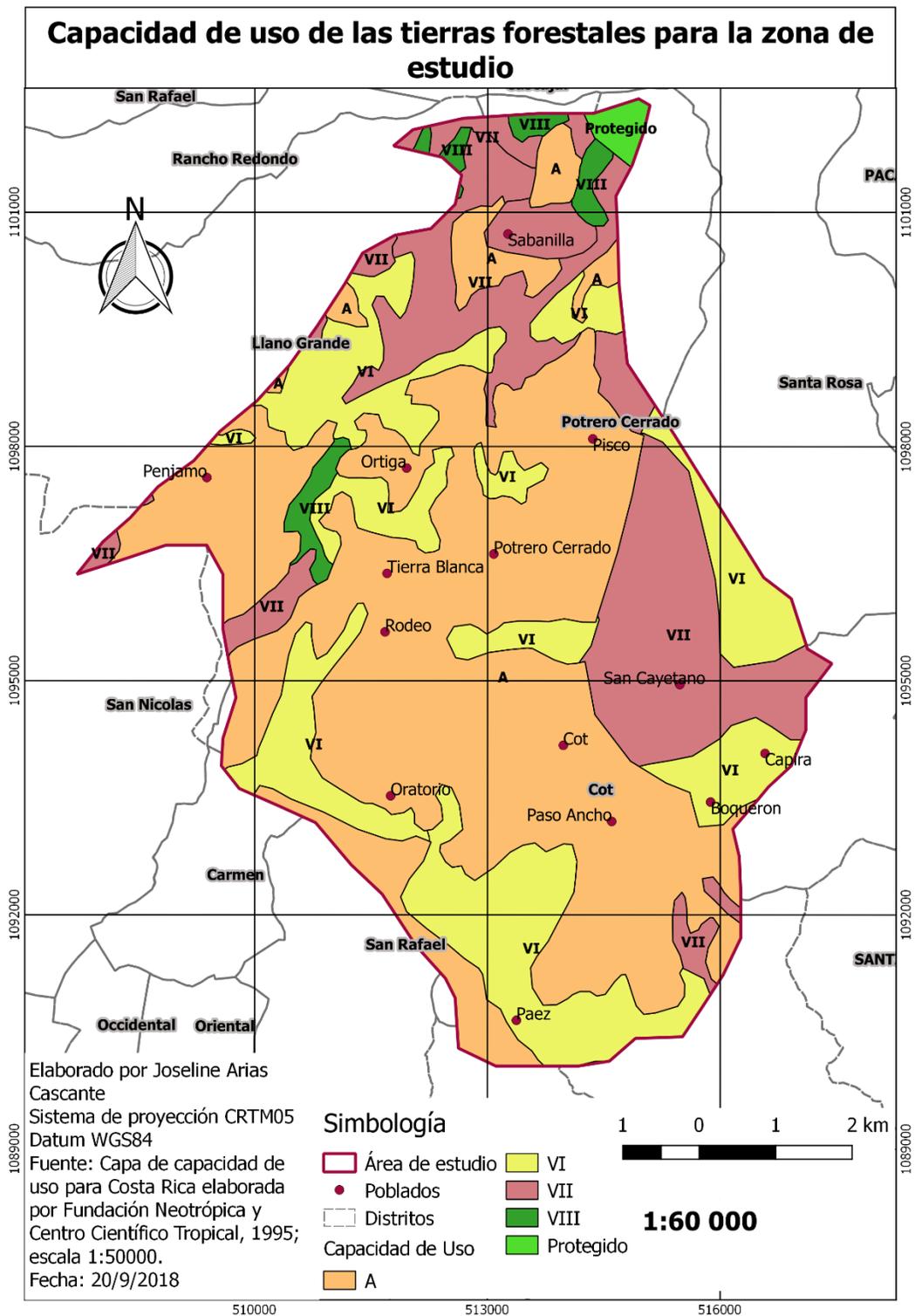


Figura 7. Mapa de capacidad de uso de las tierras forestales para la zona en estudio.

En la Figura 8, se presenta la distribución porcentual de la capacidad de uso de la tierra, que se dividen en uso agropecuario (clases I, II, III, IV, V) que representa un 51% del área, a estos polígonos se les asignó un valor de 0, reforestación/cultivos permanentes (clase VI) con 25% y manejo de bosque/regeneración (clase VII) refleja un 21%, a estas clases se les asignó un valor de 0,5; mientras que protección absoluta (clase VIII) representa un 1% y áreas protegidas un 2%, y a ambas se les asignó el valor de 1.

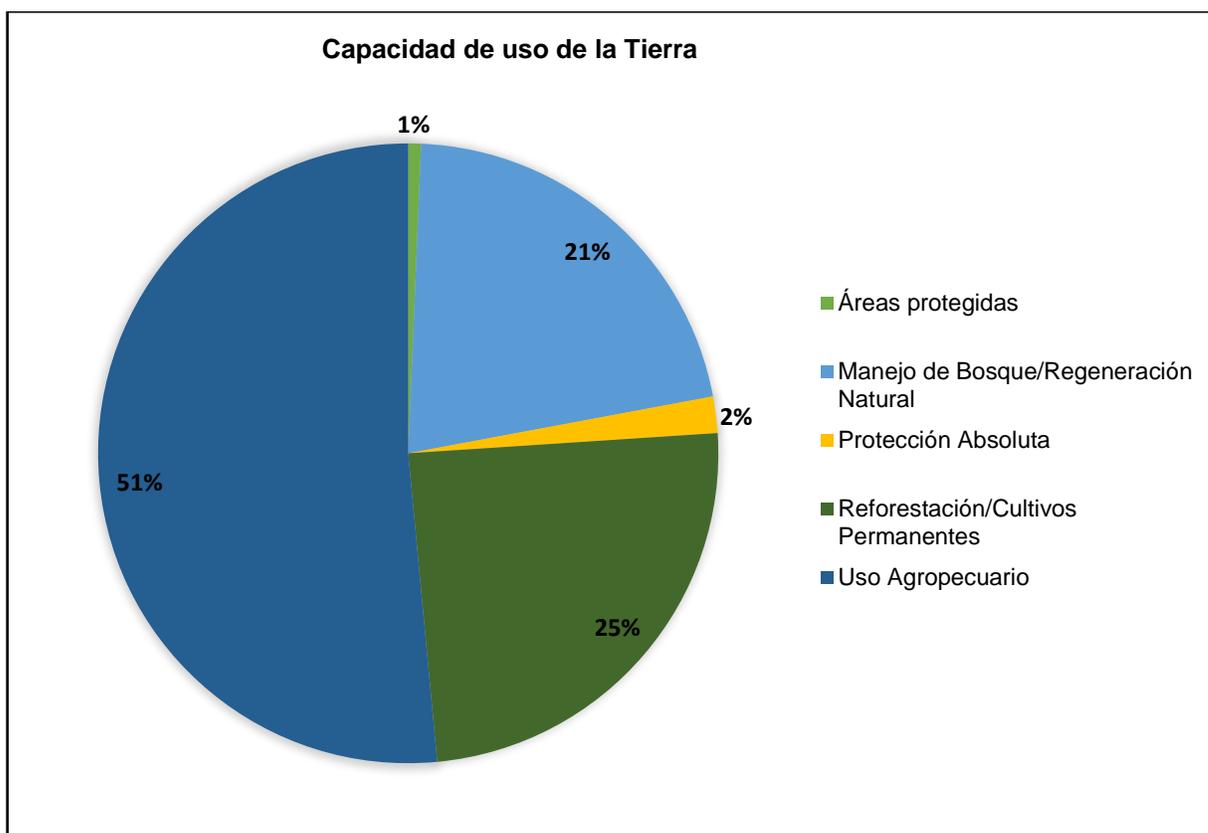


Figura 8. Distribución porcentual de la capacidad de uso de la tierra para el área de estudio.

Al ser el área de estudio una región meramente agrícola la variable de capacidad de uso es de sumo valor para lograr un manejo de los recursos según aptitud para su utilización productiva, ya que el sobreuso puede causar afectaciones como la erosión,

degradación de las tierras, además de influir en el ciclo hidrológico; lo cual puede dañar la calidad de agua y flujo de nutrientes para los cultivos.

Inclinación del terreno.

Primeramente, se identificó que existía el recurso de una capa del Modelo de Elevación, el cual presenta el relieve de Costa Rica en formato ráster con una resolución de 30x30 metros (referido al Proyecto Atlas Digital de Costa Rica, 2014); utilizando el software ArcGis 10.5, mediante la herramienta “pendiente” se extrajeron los valores correspondientes a esta variable para el área en estudio, esta capa se guardó en formato vectorial para poder editar sus valores.

Una vez en formato vectorial se procedió a reclasificar los valores de pendientes obtenidos en 3 categorías: 0% a 40% para asignarles el valor de priorización 0, de 40% a 50% que se les asignó un valor de 0,5, y las superiores a 50% se les asignó un valor de 1. Estos valores dados en las categorías responden a lo dispuesto en la Ley forestal N° 7575, artículo 33, que dispone los valores mínimos de inclinación del terreno para la creación de áreas de protección en las riberas de los ríos y a lo establecido en el Decreto N° 23214-MAG-MIRENEM: metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica, la cual establece en sus parámetros de evaluación de capacidad de uso de las tierras que la recomendación de rango de pendiente para uso agropecuario y de reforestación/cultivos permanentes es de 0% a 50%, mientras que las clases dedicadas a bosque o protección absoluta se recomiendan valores superiores a 50% de pendiente (Leyes y Decretos, 1994). La capa final se muestra en la Figura 9.

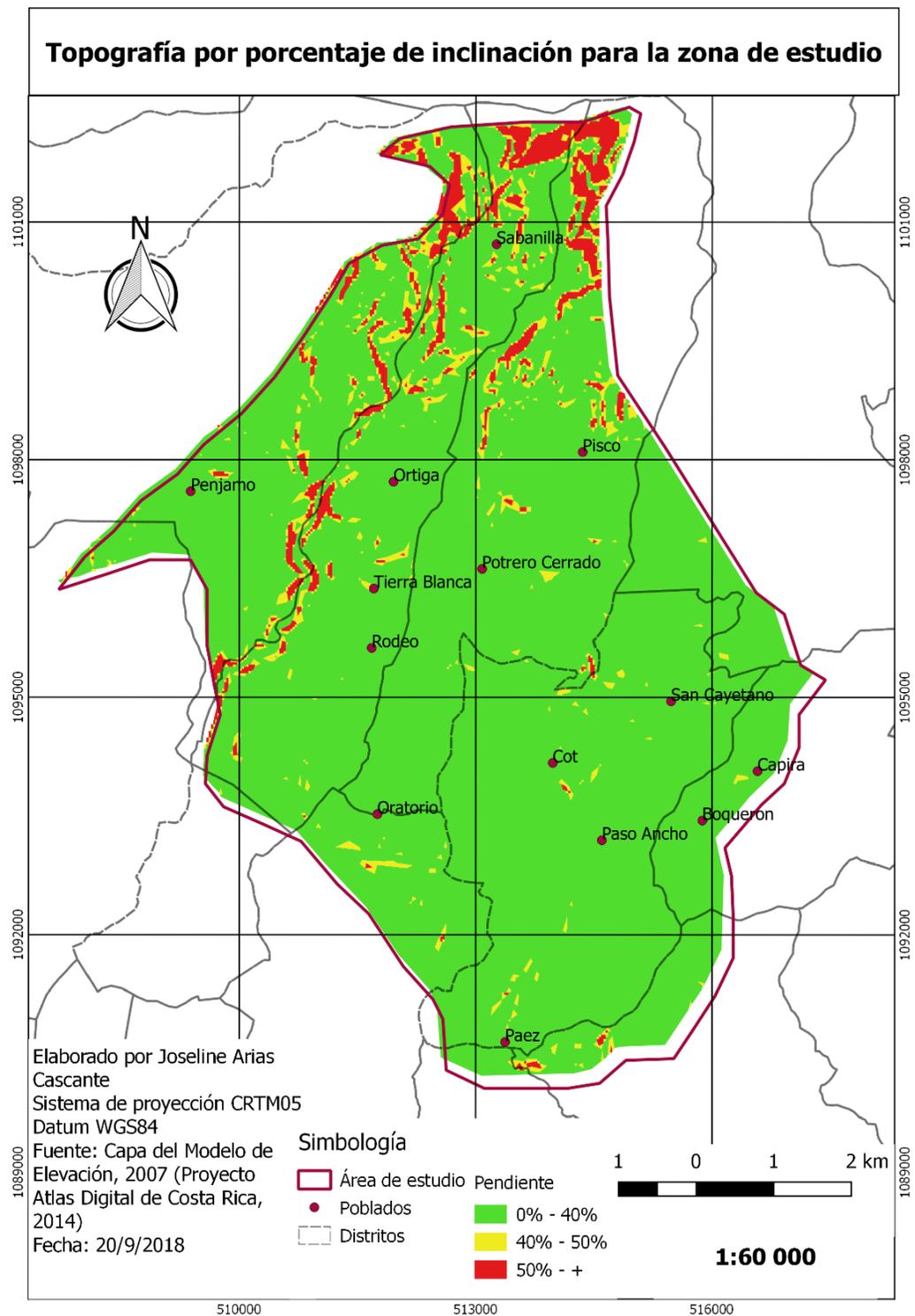


Figura 9. Mapa de topografía para la zona de estudio por porcentajes de inclinación.

Después de definir los parámetros de pendiente, se modificó la tabla de atributos en el software Qgis 2.18.11, para obtener las variables de interés las cuales se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Columnas propuestas para la capa de pendiente.

CLASS_PEND	PENDIENTE
Esta columna se define las categorías o rangos de inclinación de la pendiente.	En esta columna se definen los valores unitarios propuestos para la priorización según grado de inclinación de la pendiente.

Cuerpos de Agua.

Algunos de los ríos y quebradas presentes en la zona de estudio son: Río Reventado, Río Toyogres, Río Taras y Quebrada Arriaz Ríos que son monitoreados por instituciones debido a su vulnerabilidad a causa de la deforestación de las cuencas y la invasión de asentamientos humanos (CNE, 2010).

Es importante el disponer de zonas de protección como está establecido en la Ley Forestal N° 7575, artículo 33, se definen las áreas de protección según el cuerpo de agua presente en este caso para las quebradas o ríos con pendientes menores a 40% se definen 15 metros de protección mientras que las que superan el 40% de pendiente se les definen 50 metros de protección, a esta área de amortiguamiento se le asigno un valor de 1 y las restantes ubicadas fuera se les destino un valor de 0.

Por lo cual se seleccionaron los ríos presentes en el área de estudio de la capa encontrada en el Atlas Digital de Costa Rica elaborada por la ingeniera Casia Montoya (2008), y se les genero un buffer o zona de amortiguamiento según la pendiente en la que se encuentran, teniendo así zonas de amortiguamiento de 15 m o 50 m. La capa final se muestra en la Figura 10.

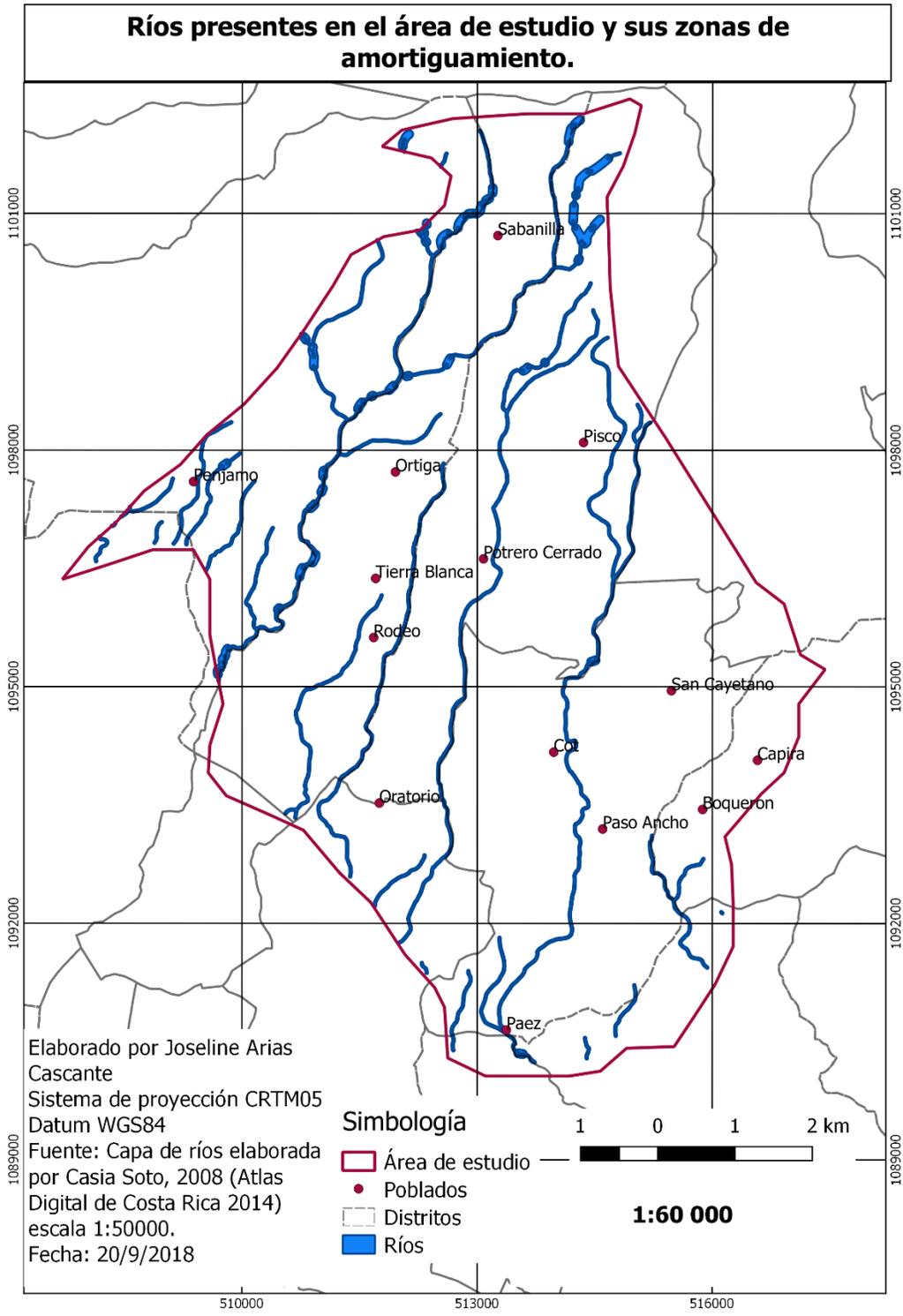


Figura 10. Mapa de cuerpos de agua para la zona en estudio.

