

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

DISEÑO DE OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN LA FINCA LECHERA  
ALTO FRESCO, UBICADA EN CAPELLADES DE ALVARADO.

MARÍA LAURA ARIAS NÚÑEZ

CARTAGO, 2021

*Diseño De Obras De Conservación De Suelos En La Finca Lechera Alto Fresco, Ubicada En Capellades De Alvarado. © 2021 by María Laura Arias Núñez is licensed under CC BY-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>*

**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA TRABAJOS DE GRADUACION**

A las 17:00 horas del día 01 del mes de Diciembre del año 2021 la estudiante:  
María Laura Arias Núñez  
presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:  
DISEÑO DE OBRAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN LA FINCA  
LECHERA ALTO FRESCO, UBICADA EN CAPELLADES DE ALVARADO.

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Laura Segura Serrano

Asesor (a) de la Escuela: Karolina Villagra Mendoza

Lector (a): Edwin Esquivel Segura

Firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación:

LAURA PATRICIA SERRANO (FIRMA)  
Firmado digitalmente por LAURA PATRICIA SERRANO (FIRMA)  
Fecha: 2021.12.16 14:49:59 -06'00'

PRESIDENTE (A)

Firma digital por : KAROLINA VILLAGRA MENDOZA (FIRMA)  
Fecha: 2021.12.21 16:06:58 -06:00  
Razón: Estoy de acuerdo  
Localización: Tecnológico de Costa Rica

ASESOR (A) DE LA ESCUELA

EDWIN ANTONIO ESQUIVEL SEGURA (FIRMA)  
Firmado digitalmente por EDWIN ANTONIO ESQUIVEL SEGURA (FIRMA)  
Fecha: 2021.12.17 19:43:59 -06'00'

LECTOR (A)

ESTUDIANTE

## Dedicatoria

*A Dios y a la Virgen que me han iluminado en este camino y me dieron la inspiración para dar todo mi esfuerzo en este proyecto. A mis padres, Rebeca Núñez y Germán Arias porque sin ellos nada de esto sería posible. Les agradezco en el alma todo el esfuerzo y sacrificio que pusieron en formar la mujer que hoy en día soy. Les agradezco cada abrazo y palabra de aliento que me dieron, ustedes me empoderaron y me hicieron sentir capaz de lograr mi gran sueño que concluye con este proyecto.*

*A mi hermana Daniela Arias por su amor incondicional, por siempre procurar mi bienestar y mi adecuada alimentación. Gracias por llenarme de alegría en los momentos difíciles, por tu consuelo y consejo y por ser la hermana más maravillosa que alguien pueda merecer. Ella me ha enseñado mi vocación y me ha ayudado a ponerla en práctica, gracias hermanita por tantos regalos que le has dado a mi vida.*

*A mi abuela Cira Salazar por ser de los principales motores de mi vida, le doy gracias a Dios por ponerte en mi vida y que seas como mi segunda mamá. Gracias por tus besos, tus abrazos y las palabras de aliento que nunca te faltan. Con tus virtudes me has enseñado a ser fuerte y a levantarme hasta de las caídas más grandes. También agradezco a mis ahijados Mia Núñez y Mario Núñez, por llenarme la vida de dulzura y darme una razón más para salir adelante.*

*A mi novio Marco Antonio Martínez, por ser un ángel desde que llego a mi vida. Te dedico este gran triunfo porque has sido parte de este proyecto, alentándome con tus palabras sinceras y llenándome de amor con tus cuidados y ternura. Gracias por la comprensión y amor que tuviste durante todo este proceso y por tus consejos tan acertados.*

*A cada una de estas personas y al resto de mi familia les agradezco por ayudarme a lograr este triunfo tan añorado.*

## **Agradecimientos**

*Un gran agradecimiento a mi asesora de tesis y profesora, Karolina Villagra, por compartir conmigo su conocimiento y brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto. Le agradezco su empatía y ayuda incondicional durante este proceso.*

*Al profesor Edwin Esquivel por brindarme su ayuda en todo momento y por permitirme la gran experiencia de aprender metodologías de trabajo en el laboratorio de suelos. Gracias por su confianza en mi proyecto.*

*A Beatriz Molina por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en la finca Alto Fresco y por brindarme el transporte y asesoramiento necesario.*

*A Marco Antonio Martínez y a sus padres Laura Martínez y Mario Martínez, por brindarme transporte y ayudarme en los momentos más difíciles del muestreo, gracias por los termos de café y alimentación que me facilitaron para lograr con éxito la primera fase del proyecto.*

*A mi madre Rebeca Núñez y a mi hermana Daniela Arias, por ayudarme en múltiples ocasiones a muestrear la finca Alto Fresco y por brindarme un rayito de alegría incluso en los días más lluviosos de trabajo.*

*Finalmente a las Escuelas de Ingeniería Agrícola e Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica, por brindarme todo el equipo necesario para realizar el trabajo de campo y de laboratorio.*

## **ÍNDICE DE CONTENIDO**

## Índice de contenidos

<b>RESUMEN</b> .....	<b>16</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>18</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
<b>Objetivo general</b> .....	<b>24</b>
<b>Objetivos específicos.</b> .....	<b>24</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1. Estado de la erosión en la cuenca del Reventazón</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2. Causas de la degradación del suelo</b> .....	<b>27</b>
3.2.1. Ordenes de suelo en la cuenca del Reventazón.....	28
3.2.2. Compactación del suelo .....	29
3.2.3. Efecto ganadero.....	30
3.2.4. Materia Orgánica (MO) y Mineralización.....	31
3.2.5. Condiciones hidráulicas .....	32
3.2.6. Condiciones Hidrológicas .....	33
3.2.7. Condiciones Topográficas.....	34
3.2.8. Dinámica del cambio de uso del suelo .....	34
3.2.9. Estabilidad de la ladera .....	35
<b>3.3. Estimación de las pérdidas del suelo</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4. Manejo óptimo de la finca</b> .....	<b>38</b>
3.4.1. Acequias de ladera .....	38
3.4.2. Construcción de diques de piedra.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.3. Barreras vivas.....	38
3.4.4. Agroforestería con regeneración natural .....	39
3.4.5. Terrazas individuales para el aprovechamiento forestal .....	40
3.4.6. Dique de piedra y postes .....	40
3.4.7. Rediseño de apartos.....	41
3.4.8. Manejo de ganado estabulado. ....	42
3.4.9. Alimentación del ganado.....	44
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1. Descripción de la zona de estudio</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2. Capacidad de uso de la tierra</b> .....	<b>48</b>
<b>4.3. Estabilidad de ladera</b> .....	<b>50</b>
4.3.1. Escorrentía.....	50
4.3.2. Cálculo de la precipitación de diseño.....	50
4.3.3. Cálculo de número de curva (NC).....	51
4.3.4. Estabilidad de Ladera .....	52
<b>4.4. RUSLE</b> .....	<b>54</b>