Posteriormente se modificó la tabla de atributos para tener la información de interés como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Columnas propuestas para la capa de ríos.

NOMBRE	CATEGORÍA	RÍO
Esta columna se refiere al nombre del río.	En esta columna se especifica el tipo de río.	En esta columna se definen los valores unitarios propuestos para la priorización según el área de protección asignada al río.

Riesgo.

El factor riesgo es de suma importancia en la zona ya que esta presenta alta probabilidad de deslizamientos lo cual podrían afectar las actividades productivas y los asentamientos humanos cercanos. Se identificó que la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias Dirección de Gestión de Desastres elaboró un mapa de amenazas naturales potenciales para los cantones de Cartago y Oreamuno en el año 2010, además en el Atlas Digital de Costa Rica se encuentra la capa de geomorfología para la zona (referida al Proyecto Atlas Digital de Costa Rica, 2014).

La información proporcionada por la Comisión Nacional de Emergencias se encontraban en archivos de imagen por lo que se procedió a digitalizar la información y se unió a la capa de geomorfología del Atlas Digital de Costa Rica, 2014, a las áreas que presentaran coincidencia entre la información de estas capas (deslizamientos ya identificados o riesgo a estos) se les asignó un valor de 1, a las zonas que presentaron riesgo alto de erupción volcánica o avalancha de se les asignó un valor de 0,5, mientras que las que presenta una baja amenaza volcánica se les asignó un valor de 0. La capa obtenida finalmente se muestra en la Figura 11.

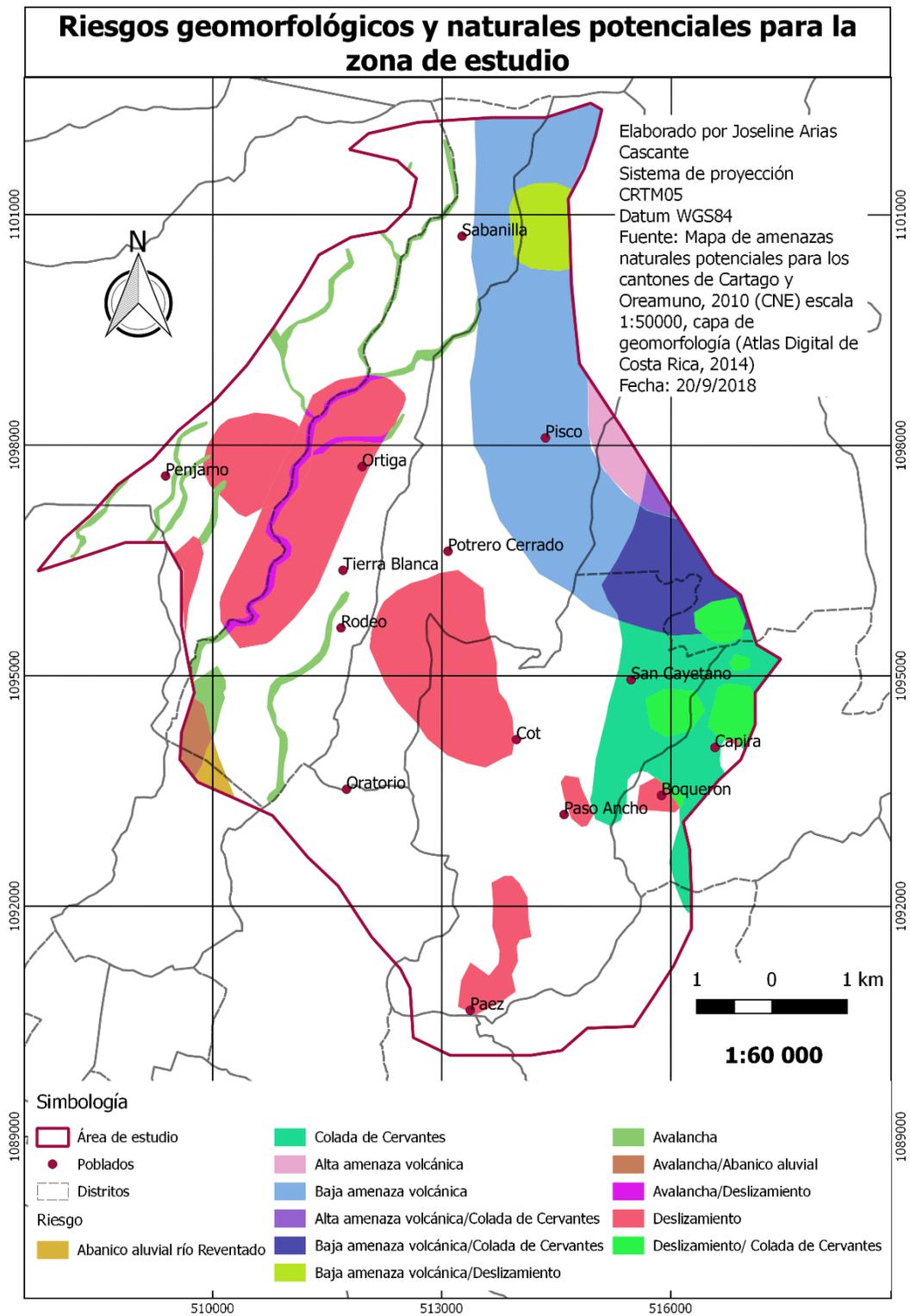


Figura 11. Mapa de riesgos potenciales para el área de estudio.

Posteriormente, se modificó la tabla de atributos para tener la información de interés como se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Columnas propuestas para la capa de riesgo.

RIESGO	RIESGO1
Presenta la explicación del tipo de riesgo presente en el área.	En esta columna se definen los valores unitarios propuestos para la priorización según grado de riesgo.

Uso Actual.

Para la obtención de esta información se realizó trabajo de campo y procesamiento de imágenes satelitales de estos procesos se obtuvo: el análisis de la imagen (clasificación), la validación de la clasificación y la capa de uso actual del suelo; resultados que se detallan a continuación.

Análisis de imágenes satelitales.

La clasificación que se realizó arrojó resultados congruentes con la cobertura y uso de la tierra observada en la zona. Como producto de esta clasificación se puede notar que la clase con mayor cobertura vegetal es pastos con un 36,50%, seguido de bosque que representa un 30,62%, mientras que las clases de cultivos, urbano y cultivos confinados representan el 24,49%, 4,96% y 3,41% respectivamente (Figura 12). La cobertura de bosque se ve presente en la parte norte del área de estudio disminuyendo su extensión cerca de los centros de población, mientras que el resto de la zona presenta actividad productiva agrícola o pecuaria.

Uso del suelo al 2018, para la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, Imagen Sentinel 2.

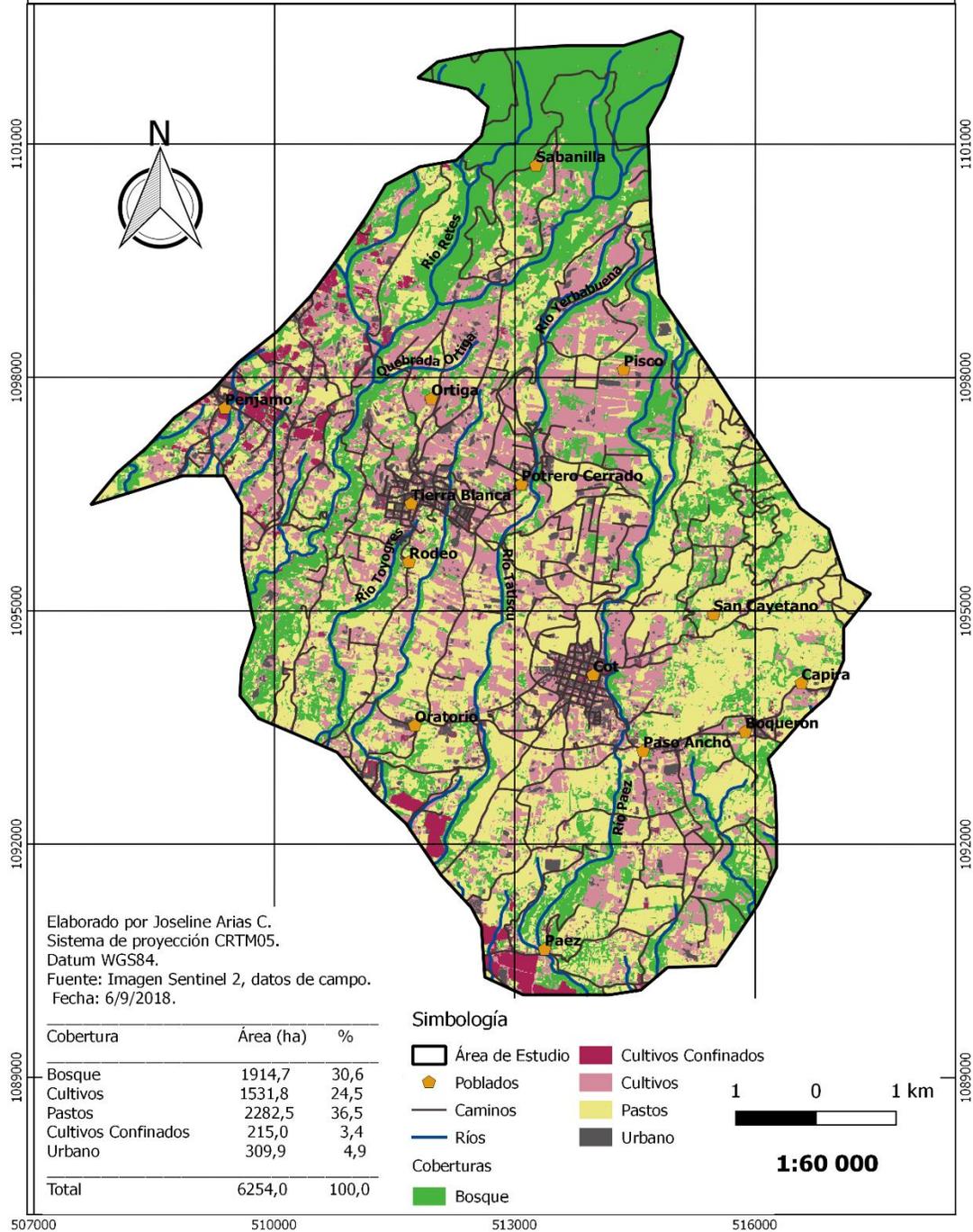


Figura 12. Uso del suelo al 2018, para la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, imagen Sentinel-2.

Validación de la clasificación.

La matriz de error obtenida en la clasificación se muestra en el Cuadro 9, esta es una tabla de doble entrada en la cual se colocan las diferentes clases evaluadas en las filas y columnas, la diagonal expresa el número de coincidencias obtenidas entre la clasificación y la realidad, como se puede observar la cobertura con mayor separabilidad con respecto a las demás son Cultivos confinados con 85,7%; seguida de bosque con un 85%.

Como se puede observar en el Cuadro 9, se presenta una confusión entre cultivos y pastos dado que algunos de los puntos muestreados 29 para pastos son identificados como cultivos y 10 de pastos son identificados como cultivos, según la Agencia Europea (2009) esto se puede deber a la reflectancia de las firmas espectrales (longitud de onda) ya que estos tipos de uso son muy similares lo cual produce que no haya una buena separabilidad entre estos.

Cuadro 9. Matriz de error de la clasificación supervisada realizada para la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, 2018.

Variable	Bosque	Cultivos confinados	Cultivos	Pastos	Urbano	Total general
Bosque	51		1	3		55
Cultivos confinados		18			4	22
Cultivos	7		85	29	5	126
Pastos	6		10	99	1	116
Urbano		3	3	1	33	40
Total general	64	21	99	132	43	359

Se calculo la exactitud de la clasificación esta medida relaciona los elementos evaluados con aciertos del total de observaciones, para el presente trabajo se obtuvo una exactitud total del 80%, este valor se considera confiable, y es comparable con lo obtenido por otros autores como Vargas (2017) la cual obtuvo un 80,6%, por otro lado Campos (2010) el cual obtuvo un valor de 91%, ambos autores trabajaron en la misma

cuenca en la que se encuentra el área de estudio. Por otro lado, Méndez (2001) obtuvo un valor de 57%, en su trabajo en el cual analiza el tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, mientras que en estudios de bosques secundarios en la Zona Norte, Coronado (2001), obtuvo valores entre los 82% y 90% (teniendo en cuenta que este trabajo en tres diferentes zonas de estudio en Zona 1: 82%, Zona 2: 90% y Zona 3: 90%).

Del mismo modo se calculó la exactitud del productor y la exactitud del usuario que arrojaron valores entre 75%-86% y 67%-93% respectivamente; para estudios realizados en la misma zona Campos (2010) obtiene valores entre 81% a 100% para la exactitud del usuario y la exactitud del productor, y aunque las clases utilizadas en el presente trabajo se hayan basado en las descritas por Campos en su trabajo se debe hacer mención que el posee un total de 17 clases diferenciadas, mientras que este trabajo posee un total de 5 “macroclases” que podrían generar error a la hora de la clasificación y disminuir los valores de exactitud, ya que como se mencionó anteriormente la separabilidad de las clase está en función de su longitud de onda y algunas clases como cultivos y pastos suelen confundirse. Por otro lado, Vargas (2017) habla sobre la exactitud de la clasificación de bosque y no bosque obteniendo valores de 90,6% y 98,8%, respectivamente.

Los valores de estos estadísticos se encuentran en el Cuadro 10; donde se observa la clase bosque es la que tiene mayor exactitud seguida de la clase cultivos confinados.

Cuadro 10. Valores de exactitud logrados con la clasificación realizada para la zona de estudio, Cartago, Costa Rica, 2018.

Variable	Exactitud del clasificador (%)	Exactitud del usuario (%)
Bosque	0,80	0,93
Cultivos confinados	0,86	0,82
Cultivos	0,86	0,67
Pastos	0,75	0,85

Variable	Exactitud del clasificador (%)	Exactitud del usuario (%)
Urbano	0,77	0,83

Del mismo modo se calculó el estadístico Kappa el cual representa la proporción de coincidencias obtenidas en un producto eliminando aquel producto del azar, es una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con el software y la exactitud de lograr una clasificación correcta con una clasificación visual.

Al calcular el estadístico Kappa se obtuvo un valor de 0,73 el cual es un valor considerable como se menciona en el Cuadro 11, este resultado de Kappa es comparable con los valores obtenidos por Vargas (2017), la cual obtuvo un valor de 0,69 en su estudio realizado en la cuenca alta del río Reventazón que coincide con el área del presente estudio, otro autor que realizó análisis en los cambios de cobertura en la cuenca alta y media de este mismo río fue Campos (2010) el cual obtuvo un valor de 0,90 superior a los ya mencionados. Por otra parte, autores como Fonseca, Chaves y Rey (2010) en un estudio realizado sobre cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de país obtuvieron valores entre 0,38 y 0,39, mientras que Dedios (2006) en su trabajo obtiene un valor de 0,43. Como se puede notar el valor de Kappa obtenido es comparable al de otros trabajos realizados en la zona.

Cuadro 11. Escala de interpretación para el coeficiente Kappa.

Coeficiente de Kappa	Fuerza de concordancia
<0,00	Pobre
0,00 - 0,20	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Considerable
0,81 – 1,00	Casi perfecta

Capa de uso actual del suelo.