4.4.1.	Levantamiento Topográfico .....	55
4.4.2.	Geoproceso.....	55
4.4.3.	Erosividad (R) .....	57
4.4.4.	Erodabilidad (K).....	59
4.4.5.	Infiltración .....	64
4.4.6.	Factor de Inclinación y Longitud (LS).....	66
4.4.7.	Cobertura (C).....	67
4.4.8.	Prácticas (P).....	67
4.4.9.	Obtención de mapa del estado de erosión actual.....	67
<b>4.5.</b>	<b>Técnicas agronómicas .....</b>	<b>68</b>
4.5.1.	Construcción de diques de piedra.....	68
4.5.2.	Rotación de potreros.....	69
4.5.3.	Cercas vivas.....	70
4.5.4.	Bancos Forrajeros.....	71
4.5.5.	Ganado Estabulado.....	71
4.5.6.	Compost. ....	72
<b>4.6.</b>	<b>Propuesta Hidráulica .....</b>	<b>72</b>
4.6.1.	Terrazas individuales.....	72
<b>4.7.</b>	<b>Estimación de pérdidas por erosión tomando en cuenta la propuesta de diseño.....</b>	<b>75</b>
<b>4.8.</b>	<b>Análisis Económico .....</b>	<b>76</b>
<b>4.9.</b>	<b>Análisis ambiental .....</b>	<b>76</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>78</b>
<b>5.1.</b>	<b>Ubicación geográfica de la finca Alto Fresco.....</b>	<b>79</b>
<b>5.2.</b>	<b>Zonificación de la finca Alto Fresco. ....</b>	<b>80</b>
<b>5.3.</b>	<b>Clasificación del uso de la tierra .....</b>	<b>81</b>
<b>5.4.</b>	<b>RUSLE .....</b>	<b>83</b>
5.4.1.	Erosividad (R) .....	83
5.4.2.	Erodabilidad (K).....	84
5.4.3.	Longitud e Inclinación (LS) .....	85
5.4.4.	Cobertura (C).....	86
5.4.5.	Prácticas (P).....	86
<b>5.4.6.</b>	<b>Mapa de situación actual de la finca Alto Fresco. ....</b>	<b>87</b>
<b>5.5.</b>	<b>Estabilidad de ladera .....</b>	<b>87</b>
<b>5.6.</b>	<b>Propuesta agronómica .....</b>	<b>89</b>
<b>5.7.</b>	<b>Propuesta hidráulica .....</b>	<b>95</b>
<b>5.8.</b>	<b>Estimación de pérdidas de suelo empleando el diseño propuesto.....</b>	<b>97</b>
<b>5.9.</b>	<b>Demostración de la hipótesis de estudio.....</b>	<b>101</b>
<b>5.10.</b>	<b>Análisis económico .....</b>	<b>102</b>
<b>5.11.</b>	<b>Análisis ambiental .....</b>	<b>104</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>105</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>107</b>

<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>109</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## **ÍNDICE DE CUADROS**

Cuadro 1. Ordenes de suelo de la cuenca del Reventazón. ....	29
Cuadro 2. Equivalencia a Unidades Animal. ....	41
Cuadro 3. Código USLE según tipo de estructura. ....	60
Cuadro 4. Código de permeabilidad según conductividad hidráulica. ....	60
Cuadro 5. Parámetros obtenidos en laboratorio. ....	60
Cuadro 6. Distanciamiento entre diques según la pendiente del terreno. ....	68
Cuadro 7. Variantes en el calculo de las RUSLE. ....	76
Cuadro 8. Carga animal de la finca Alto Fresco. ....	89
Cuadro 9. Área de infraestructura actual de la finca Alto Fresco. ....	90
Cuadro 10. Diseño de apartos en la finca Alto Fresco. ....	92
Cuadro 11. Parámetros de corte y relleno para la construcción de terrazas individuales. ....	96
Cuadro 12. Densidad de siembra y construcción de terrazas. ....	96
Cuadro 13. Caudal de esorrentía por zona de plantación. ....	97
Cuadro 14. Costos de implementación de propuesta. ....	102
Cuadro 15. Costos de producción de aguacate. ....	103
Cuadro 16. Proyección de producción de aguacate hass. ....	103
Cuadro 17. Valoración previa ambiental del proyecto, resultados D1 de formulario SETENA. .....	104

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Diagrama de Shield's.....	36
Figura 2. Diagrama metodológico.....	47
Figura 3. Distribución del área para la construcción de terrazas individuales.....	73
Figura 4. Ubicación de la finca Alto Fresco en la cuenca del Reventazón.....	79
Figura 5. Influencia de ríos en la finca Alto Fresco.....	80
Figura 6. Zonificación de la finca Alto Fresco.....	81
Figura 7. Clasificación del uso de la tierra en la finca Alto Fresco.....	82
Figura 8. Validación de la capacidad de uso de la tierra en la finca Alto Fresco.....	83
Figura 9. Factor de erodabilidad de la finca Alto Fresco.....	84
Figura 10. Factor de Longitud e Inclinación de la finca Alto Fresco.....	85
Figura 11. Factor de cobertura de la finca Alto Fresco.....	86
Figura 12. Mapa de pérdidas de suelo actuales en la finca Alto Fresco.....	87
Figura 13. Clasificación de inestabilidad de ladera.....	88
Figura 14. Mapa de zonas aptas para la ganadería.....	90
Figura 15. Diseño de apartos.....	93
Figura 16. Propuesta de cambio de cobertura para la finca Alto Fresco.....	94
Figura 17. Ubicación de siembra de aguacate en terrazas individuales.....	95
Figura 18. Propuestas de mejora para el factor P.....	98
Figura 19. RUSLE mejorada.....	99
Figura 20. Porcentaje de mejoría en pérdidas por erosión.....	100
Figura 21. Gráfico de pendiente vs Infiltración.....	101