Una vez obtenida la capa de uso actual del suelo y validada su clasificación se procedió a editar su tabla de atributos como se muestra en el Cuadro 12, para así obtener la información de relevancia.

Cuadro 12. Columnas propuestas para la capa uso actual.

CLASSNAME	USO_ACT	AREA (HA)
En esta columna se especifica el nombre del tipo de cobertura encontrada.	En esta columna se definen los valores unitarios propuestos para la priorización según tipo de cobertura.	En esta columna se presenta el cálculo del área en hectáreas para los polígonos resultantes.

Productos obtenidos de la asignación de pesos según expertos

Debido a la complejidad de la matriz y su grado técnico el documento de evaluación de campo se modificó para que su comprensión fuera más sencilla para las personas que fueron consultadas (Anexo 5), esta consistió en indicar que variable se prefiere comparando pares y asignarle un valor a la misma según la escala indicada, al igual la escala se modificó con valores de 1 a 5 para que su visualización fuera más asequible (Anexo 6).

La asignación de pesos alcanzada por medio del criterio de 15 expertos (productores, líderes comunales, ingenieros forestales, gestores ambientales e ingenieros agrónomos, etc.) permitió generar la matriz y priorización las variables evaluadas. El orden fue basado según el puntaje ponderado que se obtuvo para cada criterio, a mayor puntaje obtenido mayor prioridad respecto a las otras variables. Como se puede observar en el Cuadro 13, las variables riesgo y cuerpos de agua obtuvieron el mismo puntaje con un 0,22 lo cual muestra la importancia de estas variables para la zona, mientras que las variables capacidad de uso, pendiente y cobertura vegetal son consideradas las menos preferentes con valores de 0,20, 0,19 y 0,17 respectivamente.

Cuadro 13. Matriz de priorización para la restauración ecológica en las zonas de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, 2018.

Variables	Cobertura Vegetal	Capacidad de Uso	Cuerpos de Agua	Riesgo	Inclinación del terreno	Suma	Valor de Preferencia
Cobertura Vegetal	1,00	3,12	2,80	1,99	2,51	11,42	0,17
Capacidad de Uso	2,73	1,00	3,47	2,80	3,06	13,05	0,2
Cuerpos de Agua	3,29	3,10	1,00	3,05	4,11	14,55	0,22
Riesgo	3,49	3,57	3,37	1,00	3,12	14,55	0,22
Inclinación del terreno	3,09	2,67	2,12	3,86	1,00	12,73	0,19
							1

Se puede interpretar que la selección de las variables con mayor valor de priorización se debe a la actividad agrícola desarrollada en la zona la importancia de los cuerpos de agua se basa en el interés del uso de esta para el riego de cultivos y abastecimiento del consumo humano, pero lamentablemente se presenta deterioro en los cauces de los ríos como el determinado por el equipo de investigadores de ProDUS (2016) que detecto deforestación en zonas de protección de causes y nacientes, en muchos casos invadidas por pastizales y cultivos. Además, en el estudio realizado por Varga (2017) evalúa el índice de calidad ripiara que determina el estado actual de los ríos de la zona en este se determinó que las quebradas Coyote, Ortiga, Rodeo, Arriaz y el río Chinchilla cuentan con cobertura vegetal inferior al 30% colocándolos en categorías de “pobre” y “muy pobre”; además se dice que en las riberas a partir de calidad “regular” se vuelve necesaria la restauración ecológica del sitio debido a la gran vulnerabilidad ambiental que presentan, sumado a esto se exhibe alta contaminación por residuos sólidos, químicos y materias fecal producto de la explotación de las

comunidades aledañas (Vargas, 2017). Debido a esta problemática se pierde capacidad productiva en la zona y servicios ecosistémicos, así como hábitat para diferentes especies de flora y fauna.

Por otro lado el factor riesgo es considerado debido a las referencias históricas de la zona en cuanto a amenaza de desastres naturales, entre las que destacan las inundaciones, sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos y avalanchas, entre otros. El crecimiento de la población, unido al uso, intervención y explotación del espacio comprenden factores fundamentales en la potenciación de peligros naturales y geomorfológicos, así como el incremento de la vulnerabilidad de las poblaciones que cada vez requieren acceso a recursos como suelo aire, agua y bosques, requieren de un manejo adecuado de manera tal que no contribuyan a magnificar desastres no solamente relacionados con procesos naturales sino con socioambientales (CNE, 2002).

Divergencias entre el uso actual y la capacidad de uso de la tierra.

En los últimos años, se ha visto un aumento de cambio de uso de pastos a cultivos anuales en zonas con pendientes mayores a 30% (ProDUS, 2016). Además, cabe mencionar que la mala o poca aplicación de las técnicas de conservación de suelo en las fincas agropecuarias aumentan el problema, según Gaitán (2013), se determina que el 75,5% de los suelos de la región presentan problemas de sobrexplotación, donde las pendientes superan al 8% y se cuentan con prácticas de conservación deficientes. Para evidenciar el conflicto existente entre la capacidad de uso de las tierras y el uso actual de las mismas se generó la Figura 13 que presenta el área y su porcentaje según el tipo de uso, presentando con uso correcto un 56% del área lo que equivale a 3508,2 ha, mientras que subuso y sobre uso representan un 19% y sobreuso un 17%, equivalente a 1169,5 ha y 1047,8 ha respectivamente.

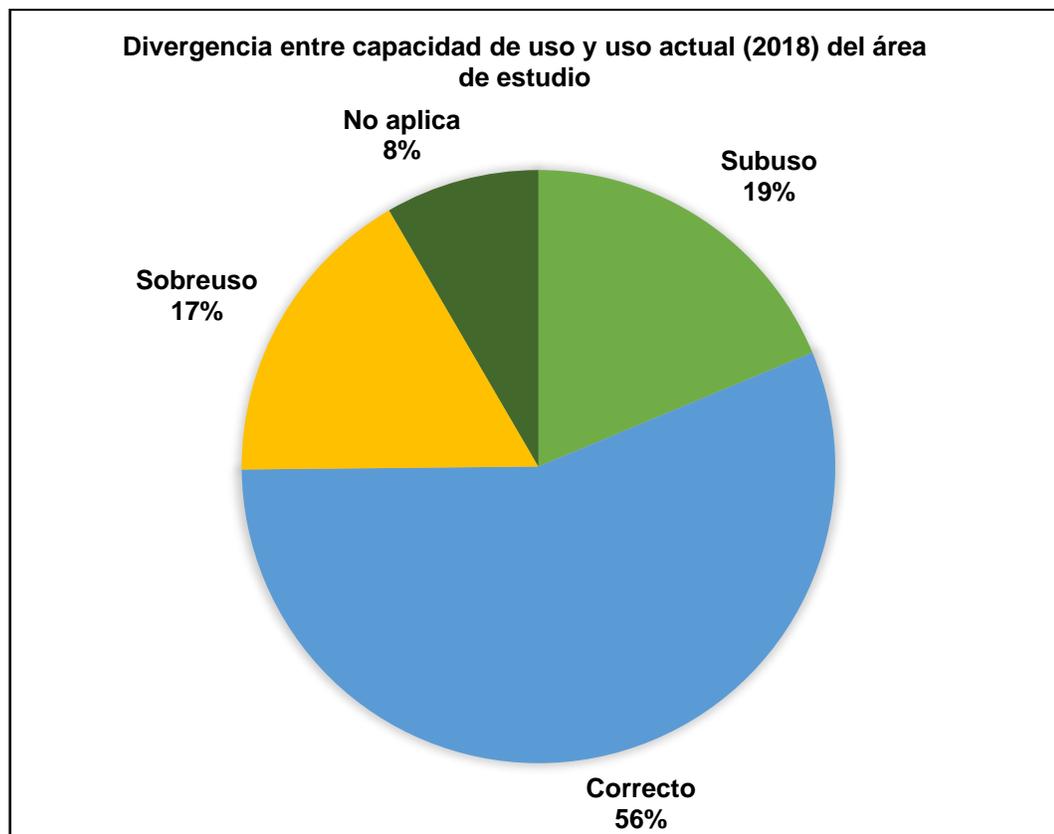


Figura 13. Divergencia entre capacidad de uso y uso actual (2018) del área de estudio.

Según la capacidad de uso de las tierras forestales se presenta un importante porcentaje (17%) del terreno, que presenta un grado de sobreuso de las tierras que genera importantes problemas ambientales, sociales y económico al implicar en muchas ocasiones procesos degradativos irreversibles, esta sobreexplotación se refiere a que el uso de la tierra no va de acuerdo con las limitaciones físicas y climáticas del terreno.

El principal problema por el que se ven afectados los productores debido a este sobreuso es la erosión, este proceso se ve favorecido por las lluvias intensas o el clima, la topografía, el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, así como propiedades del suelo son la mayor fuente de erosión; además, el efecto antrópico en el suelo por las actividades humanas como técnicas de cultivo inapropiadas, deforestación contribuyen a acelerarla e intensificarla (Gaitán, 2013).

Aunque en el proceso de erosión influyen los factores de escorrentía superficial y cobertura, según Gaitán (2013) se encontró que el factor que más afecta es la superficie con cubierta vegetal, ya que esta es la única que se puede manipular a través de políticas de uso del suelo, además se dice que los suelos con coberturas forestales absorben cuatro veces más agua de lluvia que los cubiertos por pastos y 18 veces más que los suelos desnudos.

La Figura 14, presenta el área y su porcentaje según su tipo de uso para las tres coberturas vegetales evaluadas, en la cual se denota que la clase de bosque presenta un 39% de área en uso correcto y un 61% en sobreuso, lo que significa que esta área está siendo protegida de alguna manera; mientras que las clases de pastos y cultivos presentan más del 50% en la clasificación de uso correcto.

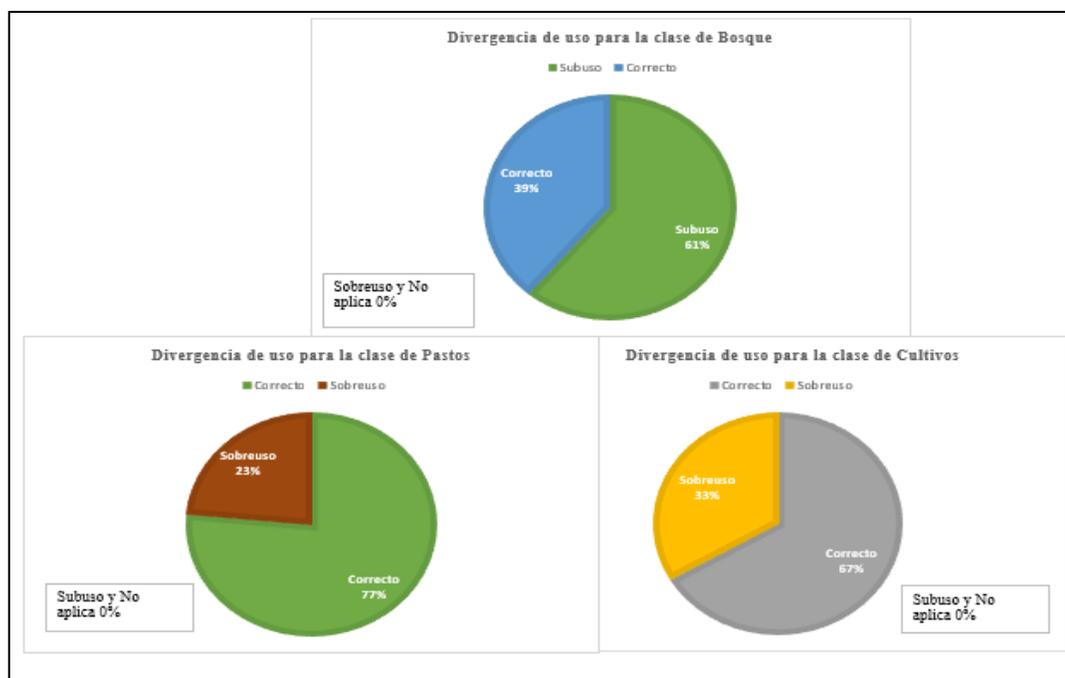


Figura 14. Divergencia entre capacidad de uso y uso actual (2018) del área de estudio, según clases de uso.

Según la revisión de literatura se encontró en el Plan de usos del suelo para las faldas del Volcán Irazú (ProDUS, 2016) planteados varios proyectos necesarios para

implementar a mediano plazo en la zona de estudio para aumentar el porcentaje de cobertura de uso forestal y que coinciden con lo propuesto en este documento, para ayudar a las zonas vulnerables y mejorar en el tema de conflicto de uso (divergencias), como lo son:

- Implementar sistemas agrosilvopastoriles en las fincas de producción pecuaria del cantón de Oreamuno, para que a mediano plazo (2-5 años) crezca en 10% la cobertura del suelo dedicado a pastos y árboles dispersos.
- Aumentar la cantidad de fincas que actualmente presentan un uso adecuado del suelo que, según el diagnóstico del Plan de suelos del cantón de Oreamuno, corresponde a un 50% del total del uso del suelo del cantón.
- Aplicar estrategias para disminuir el 40% de sobreuso del suelo que se presenta actualmente.
- Generar programas de acatamiento obligatorio que incorporen medidas de conservación de suelos, en aquellas fincas ubicadas en zonas de alta vulnerabilidad de erosión y las que se les ha dado capacitaciones sobre el tema de conservación de suelos.

Además de lo mencionado en el Anexo 8, se presenta una lista de prácticas de conservación del suelo según clase de uso que se pueden integrar a estos proyectos para mejorar la calidad y manejo de los suelos de la zona. Para lograr que los agroecosistemas mantengan su rendimiento a lo largo del tiempo se debe considerar la capacidad de uso del suelo, esto con el fin de demostrar que el tipo de vegetación presente en el lugar es la más adecuada para la intensidad y manejo que se le puede brindar. Para dar mayor detalle a cada zona se generó la cartografía que se muestra en la figura 15, y que representa la distribución geográfica de las áreas en conflicto según su uso.

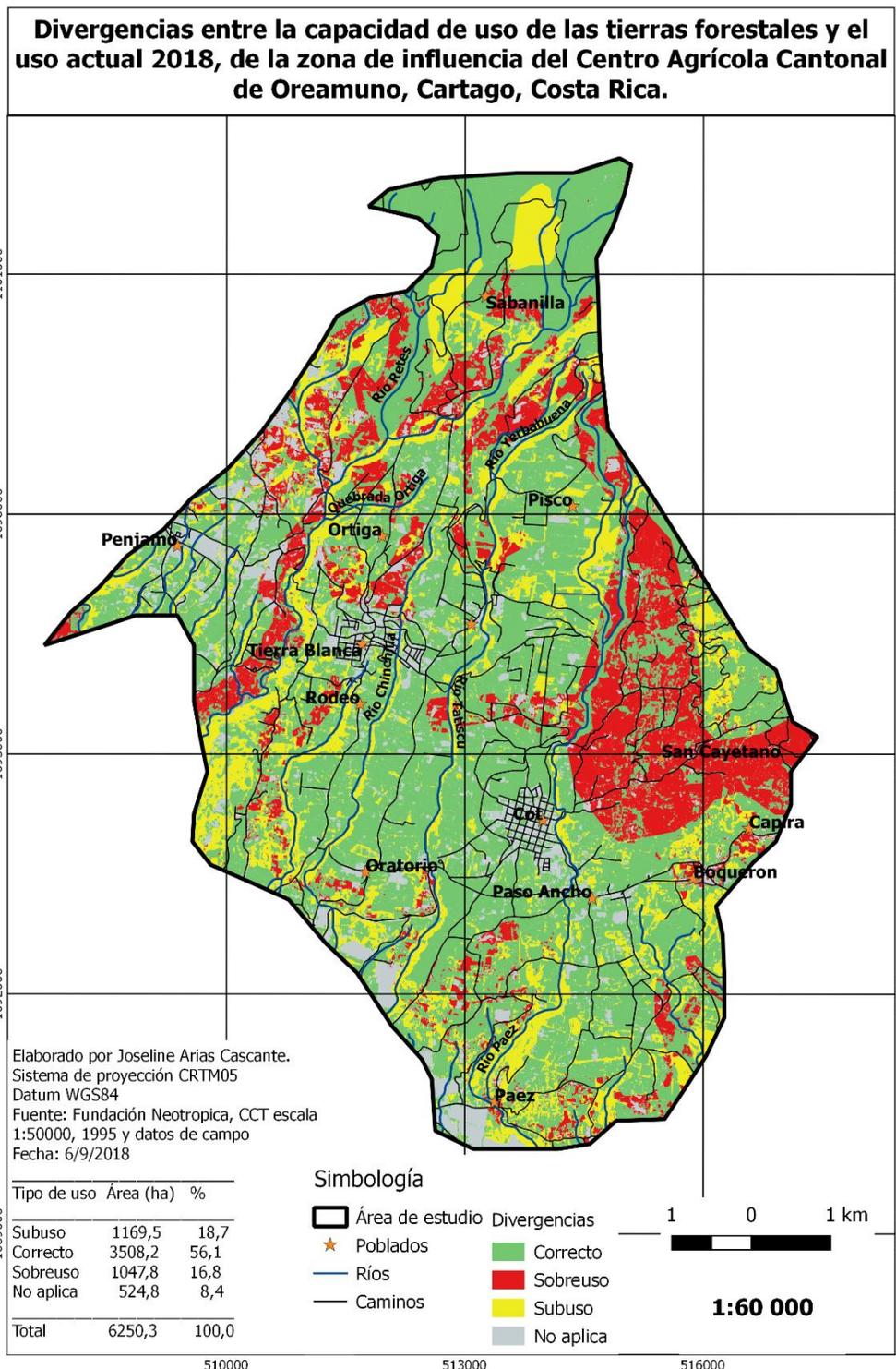


Figura 15. Mapa de divergencias de capacidad de uso de las tierras forestales y uso actual (2018) para el área en estudio.