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1. Clases de capacidad de uso.....	117
Anexo 2. Subclases de capacidad de uso. ....	119
Anexo 3. Clasificación de la Pendiente.....	119
Anexo 4. Clasificación de la erosión.....	120
Anexo 5. Clasificación de profundidad.....	120
Anexo 6. Clasificación textural.....	121
Anexo 7. Clasificación de la pedregosidad.....	122
Anexo 8. Clasificación de la fertilidad.....	123
Anexo 9. Clasificación de la toxicidad.....	123
Anexo 10. Clasificación de suelos salinos.....	124
Anexo 11. Clasificación de la salinidad del suelo.....	124
Anexo 12. Clasificación de drenaje.....	125
Anexo 13. Clasificación de riesgo de inundación.....	126
Anexo 14. Clasificación de zonas de vida.....	126
Anexo 15. Duración del periodo seco.....	127
Anexo 16. Clasificación de la neblina.....	128
Anexo 17. Velocidad del viento.....	129
Anexo 18. Condición Hidrológica.....	129
Anexo 19. Clasificación hidrológica de los suelos.....	130
Anexo 20. Curvas de escorrentía para los complejos suelo-cobertura (NC), para condición de humedad II Ia=0.2S.....	130
Anexo 21. Condición de Humedad Antecedente.....	131
Anexo 22. Número de curva (NC), para condición de humedad (CHA), I y III.....	131
Anexo 23. Geoproceso de la herramienta topo to raster.....	133
Anexo 24. Enviroment settings de la herramienta topo to raster.....	134
Anexo 25. Geoproceso de la herramienta Contour.....	135
Anexo 26. Geoproceso de la herramienta Flow Direction.....	135
Anexo 27. Geoproceso de la herramienta Slope.....	136
Anexo 28. Raster Calculator de los 12 rasters de precipitación mensual.....	136
Anexo 29. Raster calculator para índice modificado de Fournier.....	137
Anexo 30. Raster calculator para factor de erosividad (R).....	137
Anexo 31. Nomograma para estimar la erodabilidad del suelo.....	138
Anexo 32. Triangulo textural.....	139
Anexo 33. Cálculo de pendiente en radianes.....	140
Anexo 34. Relleno de sumideros mediante la herramienta Fill.....	140
Anexo 35. Flow direction.....	141
Anexo 36. Flow accumulation.....	141
Anexo 37. Cálculo del factor LS.....	142
Anexo 38. Factor de cobertura.....	143
Anexo 39. Factor de prácticas.....	143
Anexo 40. Cálculo de la RUSLE.....	144
Anexo 41. Resultados de textura mediante el método de Bouyucos.....	145
Anexo 42. Resultados de distribución de partículas en la finca Alto Fresco.....	146
Anexo 43. Resultados de %MO para muestra representativa de la finca Alto Fresco.....	147

Anexo 44. Conductividad hidráulica para cada zona de muestreo de la finca Alto Fresco. ...	148
Anexo 45. Factores empleados para la obtención de la erodabilidad en la finca Alto Fresco.	149
Anexo 46. Pendiente de la finca Alto Fresco en porcentaje.....	151
Anexo 47. Pendiente de la finca Alto Fresco en grados.....	152
Anexo 48. Dirección de flujo según áreas de zonificación de la finca Alto Fresco.....	153
Anexo 49. Parámetros $t^*$ y $Re^*$ que indican estabilidad de la ladera en las zonas de estudio de la finca Alto Fresco. ....	154
Anexo 50. Cálculo de parámetros de corte y relleno completos. ....	155

## **RESUMEN**

La producción ganadera sostenible es un reto que se debe enfrentar desde la perspectiva de las obras de conservación. La finca Alto Fresco deja en evidencia cómo la falta de cobertura y prácticas conservacionistas causan daños al suelo y a la productividad. Debido a esta problemática, se ha propuesto emplear herramientas geoespaciales con el fin de medir la estabilidad de la ladera y las pérdidas en toneladas por hectárea anuales. El estudio se realizó en 8,55 ha de terreno las cuales se dividieron en 32 zonas de muestreo donde se obtuvieron los resultados necesarios para la obtención del mapa del estado de erosión actual de la finca.

Conociendo la situación actual de la finca se procedió a proponer diseños agronómicos e hidráulicos con la finalidad de mejorar la cobertura del suelo y las prácticas de conservación del área de estudio. Se realizaron propuestas como terrazas individuales, cercas vivas, barreras vivas, diques de piedra, estabulación de ganado, rotación de aptos, plantación de pastos y arbustos forrajeros para alimentar el ganado y el uso de los desechos animales en abono bokashi.

Realizando una extrapolación de las propuestas de diseño a la realidad actual de la finca, se obtuvieron mejoras de hasta un 95% en las pérdidas de suelo. Por otra parte, se aseguró una ganancia 1,86 veces mayor a la inversión realizada. Por otra parte, se corroboró la viabilidad ambiental del proyecto mediante la matriz D1 de SETENA.

Se concluyó que el uso óptimo para la finca Alto Fresco es el forestal bajo la categoría de conservación utilizando terrazas individuales ya que reduce la erosión en un 95%

Se recomienda el cambio inmediato de la modalidad de pastoreo a estabulación completa del ganado. Debido a que, la mayoría de las zonas de la finca no son aptas para la actividad pecuaria.

**Palabras Clave:** erosión, RUSLE, análisis geoespacial, uso de suelo, cobertura.

## **ABSTRACT**

Sustainable livestock production is a challenge that must be faced from the perspective of conservation works. The farm Alto Fresco shows how the lack of coverage and conservation practices cause damage to the soil and productivity. Due to this problem, it has been proposed to use geospatial tools to measure the stability of the slope and the annual losses of tons per hectare. The study was carried out in 8.55 ha of land which were divided into 32 sampling areas where the necessary results were obtained to obtain the map of the current state of erosion of the farm.

Knowing the current situation of the farm, we proceeded to propose agronomic and hydraulic designs to improve the soil cover and the conservation practices of the study area. Proposals were made such as individual terraces, live fences, live barriers, stone dams, livestock stables, rotation of apparatus, planting grasses and fodder shrubs to feed livestock and the use of animal waste in bokashi compost.

By extrapolating the design proposals to the current reality of the farm, improvements of up to 95% were obtained in soil losses. On the other hand, a profit 1,86 times greater than the investment made was assured. On the other hand, the environmental viability of the project was corroborated using SETENA's D1 matrix.

It was concluded that the optimal use for the Alto Fresco farm is forestry under the conservation category using individual terraces since it reduces erosion by 95%

The immediate change from grazing to full stabling of livestock is recommended because most areas of the farm are not suitable for livestock activity.

**Key Words:** erosion, RUSLE, geospatial analysis, land use, coverage.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los suelos del mundo se están deteriorando rápidamente debido a la erosión, el agotamiento de los nutrientes, la pérdida de carbono orgánico, el sellado del suelo y otras amenazas, por esta razón las prácticas de manejo sostenible de suelo son de suma importancia, ya que con estas se puede lograr una reversión del proceso de degradación de este recurso tan importante para los seres humanos (FAO, 2015).

En Costa Rica el 10% de los suelos padecen de problemas de erosión, debido a un alto impacto referente a la producción agropecuaria (FAO, 2015). La mayoría de los suelos que son afectados en el país son los que poseen alta materia orgánica y pendientes sumamente elevadas. Este es el caso de los suelos pertenecientes a la Cuenca del Río Reventazón, zona donde se encuentra el sector de estudio del presente proyecto. En esta cuenca, la capacidad de uso de la tierra demuestra que solo el 14 % del área tiene capacidad de uso agrícola, si se tomara en cuenta el área apta para cultivos perennes y reforestación comercial la cifra alcanzaría un 26%. Esto quiere decir que el resto del área debería estar bajo cobertura forestal permanente. Sin embargo, el uso actual demuestra que existe un 37% del área de la zona dedicada a actividades agropecuarias (FAO, 2015).

Por otra parte, en la cuenca no existen prácticas apropiadas de manejo y conservación de suelos en forma extensiva. Esto ocurre debido a que los agricultores no toman en serio la problemática ya que la ceniza aporta materia orgánica y fertilidad a los suelos de la zona (Unidad de Gestión Nacional de Costa Rica, 2010).