Obtención de las áreas prioritarias a restaurar.

Seguidamente mediante la utilización de la combinación de Técnicas EMC y SIG, se logró producir un análisis de la información cartográfica y las consideraciones de expertos que permitieron clasificar el área de estudio en áreas prioritarias.

La información obtenida anteriormente (unión de capas de las diferentes variable y priorización por criterio experto) se le aplicó la técnica de EMC de sumatoria lineal ponderada la cual en términos sencillos consiste multiplicar el valor unitario dado a cada variable por el peso asignado por los expertos y sumar para cada polígono los resultados de las variables, este valor se denominó resultado, una vez que se tuvo esta información para toda el área, se procesó en el programa estadístico IBM SPSS Statistics 25, para definir las categorías de priorización y que estas fueran representativas, mediante un análisis de frecuencias se obtuvieron tres categorías (Figura 16), así los datos se agruparon según el rango determinado y se logró establecer la jerarquía de prioridad. Esto permitió generar un análisis de la priorización de zonas a restaurar.

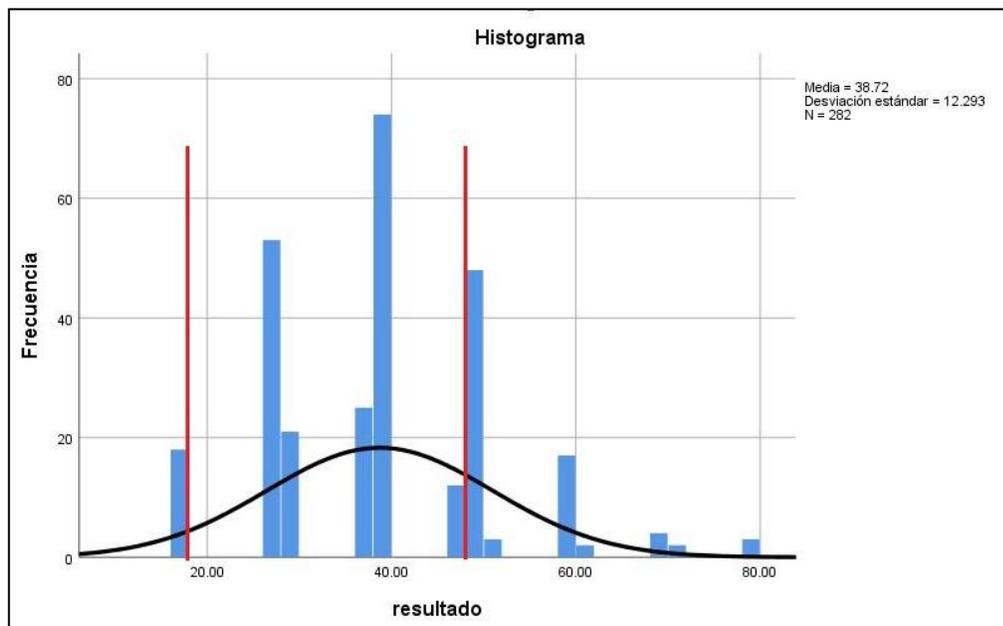


Figura 16. Histograma de frecuencias para el resultado de la priorización de áreas.

En Figura 17, se presenta la distribución de área según las categorías de priorización, se puede observar que la categoría media presenta mayor área con 1932,4 ha, seguida por la categoría baja con 1526,2 ha y por último la categoría alta con 297,8 ha, de este modo queda distribuida el área de estudio según la escala establecida.

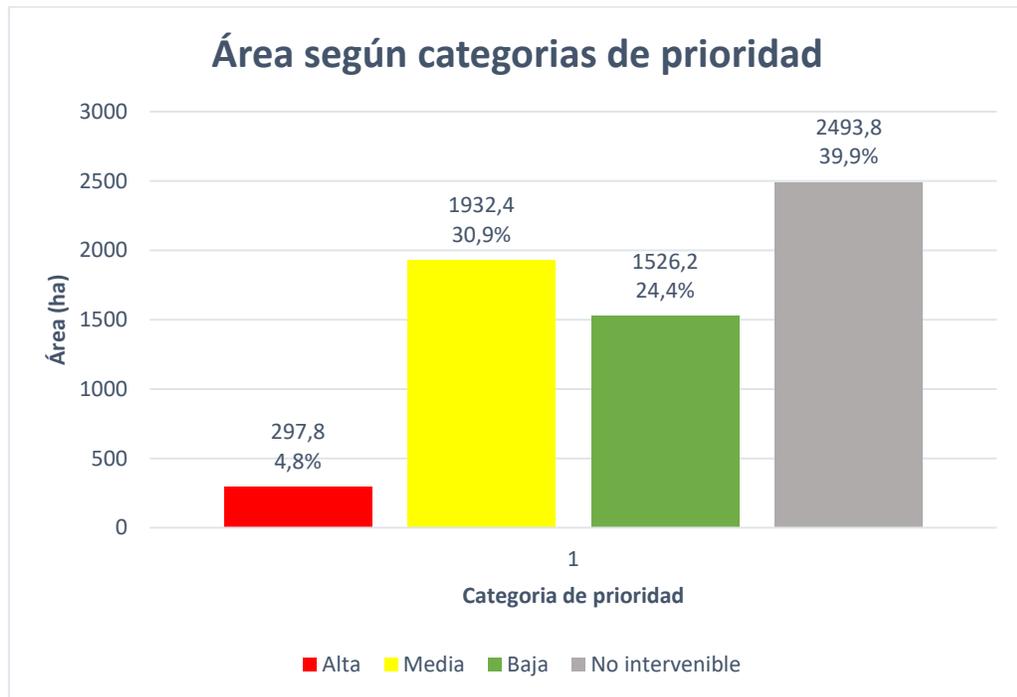


Figura 17. Valores de área en hectáreas obtenidos para cada valor de priorización establecidos para el estudio.

En forma visual y para dar mayor detalle a cada zona se generó la cartografía que se muestra en la figura 18, y que representa la distribución geográfica de las áreas a restaurar según la jerarquía de priorización. Las áreas más vulnerables son las clasificadas como prioridad Alta, se puede notar que estas se distribuyen se distribuyen en las riberas de los ríos (rio Reventado), esto se puede deber a que los productores han ingresado con sus cultivos u otras actividades en las áreas que están destinadas a protección de los flujos de aguas; según los cálculos de la CNE establecen que al año 2000, una población de entre 5800 y 6200 personas han invadido lo establecido por la Ley N° 3459 como la Reserva del Río Reventado,

además de esto las laderas de los ríos son zonas de alta inestabilidad propensas a deslizamientos, como se había mencionado anteriormente y en concordancia con lo descrito por Vargas (2017). Durante el periodo comprendido entre marzo de 1963 a febrero de 1965 las erupciones volcánicas eliminaron aproximadamente el 80% de la cobertura vegetal en la cuenca superior del Reventado, ocasionando cambios drásticos en la hidrología de la cuenca, las zonas de orilla de ríos necesitan ser restauradas y conservadas para mejorar los servicios ecosistémicos que estos hábitats brindan.

Por otro lado hay sitios abiertos de potreros y cultivos, como los ubicados en el sector de San Cayetano los cuales presentan la categoría de Alta, esto se debe a la mala utilización del suelo ya que son sectores que presentan clases de uso del suelo VI y VII, que son clases con limitaciones severas por lo cual se recomienda el manejo de cobertura forestal así como de cultivos permanentes como frutales, pero los agricultores están produciendo cultivos anuales en estos sitios, además de eso muy pocos utilizan las prácticas de manejo y conservación de suelos debidas, lo cual incrementa la degradación de los suelos y los procesos erosivos en los mismos.

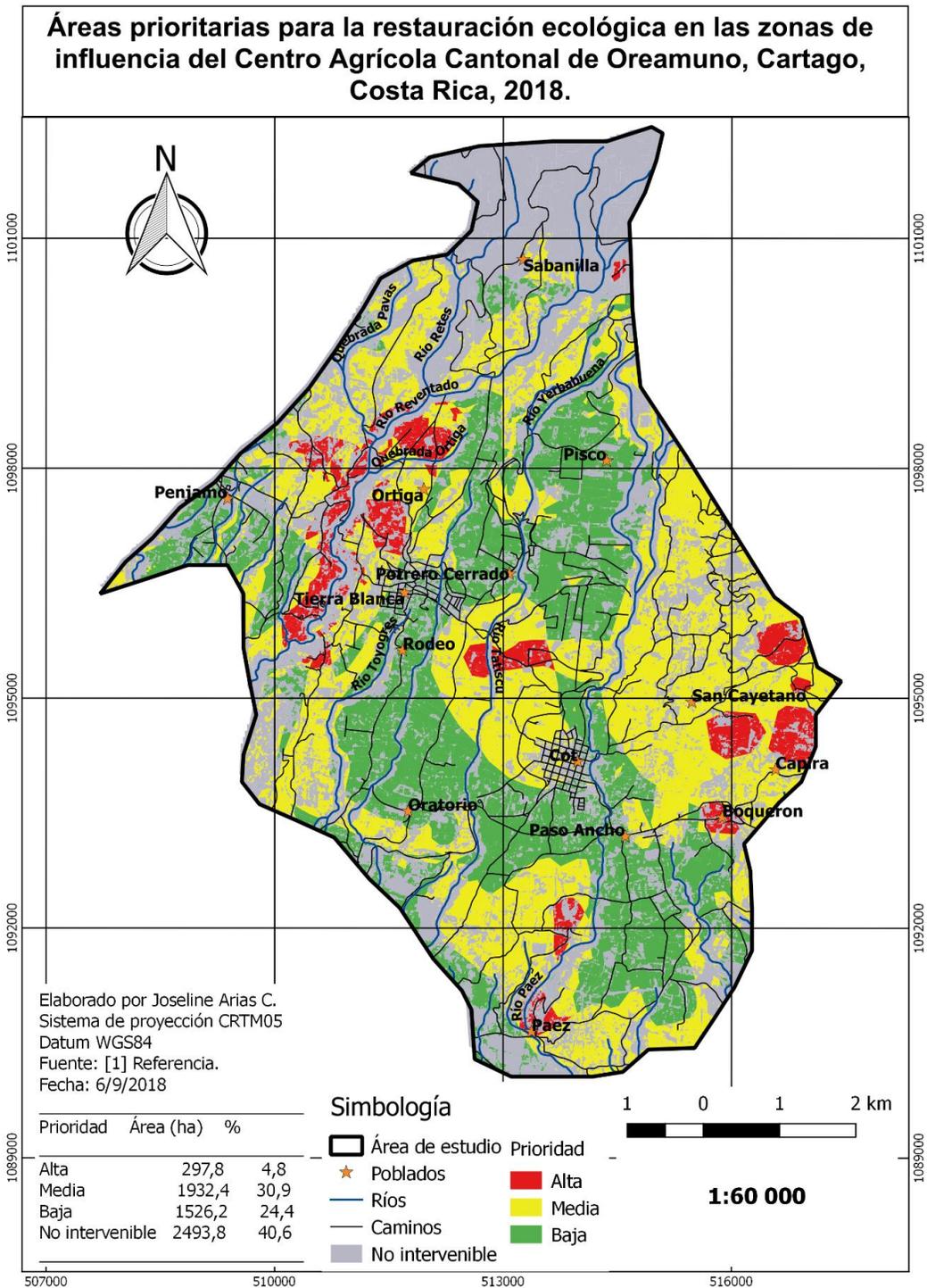


Figura 18. Priorización de zonas a restaurar en la zona de influencia del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno.

Plan de Restauración.

La finalidad de la propuesta de restauración es dirigir los recursos a las zonas más vulnerables y crear un protocolo que sea específico y adaptado a cada zona de acción, por lo cual en el plan de restauración se dividen los sitios según zonas; estas fueron elegidas según su vulnerabilidad evaluando sus limitaciones según las variables fisiográficas contempladas en el estudio. Autores como Pozzobon y Gutiérrez (2003), aseguran que es indispensable identificar los sitios dentro de una cuenca donde el dinero que se invierta, las horas de trabajo y el esfuerzo puedan generar el mayor impacto sobre los recursos que se quieran manejar, los autores definen que las áreas críticas en una cuenca son aquellas que juegan un papel importante por su impacto para los ecosistemas, la gente o para ambos. Por lo cual a continuación se detallan los pasos para la obtención de las estrategias de restauración.

Ecosistema de referencia y evaluación del estado actual del ecosistema.

La propuesta de restauración tiene como fin rehabilitar las zonas que se encontraron como prioritarias para que estas cumplan con sus funciones o servicios ecosistémicos que se han perdido en el tiempo, por lo cual describir el ecosistema ayuda a conocer cuál es la trayectoria de restauración que se debe tomar para cumplir con los objetivos.

Para establecer el ecosistema de referencia se realizó una revisión de literatura en lo que respecta al tema para el área en estudio, de la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

Se determinaron las zonas de vida presentes en la zona de estudio según la clasificación de L. Holdridge, (Quesada, 2007):

- a) Bosque húmedo Premontano (bh-P): el ámbito de precipitación para esta zona de vida varía entre 1200 a 2200 mm, como promedio anual se presenta un periodo efectivo seco de 3,5 a 5 meses. En esta zona se presentan extensas áreas de suelos volcánicos, fértiles donde el bosque original mayormente ha

desaparecido, p.e el Valle Central. Entre las especies características de esta zona de vida están los géneros *Nectandra*, *Persea*, *Cinnamomun* de la familia Lauraceae, *Cupania* de la familia Sapindaceae, *Eugenia* de la familia Myrtaceae, *Cedrela salvadorensis* (cedro), *Cedrela tonduzii* (cedro dulce), *Albizia adinocephala* (carboncillo), *Dendropanax arboreus* (fosforillo).

- b) Bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB): el rango de precipitación oscila entre 1400 y 2000 mm como promedio anual. Presenta un periodo efectivamente seco moderado entre 2 a 4 meses secos. La ubicación en el país sería en las cercanías de Zarcero, Ochomogo y todas las localidades ubicadas entre los 1400 y 2100 msnm. En su condición natural el bosque de esta zona de vida es de baja altura, con dos estratos, poco denso, con abundancia de epífitas, siempreverde.
- c) Bosque muy húmedo Montano (bmh-M): esta zona de vida, presenta un rango de precipitación entre 1800 y 2300 mm anuales como promedio. En el país, esta zona de vida se localiza en el Volcán Irazú únicamente. La vegetación está dominada por el género *Quercus*, *Alnus acuminata* (jaúl) y las familias Lauraceae, Melastomataceae, Araliaceae, Asteraceae principalmente. Esta es la zona de vida menos presente en el área de estudio.

El ecosistema de referencia del cual predomina más registros en el área de estudio es el Parque Nacional Volcán Irazú, donde se distinguen tres tipos de vegetación según SINAC (2008): comunidades de líquenes, gramíneas y plantas herbáceas, vegetación de páramo sobre la línea de vegetación arbórea y vegetación montano alto. Además del Sector Prusia cuya vegetación natural ha sido alterada debido a la destrucción provocada por las erupciones del volcán Irazú en 1963, por lo cual se generó un programa de reforestación intensiva tanto con especies exóticas (ciprés, pino y eucalipto) como nativas (roble, jaúl, salvia, etc.) para recuperar los suelos afectados (SINAC, 2008).

Otro factor importante es la agricultura practicada en la zona la cual es típica del paisaje de la zona norte de Cartago como es el caso de lo presente en la cuenca del

río Reventado donde el clima y los suelos de la región son excelentes para la producción de hortalizas, comunidades como Llano Grande y Tierra Blanca son eminentemente agrícolas, ya que 80% del terreno se dedica a la agricultura y el otro 20% a ganadería (Ramírez et al., 2008).

Al evaluar el estado del ecosistema actual sale a la vista que este sufre de una fuerte fragmentación de los bosques ocasionada por las actividades humanas, que ha traído como consecuencia cambios en las condiciones ambientales de los remanentes de bosque; alteraciones como la pérdida en el número y composición de genotipos, especies, tipos funcionales y unidades de paisaje. (Alonso, Finegan, Brenes, Günter y Palomeque, 2017).