El principal problema por resolver durante el proyecto es mitigar el proceso de erosión en la finca Alto Fresco ubicada en Capellades de Alvarado, debido a que se presentan cárcavas en desarrollo y problemas con la fertilidad de los pastos que alimentan el ganado. El conflicto de este sector se desarrolla en cuatro factores importantes en el manejo y conservación de suelos.

El primero de los factores es el bajo nivel de capacitación sobre conservación de suelos que poseen los dueños de la finca. Emplear ganadería lechera en una zona con topografía tan abrupta no es lo adecuado, ya que antes de implementar esta actividad económica se debe procurar realizar obras de conservación de suelo que eviten la erosión excesiva en el mismo (MAG & FAO, 1996). Por otra parte, el tiempo de rotación del ganado en los diferentes apartos es sumamente extenso, lo que provoca una alta compactación y por ende la disminución de espacio poroso en el suelo que evita que el pasto crezca de forma adecuada. Paralelamente, el diseño de

apartos de la finca no es estructurado según las cabezas de ganado que se poseen, lo cual implica que en un apto pueden existir más o menos cabezas de ganado de las adecuadas y esto provoca el sobreuso del apto o el desperdicio del mismo.

La ganadería lechera sin diseño de apartos, es uno de los factores que influyen en la pérdida de suelo. El empleo de ganado desmedido en una zona delimitada produce el sobrepastoreo, que implica que al poseer una carga animal excesiva en comparación con la cantidad de alimento disponible, el ganado se ve obligado a caminar más para buscar el alimento, pisoteando el suelo y dificultando el rebrote de los pastos lo cual, generará que el suelo no tenga la suficiente cobertura vegetal para disminuir la erosión y el ganado no consumirá la cantidad de pasto adecuado, lo cual se verá reflejado en la calidad de la leche que brinda. (MAG & FAO, 1996)

Seguidamente, la topografía de la zona es un factor de suma importancia ya que la finca se encuentra en una pendiente pronunciada y su topografía es sumamente irregular. Esta condición de terreno fomenta en gran medida el grado de erosión debido a la fuerza de la gravedad que se ejerce en el flujo de la precipitación que cae en el punto más alto de la ladera y la velocidad que tomará el mismo, provocando el desprendimiento y transporte de las partículas de suelo hasta una zona de mayor regularidad topográfica. (Sánchez, 2014)

Finalmente, la precipitación afecta el suelo cuando son eventos intensos, frecuentes y duraderos, como es el caso de las precipitaciones presentes en la cuenca. Cabe destacar que, cuando la capacidad de infiltración del suelo es inferior a la intensidad de la lluvia, el agua comenzará a moverse por la superficie del terreno, formando una capa delgada de agua, la cual se moverá por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno y será frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación hasta incorporarse a la red de drenaje si es que existe. En este proceso el agua transporta el suelo lavado, ocurriendo erosión hídrica (L. Ramírez, 2008).

Debido a la existencia de la erosión en la finca Alto Fresco y analizando las variables de infiltración pendiente e intensidad, se emplea como hipótesis que las zonas de la finca con baja capacidad de infiltración básica son más propensas a la erosión.

## **2. OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Proponer un diseño empleando obras de conservación de suelos, mediante técnicas de ingeniería, con la finalidad de mitigar el grado de erosión de la finca Alto Fresco ubicada en Capellades de Alvarado.

### **Objetivos específicos.**

- Evaluar el grado de erosión actual de la finca Alto Fresco ubicada en Capellades de Alvarado, mediante técnicas geoespaciales, con la finalidad de identificar zonas potenciales de erosión.
- Proponer un diseño de obras de conservación de suelo, utilizando herramientas de ingeniería con la finalidad de mitigar el grado de erosión presente, mejorar el potencial productivo y generar un mapa que muestre la proyección a futuro en caso de que se aplique el diseño propuesto en la finca Alto Fresco ubicada en Capellades de Alvarado.
- Evaluar económica y ambientalmente el diseño propuesto, por medio de la aplicación del indicador de costo beneficio y matrices ambientales, con el fin de determinar su viabilidad en términos económicos y ambientales.

### **3. MARCO TEÓRICO**

En el presente apartado se expondrán los conceptos requeridos para la comprensión, análisis y desarrollo del proyecto de investigación, donde se abordará detalladamente el tema de la erosión como agente degradador del suelo según factores integrales como, el orden del suelo, la compactación, el sobrepastoreo, la mineralización de la materia orgánica, la capacidad de infiltración y su relación con la conductividad hidráulica, el uso de las zonas de manejo como alternativa para la agricultura de precisión y los factores que afectan la estabilidad de ladera. Además, mediante la aplicación de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE), se explicará la cuantificación del grado de erosión en una zona determinada mediante factores como la precipitación, la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, la pendiente y la intensificación del cambio de uso en el suelo. Finalmente se explican algunas de las técnicas de conservación óptimas para la restauración del paisaje productivo de la finca Alto Fresco.

### **3.1. Estado de la erosión en la cuenca del Reventazón**

Según Jiménez (2009), en Costa Rica el 23 % del territorio presenta una erosión que va de moderada a severa, esto debido a que el 70% de la extensión del territorio nacional presenta laderas pronunciadas. Las condiciones de erosión severa afectan en gran medida las cuencas del Reventazón, Virilla, Grande de Tárcoles, Candelaria, Parrita, Barranca y Jesús María.

En este caso, el proyecto a desarrollar se ubica en la cuenca del río Reventazón, la cual se ubica en la vertiente Caribe de Costa Rica y se encuentra dentro de las provincias de Cartago y Limón. Esta cuenca abarca los cantones de Siquirres, Pococí, Guácimo, Turrialba, Alvarado, Oreamuno, Jiménez, Paraíso, Dota y Cartago. La cuenca de río Reventazón contribuye al país con 25% de la producción hidroeléctrica, el 13% del valor total de bienes y servicios ambientales del bosque protegido en áreas de conservación, el 50% de la producción de cemento, 85% de la producción de papa y cebolla, 10% de la producción de caña, 30% de la producción de leche y carne, 14% de la exportación de macadamia, 23% de la exportación de flores, 8% de la producción de café y 9% de la producción de banano (Unidad de Gestión Nacional, 2010). La contribución de esta cuenca es de gran importancia para la economía nacional, sin embargo el relieve quebrado por fuertes pendientes en ciertos

sectores de la cuenca y la alta pedregosidad generan una erosión anual de hasta 200 toneladas por hectárea en zonas con actividad agrícola y ganadera. Anualmente, la erosión causa una acumulación superior a un millón de toneladas de sedimentos dentro de los embalses utilizados para la generación hidroeléctrica, ubicados en la parte media de la cuenca (Ballesteros & López, 2017).

Con respecto al uso actual de la tierra en la cuenca del Reventazón, se ha determinado que un 27% del área de estudio tiene capacidad de uso agrícola, un 9,6% puede dedicarse a la ganadería y al manejo de bosque natural, un 9,7% tiene aptitud para la producción forestal y cultivos permanentes, un 4,5% es para regeneración natural y un 1,9% debe mantenerse como área de protección. Sin embargo, se ha estimado que el 16,9% de la cuenca se utiliza según su capacidad de uso, el 13,3% se sobreutiliza y el 44,8% se subutiliza (Unidad de Gestión Nacional de Costa Rica, 2010).