Se presentan muchos paisajes alterados como pasturas, campos agrícolas e incluso asentamientos humanos, a pesar de estar muy fragmentados y deforestados todavía pueden contener cierto grado de cobertura arbóreas en forma de pequeños parches de bosque (charrales, arboles aislados, cercas vivas, cortinas rompevientos y bosques riparios). Estas coberturas arbóreas, aunque discontinuas y alteradas tienen valor para la conservación de la vida silvestre al aumentar la complejidad florística y estructura del paisaje, proporcionar recursos proveer hábitats, sitios de refugio, anidamiento, forrajeo y percha a una cantidad importante de especies permitiendo que estas permanezcan y sobrevivan en el paisaje fragmentado (Estrada, 2007).

Barreras a la restauración.

Se identificaron las principales barreras a la restauración y al éxito del proyecto en el sitio de estudio, entre las cuales están:

- a) La importancia productiva de la tierra: ya que las familias de la zona viven de la agricultura y cada metro de tierra productivo cedido para este proyecto simboliza un valor económico para su propietario, por lo cual se debe de explicar a los propietarios la importancia del proyecto y los beneficios que obtendrán de este, dando importancia a la recuperación de servicios ecosistémicos y la

protección de la capa fértil del suelo que es lo más importante a la hora de producir.

- b) Riesgo por invasiones vegetales: esto por la cercanía de los sitios escogidos a cultivos o pastos, directamente no representan un riesgo, pero si su acción está presente puede desacelerar el proceso de restauración y en algunos casos provocar que estos terrenos vuelvan a su uso anterior (agricultura).
- c) Falta de un banco de semillas o material genético que impulse la regeneración natural: debido a la fragmentación de bosque que presenta la zona y la expansión de la frontera agrícola, se ve menguada la presencia de árboles que sirvan como madre en una futura regeneración natural lo cual presenta una barrera al proyecto, ya que el éxito de este dependerá de únicamente de los arboles del proyecto.
- d) Inestabilidad de los suelos: debido a la inclinación del terreno en ciertas zonas y su desnudez por prácticas de manejo inadecuadas, sumadas a las lluvias y el viento típicos de la zona puede provocar deslizamientos lo cual afectaría al proceso.

Selección de especies adecuadas para la restauración.

La selección de especies forestales es un elemento muy importante en los planes de restauración, puesto que el éxito de estos proyectos depende de esta selección; se sabe que las cubiertas forestales incrementan la infiltración y pueden ayudar a la mejora de la recarga de los acuíferos y al mantenimiento del caudal base de los ríos, además proveen distintos servicios ambientales entre los cuales destacan la conservación de suelos, biodiversidad y la regulación hidrológica (Lianes, Marchamalo y Roldán, 2009).

Las especies forestales fueron recomendadas esperando satisfacer la preocupación de las personas consultadas en cuanto a los tres criterios que obtuvieron mayor valor en la priorización (riesgo, cuerpos de agua y capacidad de uso del suelo), por lo cual se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Se recomienda que en medida de lo posible las especies forestales utilizadas sean nativas, ya que lo que se plantea es la restauración de las zonas prioritarias acoplando estas estrategias al paisaje presente rehabilitándolo hacia su estado original, además de servir como “paso” a la fauna presente en la zona. En cuanto a especies forestales recomendadas se puede valorar según estudios la introducción de especies forestales exóticas, las cuales son fuente de madera (pino, ciprés, eucalipto, etc.) además de los árboles frutales. Es un uso poco extendido en la cuenca de estudio, a pesar de la promoción por parte de las instituciones oficiales. Los frutales permitieron la reducción de la erosión con respecto a al cultivo hortícola en un 97% y la escorrentía en un 21%, ya que cesan los impactos debido a la mecanización agrícola y aumentan y mejoran la estabilidad de la cobertura pudiendo llegando a revertir el proceso de degradación, por esto se recomienda extender el uso de árboles frutales en la cuenca.
- b) Ser especies forestales que se adapten a las condiciones climáticas del sitio (precipitación, temperatura y altitud).
- c) Deben ser especies forestales que cumplan con alguno de los siguientes usos: estabilización de suelos, conservación de agua, control de la erosión. Ya que según el análisis previo los factores que más preocupan a las personas involucradas en el área son las zonas de riesgo, los cuerpos de agua y la capacidad de uso de la tierra.
- d) También deben ser especies forestales que brinden alimento a la fauna, árboles que puedan atraer diversas especies de aves e insectos.

Para la selección de las especies forestales se utilizó el programa reproducción de especies arbóreas y arbustivas para la Región Central de Costa Rica GERMINAR 2.0, el cual es una compilación de información taxonómica, características, usos y manejo de semillas y viveros, de especies arbóreas y arbustivas de especial uso en la región central del país (Torres, Rojas, Carvajal y Arguedas, 2010).

La búsqueda se realizó mediante el módulo de adaptabilidad donde se insertaron los rangos de precipitación (1200- 2000 mm), temperatura (12°-25°) altitud (700-2700 msnm), estos valores coinciden con lo expuesto para las zonas de vida presentes en el área; esta búsqueda arrojó un total de 59 especies forestales adaptables a las condiciones climáticas descritas. Seguidamente se procedió a hacer un filtro por origen, ya que se recomienda utilizar solo especies nativas, y por usos u objetivos lo que redujo la lista a 35 especies forestales que cumplen con las especificaciones buscadas, estas se muestran en el Anexo 7.

Selección de sitios a restaurar.

La selección de los sitios a restaurar es un proceso cuidadoso ya que este paso se debe tener un conocimiento de lo que sucede a diferentes escalas (potenciales riesgos, degradación de los recursos, etc). Por lo cual los sitios a restaurar que se seleccionaron para este proyecto son los que según técnicas de SIG-EMC presentan una prioridad alta (297,8 ha), seguidamente esta categoría se limitó en cuatro zonas de acción, para así a cada una de ellas asignarle una estrategia de restauración para hacer más eficiente y específico las necesidades el proceso de restauración.

A continuación se presentan de forma visual el mapa de cada zona de acción (Figuras 19, 20 21 y 22) y un cuadro resumen para cada uno donde se especifican las limitantes presentes en cada zona según las variables fisiográficas evaluadas así como la propuesta de estrategias de restauración para cada sitio (Cuadros 14 y 15).

Cuadro 14. Resumen de la estrategia de restauración para la Zona 1 y 2.

	Zona 1	Zona 2
Área	131,95 ha	97,91 ha
Distritos	Llano Grande y Tierra Blanca	Cipreses, Santa Rosa y San Cayetano
	<u>Clases uso:</u> Agro: 13,87 ha, VI: 71,23 ha (VI5e), VII: 22,29 ha (VII6n, VII6e) y VIII: 22,55 ha (VIII7)	<u>Clases de uso:</u> VI: 46,63 ha, (VI5pi, VI5pinv) VII: 51,28 ha (VII6pi)
	Principales limitantes erosión moderada a severa y pendientes.	Limitación de erosión
	<u>Pendientes:</u> 0%-40%: 107,9 ha, 40%-50%: 13,13 ha, mayores a 50%: 11,64 ha	<u>Pendientes</u> de 0%-40%: 97,91 ha.
Condiciones físicas	<u>Cuerpos de agua:</u> En esta área hay una zona de protección ya establecida a lo largo del río Reventado, pero el resto de las áreas no son cercanas a ríos por lo cual no se limitan una zona de protección.	<u>Cuerpos de agua:</u> No son áreas de protección o cercanas a ríos.
	<u>Riesgo:</u> Deslizamiento (Reventado) y avalanchas,	<u>Riesgo:</u> Deslizamientos, Colinas irregulares de la colada de lava de Cervantes
	<u>Cobertura:</u> Cultivos (72,15 ha) y pastos (59,8 ha).	<u>Cobertura:</u> Cultivos (12,45 ha) y pastos (85,46 ha)
Técnicas de restauración	Propuesta 2: Esta propuesta se recomienda a los productores que tienen terrenos de pastos y cultivos y quieren hacer algo pro-ambiente; consiste en el establecimiento de árboles en hilera en los límites de la finca o sus divisiones internas con el fin de diversificar y aumentar la productividad, además, aumenta la conectividad del paisaje y contribuye a crear una matriz mucho más amigable con la biodiversidad sin tener que ceder terreno productivo. Estas propuestas pueden adaptarse a las necesidades del productor y combinarse en diferentes arreglos de SAF: pequeños bloques de plantación, cercas vivas, barreras rompe viento, árboles maderables en linderos, árboles con cultivos	perennes.
	Uso estricto de las prácticas de conservación de suelos recomendadas según la clase de capacidad de uso presente en la propiedad, (Anexo 8).	
	En cuanto a las especies forestales recomendadas para llevar a cabo las propuestas de restauración esto dependerá del objetivo del productor por lo cual se tiene el Anexo 7, el cual contiene una lista de las especies forestales sugeridas las cuales cumplen como se ha hablado anteriormente con los requisitos de adaptación y mejora de los servicios ambientales de la zona.	

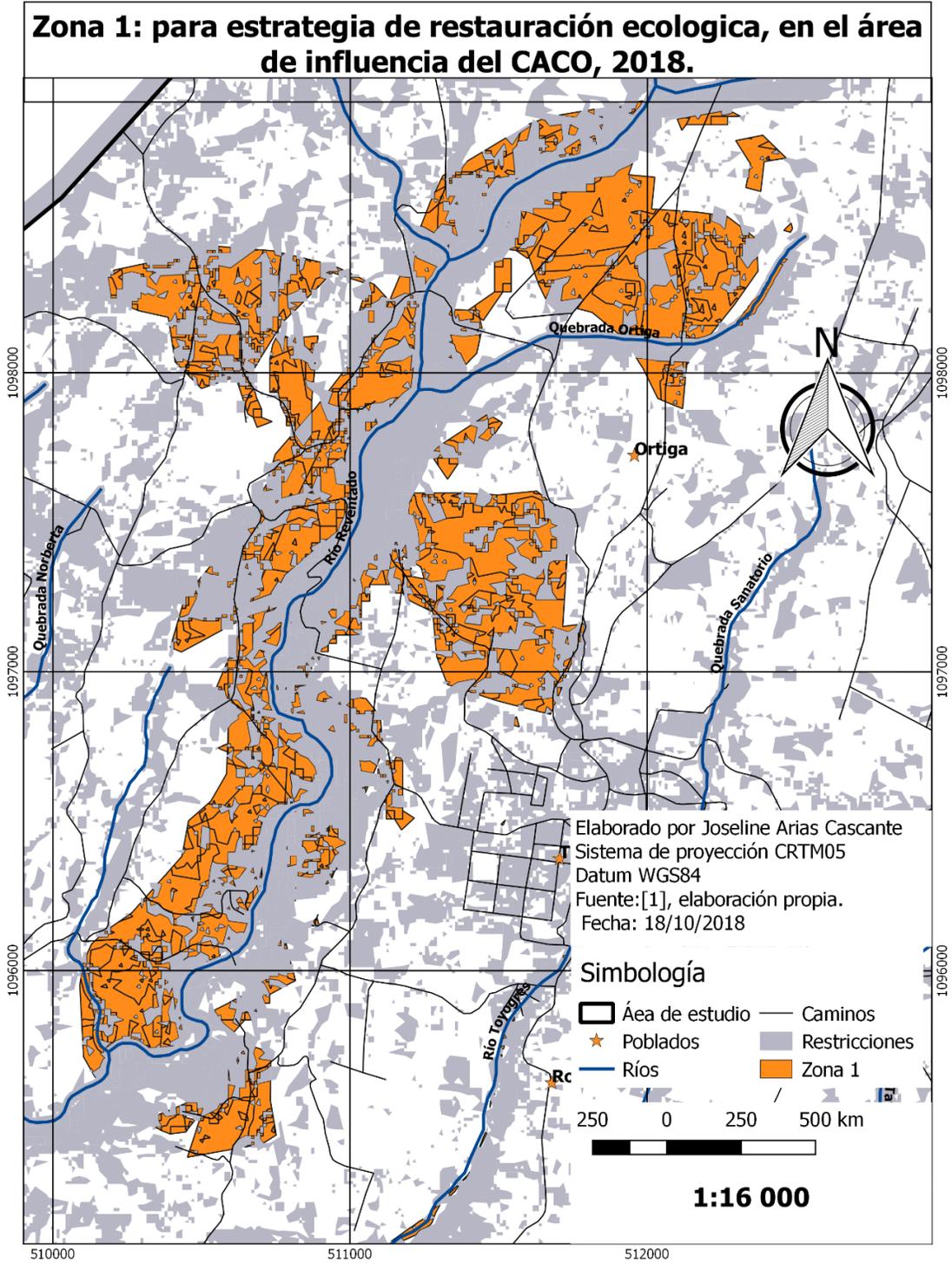


Figura 19. Zona 1 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.

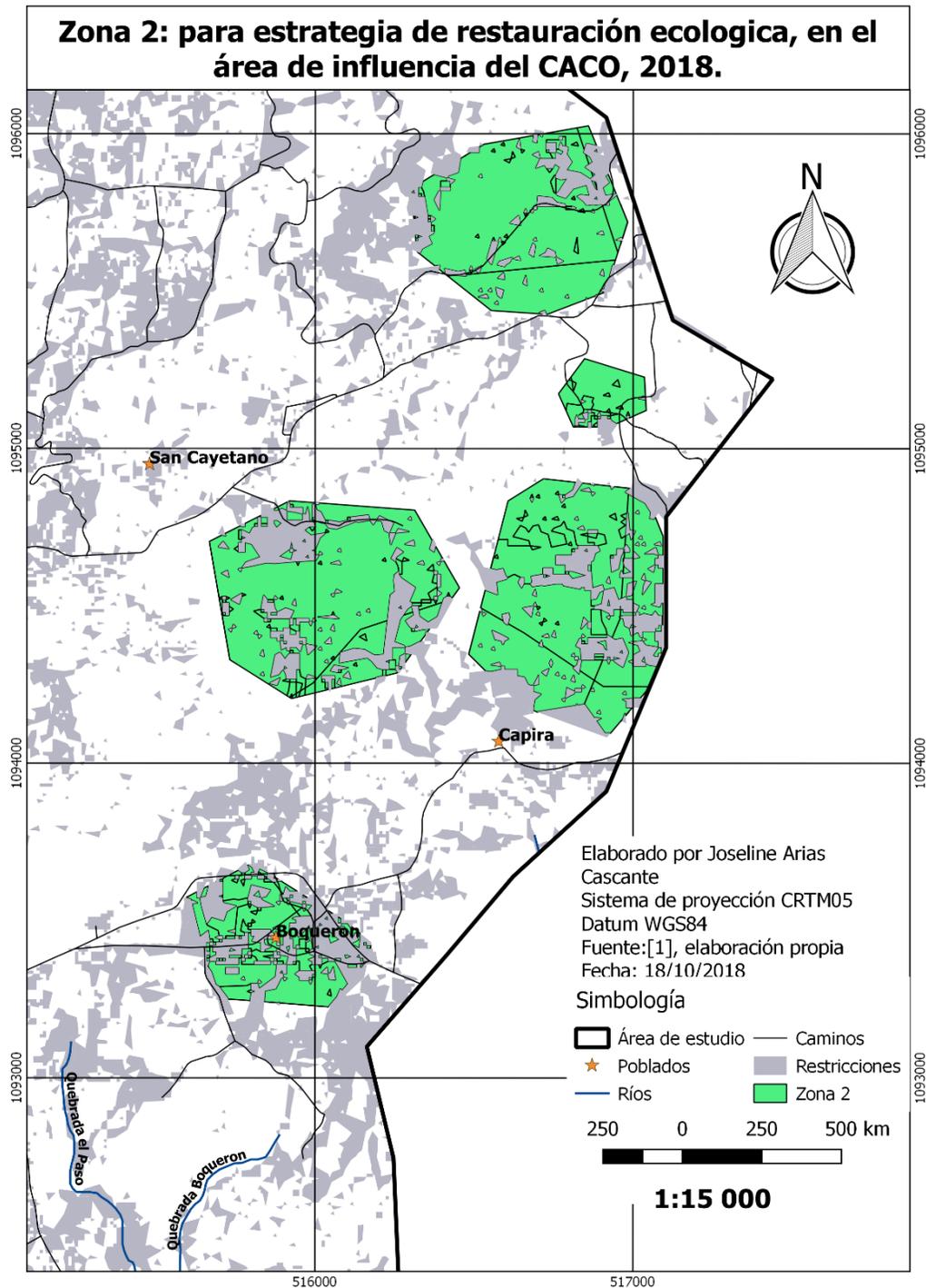


Figura 20. Zona 2 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.

Cuadro 15. Resumen de la estrategia de restauración para la Zona 3 y 4.

	Zona 3	Zona 4
Área	25,72 ha	36,08 ha
Distritos	Potrero Cerrado	Cot
	<u>Clases de uso:</u> VI: 25,7 ha (VI5T)	Clases de uso: A: 4, 31 ha, VI: 31,78 ha (VI5e)
	Limitaciones de erosión severa y pendientes fuertes	
Condiciones físicas	<u>Pendiente:</u> 0%-40%: 25,72 ha	<u>Pendiente:</u> 0%-40%: 35,24 ha, 40%-50%: 0,84 ha
	<u>Cuerpos de agua:</u> Áreas que deberían estar como zonas protegidas, pero hay invasión por otras actividades	
	<u>Riesgo:</u> Deslizamiento	
	Cobertura: principalmente pastos (21,5 ha) y algunos parches de cultivos (4,22 ha)	Cobertura: pastos (19,39 ha) y cultivos (16,69 ha)
Técnicas de restauración	<p>Propuesta 1: Esta opción se recomienda para las zonas de orilla de río que han sido invadidas por otro uso del suelo. Es una alternativa para poder recuperar las zonas de protección que por Ley deben estar establecidas a la orilla de los ríos. Esta también se puede combinar con la propuesta 2 que consiste en el establecimiento de árboles en hilera en los límites de la finca o sus divisiones internas con el fin de diversificar y aumentar la productividad, además, aumenta la conectividad del paisaje y contribuye a crear una matriz mucho más amigable con la biodiversidad sin tener que ceder terreno productivo.</p> <p>Uso estricto de las prácticas de conservación de suelos recomendadas según la clase de capacidad de uso presente en la propiedad, (Anexo 8).</p> <p>En cuanto a las especies forestales recomendadas para llevar a cabo las propuestas de restauración esto dependerá del objetivo del productor por lo cual se tiene el Anexo 7, el cual contiene una lista de las especies forestales sugeridas las cuales cumplen como se ha hablado anteriormente con los requisitos de adaptación y mejora de los servicios ambientales de la zona</p>	

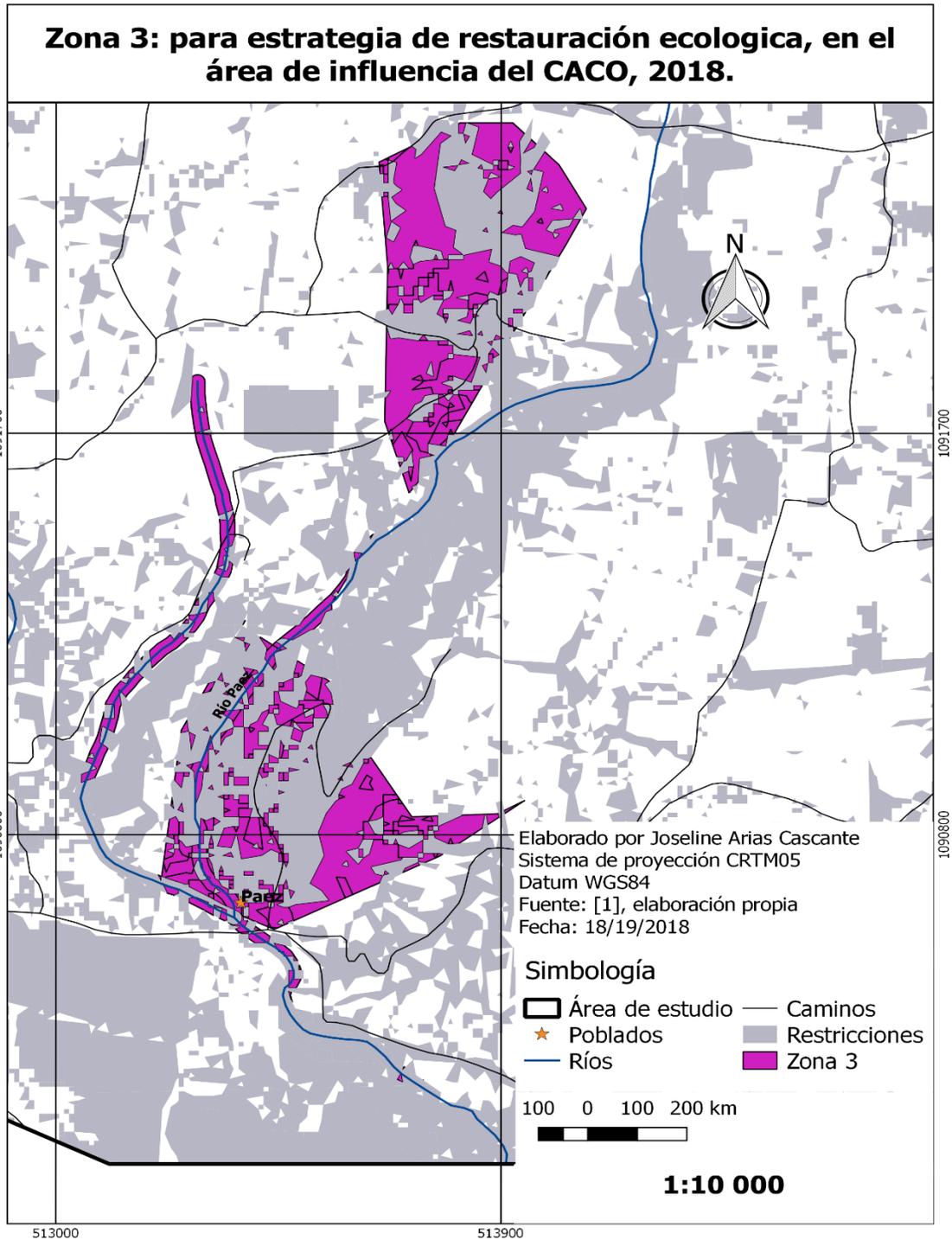


Figura 21. Zona 3 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.

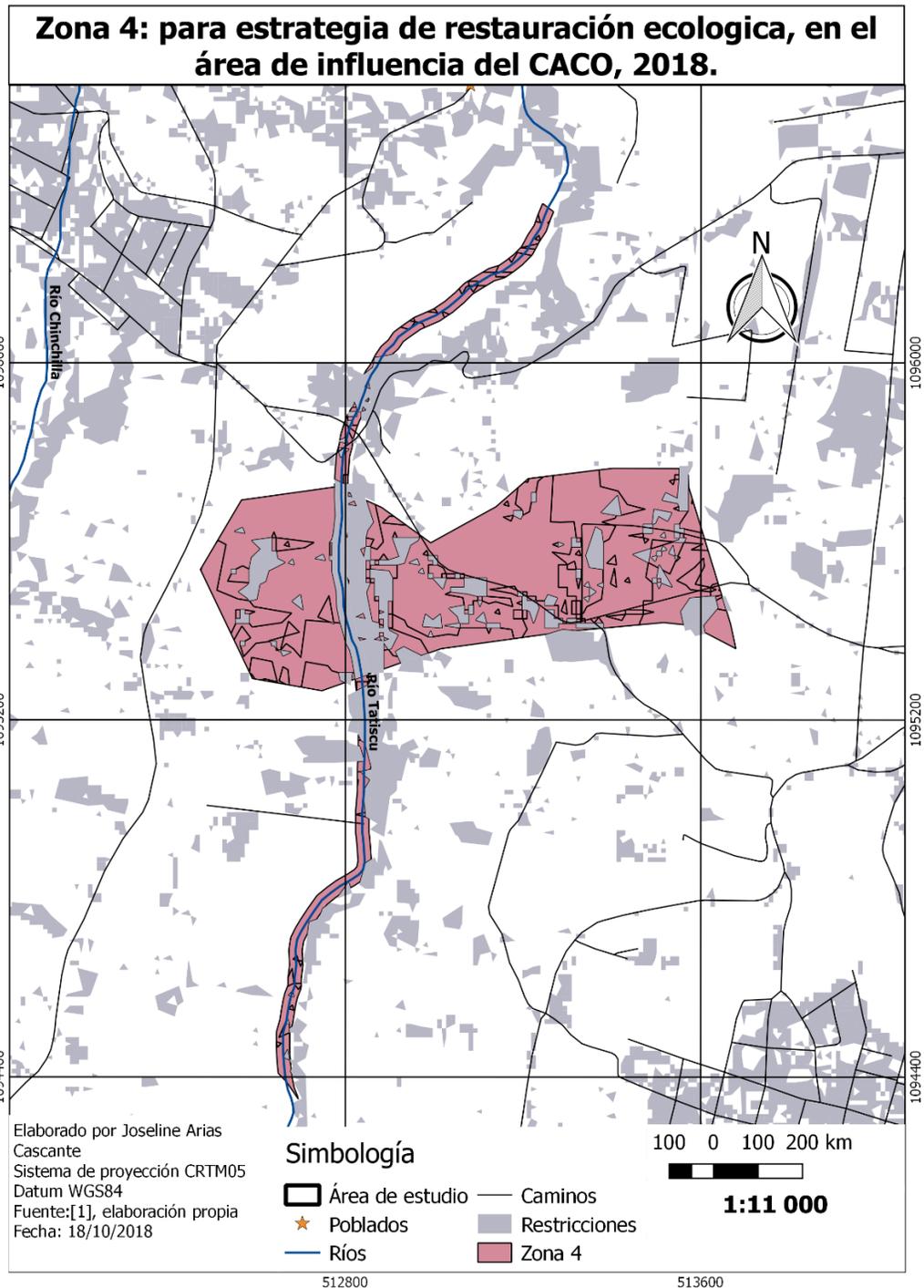


Figura 22. Zona 4 para estrategia de restauración en el área de influencia del CACO, 2018.

Estrategias de restauración.

Después de analizar la información obtenida en las secciones anteriores se plantean dos opciones de restauración para las áreas elegidas con prioridad alta, estas están dirigida a zonas de ribera establecimiento de zona de protección (opción 1) y zonas en potreros o cultivos con establecimiento de árboles maderables o de uso múltiple en hileras (opción 2). A la hora de implementar las estrategias se debe tener en cuenta el listado de especies forestales recomendadas para el sitio ya que estas son las que mejor se adaptan a la zona, de mismo modo previo a la restauración se debe evaluar cada finca y las necesidades de cada productor, además se debe valorar la existencia del recurso vegetal para lograr llevar acabo la actividad de restauración.

Opción 1: un punto importante es la restauración y conservación de ríos y riberas ya que estos remanentes de bosque riparios cumplen el papel de corredores ecológicos de los sistemas fluviales, al facilitar el desplazamiento de fauna silvestre en paisajes fragmentados como lo es el caso Corredor Biológico Ribereño Interurbano Subcuenca Reventado-Agua Caliente (COBRI SURAC), el cual se encuentra inmerso en el área de estudio el cual tiene como objetivo mantener y restablecer la conectividad entre siete áreas protegidas: Parque Nacional Volcán Irazú, Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte, reservas forestales Cordillera Volcánica Central y Río Macho, zonas protectoras Tiribí, cerros de la Carpintera, Río Navarro- Río Sombrero. El corredor abarca el 6% de la provincia de Cartago la cual es de importancia estratégica como oferente de servicios ambientales, principalmente agua para el consumo humano, producción de energía (COBRI SURAC, 2007).

La importancia de la conectividad espacial se ve aún más acentuada en el contexto actual de cambio climático. La creación de redes de conectividad es una estrategia frecuentemente propuesta para reducir los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad puesto que pueden facilitar la dispersión de muchas especies que precisen cambios en su distribución espacial debido a las nuevas condiciones climáticas (Salido-Pérez, 2013).

De este modo se entiende el porqué de la importancia de mantener la conectividad del territorio más allá de la protección aislada de espacios naturales, es clave para mantener ecosistemas funcionales y los servicios ecosistémicos que estos brindan. Por lo cual se plantea esta opción que se recomienda para las orillas de río, en este caso se establece un área de protección de 15 metros, hasta el inicio de otro uso de la tierra.

Para esta alternativa se utilizarán árboles de porte alto, mediano o bajo, logrando formar tres estratos los cuales se organizarán en cinco filas como se muestra en la Figura 23; el objetivo de esta distribución es que los arboles más cercanos a los cultivos u otro uso del suelo no representen problemas en cuanto a sombra, goteo o humedad. Para el espaciamiento se recomienda una distancia de siembra de tres por tres metros (3x3m) que es el valor promedio dado por la Oficina Nacional Forestal (ONF, 2009; 2013) en sus manuales.

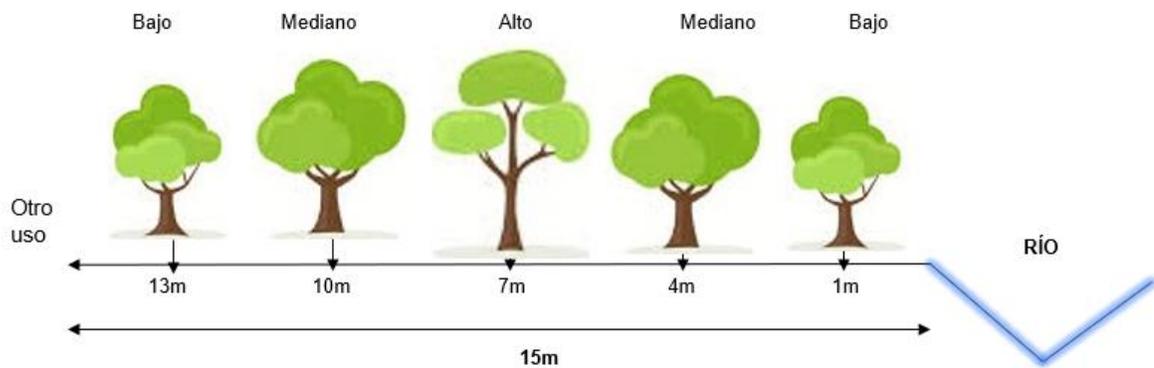


Figura 23. Opción 1 de propuesta para restauración en la zona de influencia del CACO (ríos).

Opción 2: En la restauración de paisajes productivos es necesario combinar estrategias que permitan articular la conservación y la producción en el mismo paisaje; en ese contexto, los sistemas agroforestales (SAF) son una herramienta clave porque permiten el logro simultáneo de objetivos diversos que incluyen: proteger los

remanentes de bosque, aumentar la cobertura de vegetación para mejorar la conectividad entre fragmentos, proteger la biodiversidad y proveer hábitat para la fauna, recuperar y conservar los suelos, y aumentar la producción de biomasa y el almacenamiento de carbono (Calle et al, 2014). Además, la progresiva “matorralización” de agroecosistemas abandonados es otro elemento que favorece la reducción de las tasas de erosión edáficas, la mejora de la calidad de las aguas fluviales, provoca la expansión del hábitat de las especies con requerimientos forestales (Gurrutxaga y Lozano, 2007) y brindan permeabilidad a la matriz agrícola.

Esta opción es recomendada para terrenos que no son orilla de ríos (cultivos o pastos) sitios en las que no necesariamente se debe poner por ley una zona de protección; consiste en el establecimiento de árboles en hilera en los límites de la finca o sus divisiones internas con el fin de diversificar e incrementar la productividad, además, aumenta la conectividad del paisaje y contribuye a crear una matriz mucho más amigable con la biodiversidad sin tener que ceder terreno productivo con técnicas sencillas como lo son las cercas vivas, linderos maderables o cortinas rompevientos. Aunque estos elementos del paisaje casi siempre son ignorados en las estrategias y actividades de conservación pueden ser cruciales en el mantenimiento y conservación de la biodiversidad, para proveer hábitats y recursos que de otra manera no estarían presentes. Para esta se dispone una distancia de 6 metros desde el límite de la propiedad (sirviendo, así como lindero o cerca), como se muestra en la Figura 24.

Las especies forestales recomendadas son de porte mediano y bajo; se excluye el porte alto ya que estas estarán en áreas de cultivo o pastos y podrían afectar la productividad de estos, debido a la extensión de su copa implicando sombra a los cultivos. Esta opción está conformada por tres filas y el distanciamiento recomendado es igual al anterior tres por tres (3x3m).

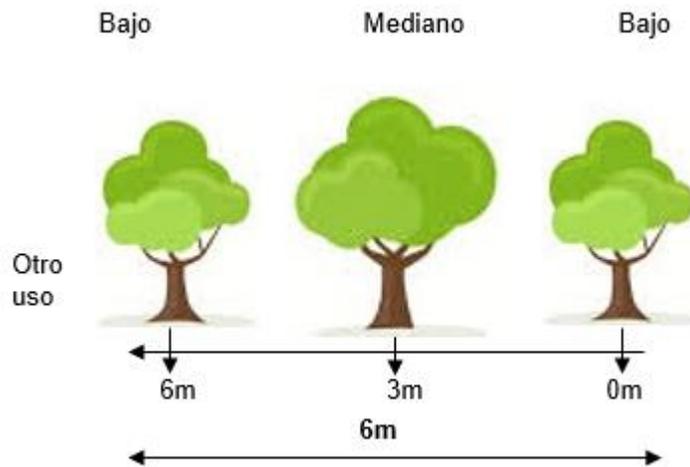


Figura 24. Opción 2 de propuesta para restauración en la zona de influencia del CACO, (zonas de riesgo).