En la actualidad no existen actividades de extracción de madera importantes, que impliquen un cambio de uso de la tierra. Sin embargo, muchas de las áreas de capacidad forestal con relieve muy empinado de la cuenca, fueron deforestadas para dar paso a actividades pecuarias y de cultivos perennes, como el café y la caña de azúcar (Unidad de Gestión Nacional de Costa Rica, 2010).

Este hecho provoca una gran sobreexplotación de las tierras de la cuenca, que influye en la erosión acelerada de la zona y deslizamientos de laderas que ocurren en zonas boscosas. Esta condición afecta la mayoría de las actividades agroeconómicas de la población, aumenta el riesgo de inundación en la parte baja de la cuenca e incrementa la inestabilidad horizontal y vertical del cauce de los ríos en las planicies de las partes bajas (Unidad de Gestión Nacional de Costa Rica, 2010).

### **3.2. Causas de la degradación del suelo**

El suelo es un sistema dinámico y complejo cuya función no es solo servir de soporte mecánico para el crecimiento de las plantas, sino también es el medio por el cual las plantas adquieren el agua y los nutrientes que requieren para su óptimo desarrollo. Un buen suelo, además de ser fértil, debe infiltrar correctamente el agua llovida, almacenar carbono y

materia orgánica y ser capaz de limpiar el agua de cualquier contaminante con la finalidad de haya agua limpia en las nacientes (MAG, 2018).

Algunos indicadores de calidad del suelo son la cantidad de materia orgánica que este posee, la textura, el contenido arcilloso, el nivel de fertilidad y profundidad, y la poca presencia de contaminantes. Dichas características favorecerán la buena calidad del suelo y por ende la obtención de buenas producciones agrícolas y forestales. (MAG, 2018)

El uso irracional del recurso suelo, genera una alteración de sus propiedades lo cual implica que este puede perder parcial o totalmente sus capacidades de cumplir con diversas funciones. El fenómeno de disminución o pérdida de calidad del suelo se denomina degradación y las actividades humanas son las principales impulsoras de estos procesos. Debido a la degradación, los agricultores y ganaderos afrontan una baja fertilidad de sus suelos y por consiguiente bajos rendimientos de cultivos. Estos bajos niveles de fertilidad en gran medida son resultado de las malas prácticas de manejo que los agricultores y ganaderos aplican al suelo, como la quema y el sobrepastoreo. Este tipo de malas prácticas afecta aun más cuando se tienen terrenos inclinados, donde se produce el mayor lavado o pérdida de suelo y nutrientes, disminuyendo de esta manera la fertilidad y capacidad productiva del recurso. Es necesario para mantener el suelo en óptimas condiciones y realizar prácticas de uso y manejo de conservación (MAG, 2018).

### **3.2.1. Órdenes de suelo en la cuenca del Reventazón**

Según el Atlas Digital de Costa Rica (2008) la capa de suelos muestra que la cuenca de Reventazón esta influenciada por dos ordenes, el Inceptisol y el Ultisol. Por otra parte, según el CIA (2021) y la aplicación de suelos CR, la cuenca también posee suelos del orden Andisol. Debido a esto en el cuadro 1 se presentan las características fundamentales de cada orden de suelo antes mencionado.

**Cuadro 1.** Ordenes de suelo de la cuenca del Reventazón.

<b>Orden</b>	<b>Características</b>
<b>Inceptisol</b>	Estos suelos poseen como texturas dominantes la franca arcillosa, franco arcillo arenosa y arcillosa. Poseen un pH ácido, comúnmente contienen minerales de arcilla amorfa, presenta contenidos alto de materia orgánica y al mismo tiempo posee una baja tasa de descomposición de la misma debido a las bajas temperaturas(Cubero, 2015).
<b>Ultisol</b>	Los ultisoles poseen una mezcla de arcilla y cuarzo, la cual es rica en hierro (tonalidades de suelo rojizas y amarillentas) y pobre en materia orgánica. Son suelos con alto contenido de acidez por lo que es recomendable fertilizarlo con calcio para neutralizar el pH del mismo. Este orden de suelo es característico de relieves ligeramente ondulados hasta fuertemente ondulados. Estos suelos son profundos y poseen texturas finas a muy finas, como las arcillas (Salazar, 2015).
<b>Andisol</b>	Estos suelos son de formación volcánica y se desarrollan a partir de cenizas y otros materiales volcánicos como piedra pómez y lavas, lo cual provoca que sean suelos con gran porcentaje de materia orgánica y buena acumulación de humus. Los andisoles poseen texturas medias como franco arenosos, francos o franco limosos (Cubero, 2015).

### **3.2.2. Compactación del suelo**

La compactación del suelo provoca que se generen capas impermeables en la superficie o en el subsuelo. Esta condición es provocada por la concentración elevada del ganado, uso de maquinaria pesada y prácticas de laboreo inadecuadas. La incidencia de la erosión eólica e hidráulica es muy común en zonas con suelos compactados y por ende con disminución de la cubierta vegetal (FAO, 2017). Este parámetro comprende diversos factores los cuales son la cohesividad del suelo, resistencia a la penetración, densidad aparente, textura y contenido de materia orgánica.

La adherencia entre las moléculas del suelo se define como la cohesividad del mismo. Se considera que esta propiedad pertenece a los suelos arcillosos y es poco existente en los

suelos franco arenosos. Por lo general los suelos que poseen más cohesividad de partículas poseen menos riesgo de erosión que los que no poseen esta propiedad (FAO, 2017).

Por otra parte, la resistencia a la penetración es la resistencia a la fractura del suelo que está en función de la cohesividad de las partículas, del ángulo de fricción interna y la compresibilidad. El grado de penetración indica la dificultad de crecimiento para las raíces de las plantas. (FAO, 2017).

Es de suma importancia tomar en cuenta el factor de pisoteo en el pastoreo ya que este es capaz de causar aumentos en la resistencia a la penetración hasta los 10 cm de profundidad. Sin embargo, la resistencia a la penetración depende principalmente de la textura del suelo, la densidad aparente y el contenido de humedad del mismo (Artigas & García, 2012).

Se dice que del 69 a 75% de la variación en la resistencia a la penetración es atribuido a la humedad de suelo ya que, a medida que el suelo se seca aumenta la resistencia a la penetración del mismo. Cabe resaltar que cuanto mayor sea la densidad aparente el espacio poroso de suelo se ve reducido por lo cual la resistencia a la penetración es más elevada (Artigas & García, 2012). Por otra parte, los suelos arcillosos desarrollan niveles de resistencia a la penetración sumamente altos debido a la cohesividad entre sus partículas. A pesar de esta característica física, los efectos de la compactación son mas duraderos y permanentes en suelos con alto contenido arcilloso (Artigas & García, 2012).