Cercas vivas: Es una práctica común dentro de un sistema agroforestal. Consiste en hileras de árboles y arbustos, que se siembran para delimitar los bordes de una propiedad o sus divisiones internas. La técnica promueve la siembra de una o más hileras de árboles plantados de forma paralela a lo largo de una cerca o lindero de la propiedad, la ONF (2009;2013) recomienda espaciamientos de siembra de 2-6 metros, 2-5 metros en árboles de uso múltiple y de 4-6 metros en árboles maderables. Hay cercas vivas con diferentes usos como: forrajeras, producción de leña y maderables.

Cortinas rompevientos: Son hileras de árboles, arbustos o ambos; de diferentes alturas y dispuestos en sentido opuesto a la dirección principal del viento. Su función consiste en reducir la velocidad del viento, así se evita la pérdida de la fertilidad del suelo debido a erosión eólica, disminuye la acción mecánica del viento sobre los cultivos y animales, minimizar la evapotranspiración en áreas cultivadas y regular las condiciones microclimáticas. Para este tipo de arreglos la ONF (2009;2013) recomienda espaciamientos de siembra de 1-1,5 metros y el uso de la mayor cantidad de estratos posibles.

Algunas recomendaciones para favorecer la fauna según Calle et al (2014), tanto en cercas vivas como en otros SAF, son:

- Incluir al menos 10 especies de árboles.
- Utilizar árboles nativos, incluyendo epífitas y lianas.
- Conservar mínimo 40% de sombra a lo largo del año.
- Mantener alturas de 12-15 m, con diferentes estratos.
- Crear la mayor diversidad posible dentro del SAF.

Como se observa en la Figura 25, los arreglos de SAF anteriormente mencionados se pueden combinar en diferentes alternativas y usos, logrando diversificar la producción y su valor financiero para el propietario.

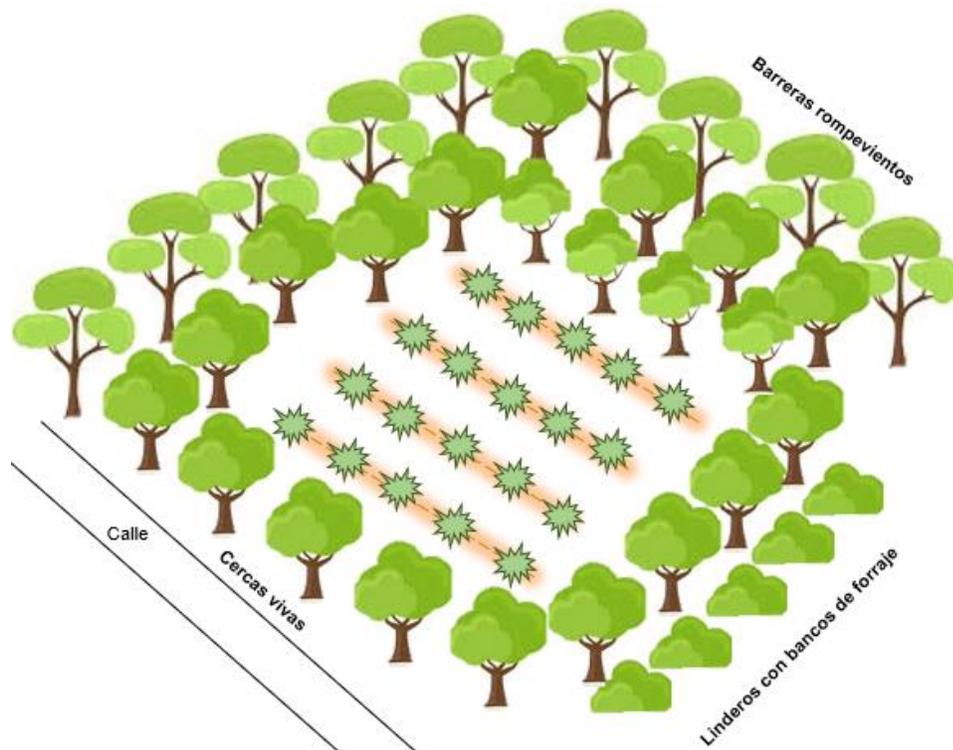


Figura 25. Opción 3 estrategia para restauración en la zona de influencia del CACO (cercas vivas y cortinas rompevientos).

Un estudio con cercas vivas en la provincia de Esparza, en Costa Rica comparó la presencia de aves en cercas vivas ubicadas a diferentes distancias de parches de bosque, y reveló que el número de aves en las cercas disminuye a mayor distancia del bosque (Calle et al, 2014). Por otro lado, el establecimiento de las cortinas no solo ha ayudado a reducir los daños producidos por el viento, sino que ha transformado el paisaje agrícola. La presencia de árboles, crea un hábitat para flora y fauna y genera un microclima propicio para la regeneración de especies forestales. Las cortinas también pueden facilitar el movimiento de animales cuando requieren cruzar el paisaje agrícola. Sin embargo, no se han realizado estudios que cuantifiquen ni documenten la biodiversidad presente en las cortinas

En la práctica, existe gran diversidad de sistemas que han sido desarrollados en respuesta a las condiciones particulares de cada sitio. Por lo tanto, no existe una receta aplicable en particular; lo recomendable es conocer las condiciones particulares de la finca y, luego, adaptar los sistemas de interés según las condiciones propias del sitio (ONF, 2013).

Es preciso destacar en primer lugar que la conservación, restauración y adecuado manejo de las cercas y linderos repercuten favorablemente en numerosos organismos silvestres tanto los que encuentran en dichos elementos alimento, refugio o lugar de reproducción como los que se desplazan a través de estos para poder atravesar la matriz agrícola (Gurrutxaga y Lozano, 2007).

Las estrategias anteriormente planteadas pretenden ser ayuda para la producción agrosilvopastoril sostenible, cuyo objetivo es apoyar actividades de desarrollo sostenible de tipo agrícola pecuario y forestal mediante la participación directa de las comunidades en la aplicación de sistemas agroforestales, silvopastoriles y agricultura conservacionista con énfasis en conservación de suelos y aguas en fincas.

Conclusiones.

- Mediante el uso de una imagen satelital Sentinel-2 y el algoritmo de clasificación supervisada se pudo determinar la cobertura vegetal para la zona de estudio, correspondiendo está a un 36,5% pastos, 30,62% bosque y 24,9% cultivos.
- Al realizar la clasificación supervisada se obtuvieron resultados que concuerdan con los vistos en campo. Debido a la dificultad de diferenciar entre las firmas espectrales de algunos usos del suelo, la clasificación se determinó con una exactitud total del 80%, y un valor de Kappa del 0,73, lo cual genera confianza en los resultados obtenidos.
- Sobre el criterio de expertos, aunque está influenciado por la subjetividad humana debido a las experiencias de cada persona, permite concluir cuales variables son consideradas de mayor importancia en este caso zonas de riesgo y cuerpos de agua con la misma puntuación.
- A través del análisis realizado se logró identificar las áreas prioritarias a restaurar las cuales se dividieron en tres categorías alta (297,8 ha) media (1932,4 ha) y baja (1526,2 ha).
- Es posible concluir que el uso combinado de la Evaluación Multicriterio (EMC) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite incorporar los criterios de priorización establecidos anteriormente y cumplir con el objetivo de seleccionar los sitios aptos para la restauración ecológica y de esta manera reducir los costos que representaría la recolección de dicha información en campo.
- Se generó cartografía para la zona que se puede utilizar como herramienta en la toma de decisiones sobre el manejo de recursos naturales y sobre la priorización que se deben dar a las labores de restauración en los terrenos de influencia del CACO.
- Sobre el análisis de conflicto de uso del suelo se identificó que el 56% presenta un uso correcto, 17% sobreuso y 19% subuso, donde las clases de pastos y

cultivos presentan un porcentaje considerable de sobre uso siendo este del 23% y 33%, respectivamente.

- Se logro crear una propuesta de restauración para los sitios seleccionados, que se adapten a las condiciones específicas de la zona y que rescaten los servicios ecosistémicos degradados
- La implementación de Sistemas Agroforestales, es un tema que muchos autores recomiendan implementar en la zona para combatir los problemas de degradación de la tierra, pero aun así se presenta poco interés de por su establecimiento y beneficios.

Recomendaciones.

- Recomendar una segunda fase de ejecución y monitoreo del proyecto, ya que la información generada es la línea base (diagnostico), por lo cual una segunda fase ayudara a ampliar el conocimiento de la zona y su estado, asimismo mejorar la base de datos actual.
- Crear un paquete tecnológico con todo lo respectivo al mantenimiento de los árboles, el cual se puede brindar a los productores en forma de afiches o manuales. Esto con el fin de verificar el adecuado establecimiento de los árboles control de la calidad de técnicas relacionadas con mantenimiento y protección forestal.
- Valorar las fuentes de material vegetal, alianza con viveros de la zona (ITCR, ICE), para ver la disponibilidad, calidad y costo económico para realizar la segunda fase del proyecto, sino valorar del mismo modo la construcción de un vivero forestal por parte del CACO para distribuir los árboles entre sus asociados.
- Hacer un análisis con cada productor sobre las capacidades y limitaciones de su terreno para que el uso este conforme a lo estipulado en la ley en cuanto a zonas de protección e idoneidad de las tierras para su uso productivo.
- El CACO, debe promover acciones de protección de los recursos naturales y educación ambiental mediante una estrategia de fomento a la restauración y prácticas interés en su zona de influencia y transmitir las a sus asociados mediante capacitaciones, medios impresos o electrónicos; para lograr un mayor alcance de estos y una incorporación de la comunidad.
- Realizar un ejercicio de cruces de información espacial, entre los datos obtenidos y los catastros de fincas, para determinar a nivel de propietario donde aplicar las técnicas de restauración.

Referencias.

- Abraira, V. (2001). *El índice Kappa. Unidad de Bioestadística*. Madrid, pp. 247-249. Recuperado de ftp://ftp.hrc.es/pub/bioest/diag/kappa_semergen.pdf
- Agencia Europea (2009). Firmas espectrales. Recuperado de: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html#a
- Alonso, A., Finegan, B., Brenes, C., Günter, S., Palomeque, X. (2017). Evaluación de la conectividad estructural y funcional en el corredor de conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador. *Caldasia* 39(1): 140- 156. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/cal>
- Barrientos, Z. y Monge, J.. (2010). Restauración ecológica en la meseta central de Costa Rica. *Biocenosis*, 23(2), 20-25. Recuperado de <https://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/biocenosis/article/viewFile/1240/1307>
- Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Harmand, J., Somarriba, E. y Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*, 10(37), 80-87.
- Berstch, F. (2004). El recurso suelo en Costa Rica. Decimo informe sobre el estado de la Nación en desarrollo humano sostenible. Recuperado de: http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/010/Bertsch_2004.pdf
- Campos, A. (2010). *Análisis de los cambios de cobertura de la cuenca alta y media del río Reventazón, Costa Rica, periodo 2000-2010* (tesis de grado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, pp. 17-19.
- Calle, A., Calle, Z., Garen, E. y A. Del Cid-Liccardi, eds. 2014. Simposio sobre Restauración Ecológica y Agropaisajes Sostenibles. *Iniciativa de Liderazgo y Capacitación Ambiental*. New Haven, CT: Universidad de Yale; Ciudad de Panamá: Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales.
- COBRI SURAC (Corredor Biológico Rivereño Interurbano Subcuenca Reventado Agua Caliente. (2007). Ficha técnica Corredor Biológico Rivereño Interurbano Subcuenca Reventado Agua Caliente, interconectando ecosistemas naturales y urbanos. Cartago, Costa Rica. Recuperado de: http://www.sinac.go.cr/corredoresbiologicos/documentacion/accvc/cb_cobrisurac.pdf

- COBRI – SURAC (Corredor Biológico Rivereño Interurbano Subcuenca Reventado Agua Caliente). (2014). Primer informe sobre inventario de aves COBRI SURAC. Cartago, Costa Rica.
- COBRI – SURAC (Corredor Biológico Rivereño Interurbano Subcuenca Reventado Agua Caliente). (2018). Ficha técnica de conectividad funcional del COBRI SURAC. Cartago, Costa Rica.
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias (CNE). (2002). Problemática del a Cuenca del Río Reventado-Cartago: Los aspectos de ocupación en área de amenaza natural múltiple y conflictos de uso del suelo en áreas con regulaciones preventivas, caso los Diques de Cartago. Recuperado de: <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc14438/doc14438.pdf>
- COMCURE. (2016). *Generalidades de la Cuenca del Río Reventazón – Parismina*. Recuperado de: <http://comcure.go.cr/la-cuenca/generalidades>
- CONAFOR. (2009). *Restauración de ecosistemas forestales: Guía para comunicadores*. México, pp. 11-21. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/579Restauraci%C3%B3n%20de%20ecosistemas%20forestales.pdf>
- CONAFOR. (2016). *Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados utilizando para reforestación solo especies nativas en zonas prioritarias*, p. 18. Recuperado de <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/gef/pdf/1.2-5-manual-mejores-practicas-restauracion-especies-nativas.pdf>
- Coronado, L. (2001). *Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto EMT+ de Landsat 7, en la identificación de bosques secundarios en la región Huetar Norte de Costa Rica*. Tesis Bachiller Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica, ITCR. 98 p.
- Dedios, N. (2006). Análisis de diferentes métodos de clasificación de una imagen satélite para caracterizar la superficie afectada por incendio forestal en ecosistemas de bosque seco. Recuperado de: http://www.fire.unifreiburg.de/globalNetworks/Caribbeans/SIMFOR%202006/Mimbe_la_es.pdf.
- Estrada, A. (2007). Fragmentación de la selva y agroecosistemas como reservorios de conservación de la fauna silvestre en Tuxtla México, México.
- Fallas, M. (2016). *Cobertura del suelo del año 2016 del cantón de Tarrazú, San José, Costa Rica* (tesis de grado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, pp. 10-11.

- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). (2014). *Pago de servicios ambientales*. Recuperado de <http://www.fonafifo.go.cr/psa/>
- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO). (2018). Distribución porcentual y montos de pago por Programa de Pago por Servicios Ambientales. Recuperado de: <http://www.fonafifo.go.cr/psa/estadisticas>.
- Fonseca, W., Chaves, H., y Rey, J. (2010). Cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de Costa Rica. *Revista Recursos Naturales y ambiente*, 59(60), 99-107.
- Gaitán, J. (2013). *Evaluación de erosión hídrica en los suelos bajo cobertura forestal y agrícola en la cuenca del río Reventazón*. Cartago, Costa Rica. Tesis para optar por el título de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal. ITCR. Cartago, Costa Rica.
- Galacho, F. y Ocaña, C. (2006) Tratamiento con SIG y técnicas de evaluación multicriterio de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanísticos, pp. 1509-1525. Recuperado de http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII_3/111%20-%20Galacho%20y%20Ocana.pdf
- Gálvez, J. (2002). LA RESTAURACION ECOLÓGICA: CONCEPTOS Y APLICACIONES. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Recursos Naturales y Ambiente. Guatemala. Disponible en: <http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/SERIETECNINCA/8.pdf>
- García, R. (2002). *Biología de la Conservación: conceptos y prácticas*. Heredia, Costa Rica. EINBIO.
- Gurrutxaga, M. y Lozano, J. (2007). Criterio para contemplar la conectividad del paisaje en la planificación territorial y sectorial. *Investigaciones Geográficas*, N° 44, 75-88. Recuperado de: <https://www.investigacionesgeograficas.com/article/view/2007-n44-criterios-para-contemplar-la-conectividad-del-paisaje-en-la-planificacion-territorial-y-sectorial>
- Hernández, M. (2016). *Priorización de terrenos a reforestar en la zona de protección hídrica del Embalse Arenal, Costa Rica* (tesis de postgrado). Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica, pp. 19-23.
- INDER. (2016). *Caracterización del territorio: Cartago - Oreamuno - El Guarco - La Unión*, pp. 8-10. Recuperado de: https://www.inder.go.cr/territorios_inder/region_central/caracterizaciones/Caracterizacion-territorio-Cartago-Oreamuno-El-Guarco-La-Union.pdf.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). (2014). *Atlas Digital de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.

- INEC. (2011). *Indicadores cantonales: Censos Nacionales de Población y Vivienda 2000 y 2011*. San José, Costa Rica, pp. 88-100.
- INEC. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Características de las Fincas y de las Personas Productoras* San José, Costa Rica, p. 14.
- Lamelas, M. (2012). Comparación de técnicas de evaluación multicriterio en sistemas de ayuda a la decisión espacial para la localización óptima de uso residencial. *Geographica*, 62, 89-114. Recuperado de [http://www.Dialnet-ComparacionDeTecnicasDeEvaluacionMulticriterioEnSi-4660451%20\(1\).pdf](http://www.Dialnet-ComparacionDeTecnicasDeEvaluacionMulticriterioEnSi-4660451%20(1).pdf)
- Laterra, P., Jobbágy, E. y Paruelo, J.. (2011). *Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA, pp. 141-150.
- Leyes y Decretos, (1994). Metodología Determinación Capacidad Uso Tierras Costa Rica N° 23214 MAG-MIRENEM. Título N°3. Descripción general de las clases de capacidad de uso. Costa Rica.
- Leyes y Decretos. (1996). Asamblea Legislativa. Ley Forestal N° 7575. Artículos N° 3 y N° 33. Costa Rica.
- Lanes, E., Marchamalo, M. y Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2). 217-335.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Vivir más allá de nuestros medios: bienes naturales y bienestar humano*. Recuperado de <http://www.millenniumassessment.org/en/Reports.aspx>
- Méndez, E. (2001). *Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica*. Tesis para optar por el título Magister Scientiae. Turrialba Costa Rica, CATIE. 73 p.
- Méndez, M., Martínez, C., Ceccon, E. y Guariguata, M. (2017). Planes actuales de restauración ecológica en Latinoamérica: Avances y omisiones. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2): 1-30.
- Municipio de Miranda-Cauca. (2001). *Esquema de ordenamiento territorial*, p. 205. Recuperado de <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/miranda/08%20COBERTURA%20Y%20USO.pdf>
- Murray, I., Blázquez, M. y Rullan, O.. (2005). Los cambios en la cobertura de la tierra. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 10(571), 1-5. Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-571.htm>.