### **3.2.3. Efecto ganadero**

Según Matthews (2006), el ganado es uno de los principales responsables de los graves problemas medioambientales de hoy en día, debido a que no solo produce grandes emisiones de gases causantes del efecto invernadero, sino que también esta produciendo estragos en el recurso suelo.

En la actualidad, la ganadería utiliza el 30% de la superficie terrestre del planeta, que en su mayor parte son pastizales. Esta práctica ocupa también un 33% de toda la superficie cultivable, destinada a producir forraje. La tala de bosques para crear pastos es una de las principales causas de la deforestación en países de Latinoamérica. La deforestación desmedida con el fin de generar espacio para la actividad ganadera produce un efecto

negativo en el degradamiento del suelo, debido a que un suelo con baja densidad radicular es más propenso a altos grados de erosión (FAO, 2018).

Por otra parte, el daño que provoca el pisoteo de los rebaños es evidente en los suelos dedicados a la labor pecuaria. Matthews (2006) asegura que al menos el 20% de los pastizales están degradados a causa del sobrepastoreo. El manejo inadecuado de la práctica ganadera en zonas con pendiente elevada tiene como consecuencia la aparición de terracetas las cuales son el comienzo irreversible de un proceso erosivo acelerado. El pastoreo excesivo también genera la compactación del suelo. Debido a esto se producen problemas de infiltración y permeabilidad en las zonas afectas y por ende el lavado de la capa superficial del suelo (Fléchet, 2007). Por su parte el exceso de cabezas de ganado por hectárea también contribuye a la compactación excesiva del suelo. Ya que, según Chi Chan (2008) la actividad lechera es sostenible si existen de 4 a 5 cabezas por hectárea.

#### **3.2.4. Materia orgánica y mineralización**

La materia orgánica (MO) es un agente que evita la erosión debido a que actúa como cementante en las partículas del suelo generando cohesión entre ellas y disminuyendo el desprendimiento (Meléndez, 2008).

Por su parte, la mineralización de la MO se refiere al proceso bioquímico, mediante el cual, los microorganismos del suelo obtienen la energía necesaria para realizar procesos metabólicos, mediante el rompimiento de los enlaces de las macromoléculas orgánicas provenientes de los residuos de las plantas, la hojarasca, la necromasa microbiana y los exudados orgánicos de las raíces, para transformarlos en moléculas inorgánicas de bajo peso molecular, que posteriormente, a través de reacciones químicas de oxidación e hidrólisis, son oxidadas catabólicamente a compuestos inorgánicos, donde estos pueden ser inmovilizados en el suelo, volatilizados al aire, lixiviados a aguas profundas o absorbidos por las plantas y los microorganismos (Monsalve, 2017).

El porcentaje de MO se obtiene mediante el porcentaje de carbono orgánico en el suelo, sin embargo, los métodos para obtener dicho valor son muy complejos por lo que se aproxima con el valor del carbono total existente, el cual se obtiene mediante varios métodos como la ignición. El carbono total se refiere al carbono orgánico e inorgánico que se presenta en los suelos. Sin embargo, según un estudio realizado por Reeder (2005),

donde se investigó la influencia del pastoreo a largo plazo en los contenidos de carbono y nitrógeno, se obtuvo como conclusión que el pastoreo intensivo aumenta significativamente el contenido de carbono inorgánico del suelo. Debido a que, la ganadería de pastoreo genera un mínimo control de desechos de los animales en la mayoría de los casos. Esto provoca que los microorganismos se reproduzcan y mineralicen la MO excretada, transformándola en carbono inorgánico.

### **3.2.5. Condiciones hidráulicas**

El suelo tiene la característica de infiltrar cierta cantidad de agua de riego y de las precipitaciones que caen sobre la superficie. La infiltración produce que el agua se introduzca dentro del suelo y se mueva entre los poros hacia la profundidad. Durante el proceso de toma de datos en campo, la tasa de infiltración instantánea decrece en el tiempo hasta llegar a un valor constante llamado infiltración básica la cual es controlada por la conductividad hidráulica saturada (Gómez-Tagle Ch et al., 2008).

La determinación de la conductividad hidráulica refleja mejor las condiciones de campo y las diferencias en la capacidad de transmisión de agua por parte de los distintos horizontes debido a heterogeneidad del suelo. La conductividad hidráulica es un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo y por consiguiente para solucionar problemas de irrigación, drenaje y conservación de suelos. La conductividad hidráulica es mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados (Enríquez & Orozco, 2011).

Por lo tanto, existe una relación inversa entre la infiltración base y la conductividad hidráulica, ya que cuando en el suelo alcanza la saturación la conductividad hidráulica se convierte en saturada y por ende al estar llenos todos los poros del suelo la infiltración disminuye y se vuelve constante. Debido a esto la tasa mínima de infiltración base teóricamente sería la conductividad hidráulica saturada, si se despreciara el efecto del aire comprimido en el interior del suelo, que dificulta la infiltración. Debido a esto la infiltración base normalmente es menor a la conductividad hidráulica saturada (Alvarado Batres & Barahona-Palomo, 2017).

### 3.2.6. Condiciones hidrológicas

Desde el punto de vista hidrológico, la precipitación es la fuente primaria de agua de la superficie terrestre; sus mediciones y análisis forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua. El estudio de la precipitación se puede realizar en función de dos características físicas esenciales, las cuales son la cantidad o volumen de agua caída por unidad de superficie y por otra parte la intensidad en diferentes intervalos (Villón, 2004).

La erosividad es definida como la agresividad de la lluvia sobre el suelo y representa la energía cinética con que las gotas de lluvia caen a determinada intensidad y rompen los agregados de suelo superficiales en partículas de tamaño transportable. La precipitación es el agente activo en la degradación de los suelos por erosión hídrica. Debido a esto, cuando se produce una lluvia de mucha magnitud, el impacto ejercido por las gotas causa la desagregación y dislocación de los materiales orgánicos y minerales del suelo originando la erosión por salpicadura; una vez alcanzada la máxima infiltración de agua en el suelo las partículas disgregadas son transportadas por la lámina de agua superficial (escorrentía) y se produce la erosión por arrastre. Como consecuencia de la erosividad y de la susceptibilidad del suelo a la erosión (erodabilidad, K), se rompe el equilibrio natural del suelo y ocurre la pérdida de la capa superficial o capa arable (Colotti, 2000).

Según los diversos experimentos realizados por Piscitelli (2010) se puede afirmar que en zonas con altos contenidos de arcilla el factor K es más bajo y en sitios con alta cantidad de arenas totales el factor K aumenta. Por otra parte, cuando se poseen altas cantidades de arenas finas el factor K también crece, sin embargo, no de la misma forma en que reacciona con los porcentajes de arenas totales y arcillas. El porcentaje de limos no es altamente significativo para el crecimiento o decrecimiento del factor K. Sin embargo, según Ramírez (2009) se muestra que a mayor contenido de MO los suelos presentan mayor resistencia a la erosión (bajo K), esto debido a que la MO posee un efecto cementante entre las partículas del suelo.

Por otra parte, según la ecuación y el nomograma propuesto por Wischmeier (1971) el valor de la erodabilidad es más bajo a medida que la estructura del suelo se vuelve granular muy fina y la permeabilidad rápida.

### **3.2.7. Condiciones topográficas**

Según la conclusión llevada a cabo por Sancho & Villatoro (2005) los efectos negativos de la erosión son más fuertes y rápidos en suelos con pendiente y se considera a este factor como la mayor limitante de la sostenibilidad de los sistemas vegetales en suelos. En casos como este, el efecto positivo beneficia a los suelos al pie de la pendiente, que se enriquecen más entre mayor sea la erosión y por ende tienen un potencial productivo mucho mayor.

Es importante destacar que, cuando la erosión provoca remoción en masa de los horizontes superficiales, los efectos sobre el suelo y la productividad del mismo son sumamente negativos. Sin embargo, la reducción de dichos horizontes es leve y por ende no puede ser reconocida por algunos años. No obstante, aunque dichas consecuencias no puedan ser reconocidas brevemente el efecto de la longitud y de la inclinación de una ladera provoca una mayor erosión y disminución en la productividad de la zona por lo que se debe contar con prácticas de manejo que mitiguen la erosión descontrolada (Sancho & Villatoro, 2005).

### **3.2.8. Dinámica del cambio de uso del suelo**

La dinámica del cambio del uso del suelo se ha intensificado tras al aumento potencial e histórico de la población a nivel mundial. En el neotrópico, cientos de miles de hectáreas de bosque se han convertido en usos cultivables extensivos e intensivos, proliferando consigo los monocultivos y dejando de lado óptimas prácticas de conservación del suelo. El cambio del uso de suelo es uno de los factores que más gases de efecto invernadero emite a la atmósfera, específicamente metano y dióxido de carbono y dejando de existir sumideros naturales de este último gas (Leh, Bajwa, & Chaubey, 2013).

Científicos han evidenciado la correlación positiva entre cambio del uso del suelo y la erosión en suelos tropicales, lo que evidencia la poca gestión territorial y ambiental del uso del suelo por parte de los tomadores de decisiones. Es decir, a modo de ejemplo, a escala de una cuenca hidrográfica, si no existe una adecuada gestión del uso del suelo en la parte alta, y se intensifican prácticas agrícolas que conducen hacia la erosión superficial y en masa de la tierra, millones de partículas fértiles avanzarán por los canales hidrográficos que

generarán sedimentos y depósitos de materiales en áreas urbanas residenciales o industriales (Lambin, Geist, & Lepers, 2003).

La erosión tras la deforestación es un factor común, que debe ser tratado bajo especificaciones geográficas propias del área a trabajar, para lograr establecer los mejores mecanismos de control de erosión con soluciones ambientales mitigadoras. Las especies forestales endémicas que logren una mejor cobertura del suelo, un amarre de partículas más consistente, y que a su vez generen nuevas conectividades ecosistémicas locales es hacia lo que deben enfocarse los planes de conservación del suelo. Por otra parte, sistemas silvipastoriles combinados ayudarán a aprovechar el suelo de forma sostenible y paralelamente mitigar la erosión superficial y en masa (Leh et al., 2013).

### **3.2.9. Estabilidad de la ladera**

El agua separa las partículas del suelo y remueve la materia vegetal transportándolas mediante la escorrentía superficial, la cual conduce los sedimentos hacia las áreas de deposición (Hernández, 2010).

El proceso de la erosión hidráulica posee tres fases: desprendimiento, transporte y deposición de partículas. El desprendimiento de las partículas es debido a la precipitación y el impacto que está tiene sobre el suelo, las rocas y la materia vegetal. Si dicho impacto o fuerza de empuje es mayor a la fuerza de resistencia de las partículas se inicia la fuerza de tracción que realiza el agua sobre los materiales.

La fase de transporte da inicio cuando los materiales se desprenden de la superficie y son puestos en movimiento por la escorrentía superficial, lo cual provoca la saltación de las partículas medianas, la suspensión de las partículas pequeñas mediante la flotación y la tracción o rodamiento de las partículas grandes. En áreas con suelos degradados o impactados por actividades productivas o sísmicas, el agua puede desencadenar el movimiento de dichos materiales.

La sedimentación es la acumulación de los materiales que fueron alterados y transportados. Esta se produce cuando disminuye la velocidad de los agentes de transporte. Los sedimentos poseen características, como el tamaño de partícula, su forma y la

esfericidad, que ayudan a inferir cuanto transporte ha recibido el material antes de ser depositado

De una forma física se debe tener en cuenta que el transporte de los sedimentos posee factores como la mínima fuerza de empuje necesaria para mover una partícula y el tamaño máximo que debe tener dicha partícula para ser movida por una fuerza de empuje.

El flujo moverá la partícula de suelo si las fuerzas de empuje en contacto con la superficie del suelo ( $\tau_0$ ) superan las fuerzas de resistencia que en este caso serían la gravedad y la cohesividad.

El diagrama de Shield's que se muestra en figura 1, tiene como función determinar las condiciones hidráulicas de una ladera y dar como resultado si la misma presenta inestabilidad o estabilidad. La condición crítica en donde se da el desprendimiento de partícula se relaciona con dos parámetros que posee este diagrama, el primero es el parámetro de Shield's ( $\tau^*$ ) y el segundo es el número de Reynolds ( $Re^*$ ).

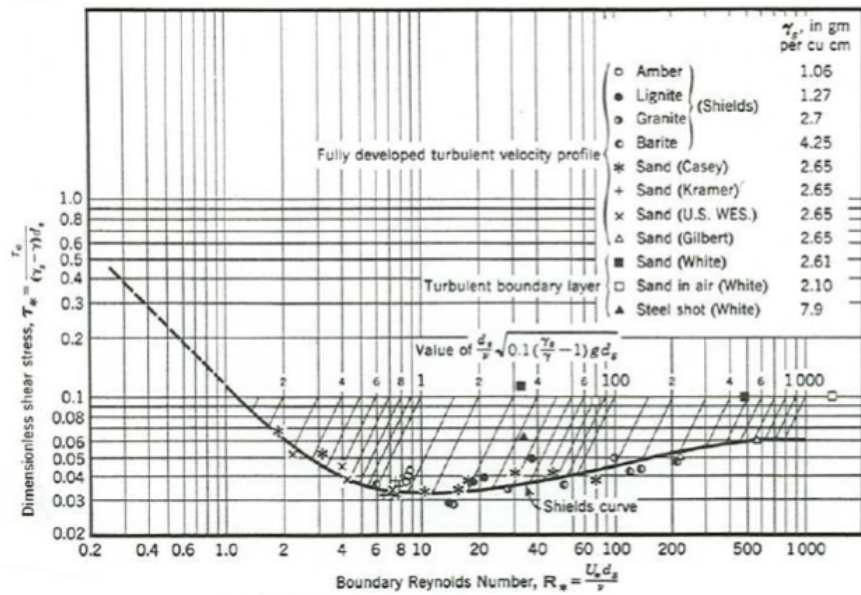


Figura 1. Diagrama de Shield's. Fuente:(Vanoni, 1975)

El parámetro de Shield's ( $\tau^*$ ) brinda la relación entre las fuerzas de empuje y las de resistencia. Por otra parte, el número de Reynolds muestra la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas.