- ONF (Oficina Nacional Forestal). (2009). Guía del productor para el establecimiento y manejo de plantaciones forestales comerciales (1era ed.). San José, Costa Rica: Comunicaciones Milenio.
- ONF (Oficina Nacional Forestal). (2013). Guía Técnica SAF para la implementación de sistemas agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables. San José, Costa Rica.
- Oliveira, J., Morales, G., García, A., Jaimez, E., López, M., Estrada, R. y Campos, M. (2011). El uso de SIG y la evaluación multicriterio para la determinación de escenarios peligrosos de inundaciones en cuencas fluviales. Estudio de caso Guanabo . Simposio llevado a cabo en el *X Congreso Cubano de informática y geociencias*. La Habana, Cuba, p. 6. Recuperado de http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011_Oliveira_GEOINF-O8.pdf
- Ortiz, E. (2014). *Atlas Digital de Costa Rica* (1 era ed). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Pozzobon, E. y Gutiérrez, J.. (2003). Utilización de un sistema de información geográfica para la selección y priorización de áreas a reforestar en los alrededores de la ciudad de Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezuela*, 47(2), 61-72.
- Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS). (2016). Consultoría: Plan de Uso del Suelo para las faldas del Volcán Irazú. Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <http://www.sinac.go.cr/ES/docu/coop/proy/Informe%20Final%20Plan%20de%20Uso%20del%20Suelo.pdf>
- Quesada, R. (2007). Los bosques de Costa Rica. Centro De Investigación Integración Bosque Industria. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica
- Ramírez, L., McHugh, A. y Alvarado, A.. (2008). Evolución histórica y caracterización socioeconómica, de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. . *Agronomía Costarricense*, 32(2), 53-72. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/436/43632204/>
- Ramírez, L., Alvarado, A., Pujol, R., McHugh, A. y Brenes, L..(2008). Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 32(2), 93-118. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/436/43632206/>
- Reyes, H., Aguilar, M., Aguirre, J. y Trejos, I.. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San luis Potosí, Mexico, 1973-2000. *Investigaciones geográficas*, 59. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112006000100003

- Richters, E. (1986). *Clasificación y priorización de cuencas hidrográficas: un concepto general*. En Seminario taller “Metodologías de priorización de cuencas” [Ciudad de Panamá. PN. 13 – 16 May 1986] Proyecto Regional de Manejo de Cuencas / CATIE, pp.108-124.
- Rodríguez, J., González, X. y Arias, P. (s.f.). *Cartografía de usos del suelo por fotointerpretación mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG): análisis comparativo de los sistemas ráster y vectorial*, p. 1516. Recuperado de <https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/3033/Perez.pdf?sequence=1>
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación). (2008). *Programa de turismo en Áreas Silvestres Protegidas/Proyecto fortalecimiento del programa de turismo en Áreas Silvestres Protegidas: Plan de turismo sostenible del Parque Nacional Volcán Irazú*. Recuperado de <http://www.sinac.go.cr/ES/transprncia/Planificacin%20y%20Gestin%20BID/Gesti%C3%B3n%20Sostenible%20del%20Turismo%20en%20ASP/Planes%20de%20Turismo%2010%20ASP/Plan%20de%20Turismo%20Sostenible%20del%20PN%20Volc%C3%A1n%20Iraz%C3%BA.pdf>
- Sánchez, M., Fernández, A. y Illera, P. (1999). Los sistemas de información geográfica en la gestión forestal. *Teledetección avances y aplicaciones*. Simposio llevado a cabo en el VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España, pp. 1-5.
- Salido-Pérez, G. (2013). *Buenas prácticas para la definición de redes ecológicas en España. Situación actual, herramientas disponibles y propuestas de mejora*. Universidad de Alicante y WWF España. España. Recuperado de http://awsassets.wwf.es/downloads/buenas_practicas_para_la_definicion_de_redes_ecologicas_en_espana_gr.pdf
- Torres, G., Rojas, F., Carvajal, D. y Arguedas M. (2010). *Reproducción de especies arbóreas y arbustivas para la región central de Costa Rica*. GERMINAR 2. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- UICN. (2015). *Especies para la restauración*. Recuperado de: <https://www.especiesrestauracion-uicn.org/index.php>
- Valpreda, E. (2005). *Sistemas de Información Geográfica (SIG)-Teledetección y Evaluación Multicriterio (EMC) en un estudio de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)*. Instituto de Cartografía, Investigación y Formación para el ordenamiento territorial (CIFOT). Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo. Recuperado de: <http://geo.exa.unrc.edu.ar/Posgrado/ARCHIVOS%20UTILES/1-033-Valpreda.pdf>
- Vargas, O. (2007). *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. Universidad Nacional de Colombia: Facultas de Ciencias. Colombia, pp. 17-35.

Vargas, Y. (2017). *Determinación del índice de calidad riparia y propuesta para la restauración ecológica de la cuenca alta del río Reventazón, Cartago Costa Rica*. (trabajo final de graduación para optar por el título de licenciatura). Escuela de Ingeniería Forestal. ITCR. Cartago, Costa Rica.

Villalva, S. y Fuentes, Q. (s.f.). *Agricultura sostenible*, pp. 2-4. Recuperado de http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_07.pdf

Veluk, F. (2010). *Restauración del paisaje forestal y planificación participativa como herramientas para la transformación del territorio y medios de vida en el altiplano del departamento de San Marcos, Guatemala* (tesis de postgrado). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, p. 2.

Veluk, F. (2012). Mapeo de áreas prioritarias para la restauración del paisaje forestal y mejora de los medios de vida de las comunidades rurales del altiplano de San Marcos, Guatemala. *BOIS ET FORESTS DES TROPIQUES*, 313(3), 73-83. Recuperado de <http://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/viewFile/20498/20257>

Anexos.

Anexo 1. Formulario para la recolección de información en campo.

Fecha _____ GPS _____ Hora inicial _____
Anotador _____ Lugar _____ Hora final _____

Punto	Coord X	Coord Y	Distancia	Azimut	Clase	Observación

Fuente: elaboración propia, 2018.

Anexo 2. Especificaciones de la imagen sentinel-2

Las imágenes Sentinel-2 son obtenidas de una flota de 2 satélites (Sentinel 2A lanzado el 23 de junio del 2015 y Sentinel 2B lanzado el 7 de marzo del 2017), que proporciona imágenes al programa Copernicus, de la Comisión Europea. Sentinel 2, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación. La misión proporcionará sobre todo información útil para las prácticas agrícolas y forestales, y para gestionar la seguridad alimentaria.

Banda	Resolución (m)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Propósito
B01	60	443	20	Detección de Aerosol
B02	10	490	65	Azul
B03	10	560	35	Verde
B04	10	665	30	Rojo
B05	20	705	15	Clasificación de vegetación
B06	20	740	15	Clasificación de vegetación
B07	20	783	20	Clasificación de vegetación
B08	10	842	115	Infrarrojo cercano

Banda	Resolución (m)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Propósito
B08A	20	865	20	Clasificación de vegetación
B09	60	945	20	Vapor de agua
B10	60	1375	30	Cirrus
B11	20	1610	90	Nieve/nubes/hielo
B12	20	2190	180	Nieve/nubes/hielo

Fuente: ESA, 2009

Anexo 3. Matriz de Saaty para la recolección de información de priorización por criterio experto.

Variable	Cobertura vegetal	Capacidad de uso del suelo	Cuerpos de agua	Vías de acceso	Pendiente	Suma	Valor de Preferencia
Cobertura vegetal	1					1	0,2
Capacidad de uso del suelo		1				1	0,2
Cuerpos de agua			1			1	0,2
Vías de acceso				1		1	0,2
Pendiente					1	1	0,2
SUMA						5	

Fuente: Hernández, 2016.

Anexo 4. Escala de preferencias de Saaty, para completar la priorización.

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo

Intensidad	Definición	Explicación
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre otra
5	Fuerte importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre otra
7	Muy fuerte o demostrada importancia	Una actividad es mucho más favorecida que otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema Importancia	La evidencia favorece una actividad sobre otra; es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre los valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

Fuente: Hernández, 2016.

Anexo 5. Modificación de la matriz de Saaty para la recolección de información para la priorización por criterio de expertos, 2018.

Cobertura vegetal		vs	Capacidad de uso		
Agua		vs	Inclinación del terreno		
Zonas de riesgo		vs	Cobertura Vegetal		
Capacidad de uso		vs	Zonas de riesgo		
Cobertura vegetal		vs	Inclinación del terreno		
Inclinación del terreno		vs	Capacidad de uso		
Cobertura vegetal		vs	Agua		
Zonas de riesgo		vs	Inclinación del terreno		
Capacidad de uso		vs	Agua		
Agua		vs	Zonas de riesgo		

Fuente: elaboración propia, 2018.

Anexo 6. Modificación de la escala de preferencias de Saaty, para completar la priorización, 2018.

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
2	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre otra
3	Fuerte importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre otra
4	Muy fuerte o demostrada importancia	Una actividad es mucho más favorecida que otra; su predominancia se demostró en la práctica
5	Extrema Importancia	La evidencia favorece una actividad sobre otra; es absoluta y totalmente clara

Fuente: elaboración propia, 2018.

Anexo 7. Lista de especies forestales recomendadas para la restauración.

Nombre Científico	Nombre Común	Porte	Tipo	Usos			
				Estabilización de suelos	Conservación de agua	Control de la erosión	Alimento de fauna
<i>Senna pallida</i>	Abejón	Pequeño	Arbusto	X	X	X	X
<i>Dodonea viscosa</i>	Alí/Chirca de monte	Pequeño	Arbusto	X	X	X	
<i>Morella cerifera</i>	Arrayán/Cerillo	Pequeño	Arbusto	X	X	X	X
<i>Calliandra calothyrsus</i>	Cabello de ángel	Pequeño	Arbusto	X	X	X	X
<i>Tecoma stans</i>	Candelillo/Vainillo	Pequeño	Arbusto	X		X	X
<i>Acacia angustissima</i>	Carboncillo	Pequeño	Arbusto		X		X
<i>Drimys granadiensis</i>	Chilemué	Pequeño	Árbol	X	X	X	X
<i>Psidium guajava</i>	Guayaba	Pequeño	Árbol	X	X	X	X
<i>Malpighia glabra</i>	Mariquita/Acerola	Pequeño	Arbusto	X		X	X
<i>Sambucus canadensis</i>	Sauco	Pequeño	Arbusto	X		X	X
<i>Ardisia compressa</i>	Tucuico	Pequeño	Arbusto	X	X	X	X

Nombre Científico	Nombre Común	Porte	Tipo	Usos			Alimento de fauna
				Estabilización de suelos	Conservación de agua	Control de la erosión	
<i>Oreopanax xalapensis</i>	Cacho de venado	Mediano	Árbol		X	X	X
<i>Croton niveus</i>	Colpachí	Mediano	Arbusto	X	X	X	X
<i>Citharexylum mocinni</i>	Dama/Dama peluda	Mediano	Árbol	X	X	X	X
<i>Prunus annularis</i>	Duraznillo/Ciruelo	Mediano	Árbol		X	X	X
<i>Diphysia americana</i>	Guachipelín	Mediano	Árbol		X	X	X
<i>Acnistus arborescens</i>	Güitite	Mediano	Arbusto		X		
<i>Pimienta dioica</i>	Jamaica	Mediano	Árbol	X	X	X	X
<i>Casimiroa edulis</i>	Matasano/ Tapaculo	Mediano	Árbol		X	X	X
<i>Myrcianthes fragrans var hispidula</i>	Murta	Mediano	Arbusto		X	X	X
<i>Psidium sartorianum</i>	Pisco/Guayabillo	Mediano	Árbol	X	X	X	X
<i>Senna spectabilis</i>	Vainillo/Candelillo	Mediano	Árbol	X	X	X	
<i>Heliocarpus appendiculatus</i>	Burío	Alto	Árbol	X	X		
<i>Cedrela salvadorensis</i>	Cedro	Alto	Árbol		X	X	
<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba	Alto	Árbol		X		
<i>Tapirira mexicana</i>	Cirrí blanco	Alto	Árbol		X	X	X
<i>Citharexylum donnell-smithii</i>	Dama	Alto	Árbol	X	X	X	X
<i>Erythrina fusca</i>	Poró copey/Poró blanco	Alto	Árbol			X	
<i>Erythrina berteriana</i>	Poró/Poró tico	Alto	Árbol			X	
<i>Ehretia latifolia</i>	Raspagua cal	Alto	Árbol		X	X	X
<i>Astronium graveolens</i>	Ron ron	Alto	Árbol	X	X	X	
<i>Hauya lucida</i>	Supara/Tubús	Alto	Árbol		X	X	X
<i>Croton draco</i>	Targuá	Alto	Árbol		X	X	X
<i>Persea schiedeana</i>	Yas/Aguacatón	Alto	Árbol		X	X	X
<i>Sapium macrocarpum</i>	Yos	Alto	Árbol		X	X	X

Nombre Científico	Nombre Común	Porte	Tipo	Usos			Alimento de fauna
				Estabilización de suelos	Conservación de agua	Control de la erosión	
<i>Leucaena</i>	Leucaena	Bajo	Arbusto	X	X	X	
<i>Leucocephala</i>							
<i>Trichanthera gigantea</i>	Nacedero	Bajo	Arbusto	X	X	X	
<i>Tithonia diversiflora</i>	Botón de oro	Bajo	Arbusto	X	X	X	

Fuente: Germinar, 2010; UICN, 2015.

Anexo 8. Prácticas de Conservación de suelos y agua, según clase del suelo Decreto N° 23212- MAG-MIRENEM.

Descripción De las Prácticas	Clases						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Levantamiento Topográfico	X	X	X	X	X	X	X
Estudios de suelo	X	X	X	X	X	X	X
Planificación agro conservación de fincas	X	X	X	X	X	X	X
Canal de Guardia		X	X	X	X	X	
Acequias de laderas			X	X		X	
Terrazas de huerto			X	X		X	
Terrazas de desviación		X	X	X			
Muros de Piedra		X	X	X		X	
Vía de agua empastada		X	X	X		X	
Camino de acceso y drenaje		X	X	X	X	X	
Cortinas rompe vientos		X	X	X	X	X	
Surcos en contorno en pastizales					X		
Establecimiento de cercas		X	X	X	X	X	X
Canal de desviación			X	X		X	
Estanque de agua		X	X	X	X	X	X
Represa de agua		X	X	X	X	X	X
Diques en contorno (melgas)		X		X			
Canal de infiltración			X	X	X	X	
Terraza de banco			X	X		X	
Terraza individual				X		X	
No labranza	X	X	X	X	X	X	
Labranza mínima	X	X	X	X	X	X	

Descripción De las Prácticas	Clases						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Labranza profunda		X	X	X			
Roturación profunda		X	X	X			
Labranzas Superficiales (reducidas)	X	X	X	X			
Labranza de contorno		X	X	X		X	
Siembra en contorno		X	X	X		X	
Barreras vivas		X	X	X		X	
Barreras muertas		X	X	X		X	
Rotación de cultivos	X	X	X	X		X	
Cultivos intercalados	X	X	X	X		X	
Cultivos en fajas	X	X	X	X		X	
Apartos para pastoreo en rotación					X		
Cobertura muerta		X	X	X		X	
Mulching		X	X	X		X	
Cultivo de cobertura		X	X	X		X	
Barbecho mejorado		X	X	X			
Sistemas Agroforestales		X	X	X		X	
Enmiendas orgánicas animales	X	X	X	X	X	X	
Compost	X	X	X	X		X	
Abono verde	X	X	X	X	X	X	
Fertilización y enmiendas minerales	X	X	X	X	X	X	
Control de cárcavas						X	X
Control de deslizamiento						X	X
Control de inundación	X		X	X	X		
Desaguadero lateral		X	X	X	X	X	
Aprovechamiento de manantial		X	X	X	X	X	X
Sistema de riego		X	X	X	X	X	
Ubicación de bebederos					X		

Fuente: ProDUS, 2016.