Al obtener el valor de  $Re^*$  y de  $\tau^*$  se grafican dentro del diagrama de Shield's y se obtiene un punto de ubicación en el plano. Si dicho punto esta por debajo de la curva de Shield's la ladera es estable, pero si por el contrario el punto esta arriba de la curva, la ladera no es estable y se requiere de obras de conservación para estabilizar la misma (Hernández, 2010).

### **3.3. Estimación de las pérdidas del suelo**

Para responder a la necesidad sobre la resolución de problemas en cuanto a cultivos, suelos y manejos de cuencas, se han creado numerosos modelos para predecir la erosión de una zona. Existen métodos empíricos, semiempíricos, físicos y distributivos tales como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) propuesta por Wischmeier y Smith en 1978, la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) la cual fue desarrollada para superar limitaciones de la USLE, fue creada por Onstand-Foster para estimar el desprendimiento del suelo y el rendimiento de sedimento en las cuencas, la Ecuación Universal Modificada de Pérdidas de Suelo (MUSLE) que es un modelo de parámetros agrupados que estiman el rendimiento de sedimento de cuencas para un evento pluvioso único, entre otros (FAO, 1993). A pesar de la gran cantidad de métodos se decidió implementar para el presente proyecto la ecuación RULSE debido al tipo de datos disponibles para calcular las pérdidas por erosión de la zona de estudio.

La RUSLE tiene la finalidad de calcular la erosión laminar y en surcos. Dicha ecuación brinda la tasa de erosión anual por unidad de área (ton/ ha\*año) y posee seis factores que se deben determinar para obtener el valor de dicha erosión. El factor R es el de erosividad que determina la capacidad de la lluvia de erosionar según su intensidad y energía. El factor K de erodabilidad que calcula la capacidad del suelo de ser erosionado, mediante parámetros físicos como la textura, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad. Estos dos factores muestran el máximo potencial de erosión que puede haber en un área de estudio (Prado, et al. 2017).

Los otros factores que pueden variar la cantidad de erosión existente en una zona son los factores LS que se refieren a la longitud e inclinación de la pendiente de una ladera o área de estudio, el factor C que define la cobertura existente en la zona y por último P que se refiere a las prácticas de manejo existentes o no en el área de estudio (Prado, et al. 2017).

Actualmente no existe un acuerdo que indique la tasa de erosión tolerable de los suelos. Según el USDA (1999) los niveles aceptables de erosión para mantener la calidad del agua es de 1 ton/ha anual. Sin embargo, según Walter & Stützel (2009) la tolerancia a la pérdida de suelo es aceptable entre 1 y 2 ton/ha anuales.

### **3.4. Manejo óptimo de la finca**

Existen múltiples técnicas de conservación para suelos con problemas de erosión, a continuación, se detallan algunas técnicas utilizadas para mitigar la erosión.

#### **3.4.1. Acequias de ladera**

Las acequias de ladera son empleadas en el trópico húmedo, ya que el manejo de agua de escorrentía producto de las lluvias juega un papel sumamente importante en el control de la erosión y de todos los efectos negativos debidos a la pérdida del suelo. Las acequias de ladera son empleadas generalmente en suelos arcillosos dedicados a la actividad cafetalera y existen dos diseños comunes que son las acequias y las gavetas (MAG, 2019).

Las gavetas de infiltración son huecos rectangulares de poca profundidad que tienen como finalidad recoger el agua llovida para que se infiltra a través del suelo. Las gavetas tienen una dimensión de aproximadamente 40 cm de ancho por 100 cm de largo y 20 cm de profundidad (MAG, 2019).

Por lo general, en estas gavetas también se deposita gran cantidad de sedimentos, producto de la erosión de los terrenos, por lo que es necesario desaterrarlos para que no pierdan su función. Sin embargo, las gavetas no recogen toda el agua llovida por lo que el problema de arrastre de sedimentos no es mitigado efectivamente.

Las acequias de ladera son estructuras de control de erosión hídrica para suelos escarpados con pendientes de 10 a 50% con una profundidad mínima de 50 cm. Es recomendable sembrar barreras vivas sencillas a lo largo de la acequia (30 a 50 cm) con la finalidad de evitar el exceso de sedimentos (MAG, 2019).

#### **3.4.2. Barreras vivas**

Las barreras vivas son hileras de plantas sembradas a poca distancia en curvas de nivel, con el objetivo de conservar el suelo y protegerlo de la erosión. Se pueden emplear especies

como el madero negro, leucaena, grandul, King grass, valeriana, vetiver, piña, caña de azúcar, zacate napier o taiwán, zacate de limón, piñuela, entre otros.

Las barreras vivas reducen la velocidad del agua ya que dividen la ladera en pendientes más cortas y actúan como rompevientos, también sirven como filtro captador de sedimentos que van en el agua de escurrimiento (IICA, 2012).

En los sistemas silvipastoriles las barreras vivas consisten en una línea de árboles o arbustos que se comportan como soportes para alambre de púas, con el fin de delimitar las parcelas. Las barreras vivas pueden ser de una o dos líneas, y estar formadas por plantas leñosas o combinadas con postes muertos. También se pueden combinar árboles forrajeros con frutales o árboles maderables pertenecientes a la zona (G. Jiménez & Marinidou, 2010).

Para establecer cercas vivas se deben utilizar postes muertos cada 10 o 15 m y en el intercambio se siembran las plántulas o estacas de árboles forrajeros, estos se siembran a una distancia de 2 o 5 m entre si. Si los árboles para la cerca son frutales o maderables se siembran a una distancia de 6 u 8 m entre si, dependiendo de la copa que alcanzarán (G. Jiménez & Marinidou, 2010).

Según Narváez (2013) las principales especies arbóreas de la zona norte de Cartago son el Ciprés, Sauco, Sauce y Poró. Por otra parte, también son propias de la zona especies frutales como árboles de higo, durazno, aguacate, pera, ciruela y membrillo, y arbustos de mora y frambuesas.

### **3.4.3. Agroforestería con regeneración natural**

La agroforestería consiste en el asocio de cultivos como maíz y frijol con árboles maderables o forrajeros de interés específico en la finca, también se puede enriquecer con especies frutales. Esta técnica se recomienda en laderas muy pronunciadas.

Los árboles poseen gran cantidad de beneficios en las laderas tales como, la protección de la erosión debido a las raíces y hojas que se desprenden. Las hojas ayudan con el control de malezas y a mejorar la estructura de los suelos debido a que son fuente de materia orgánica.

En suelos profundos las raíces de los árboles extraen los nutrientes de capas profundas del suelo, lo incorporan en su biomasa y enriquecen las capas superficiales del suelo. La contribución de árboles en el control de malezas depende de la densidad de siembra y de podas. Algunas especies como Cenízaro, Caoba, Escobillo producen altas cantidades de mulch que protegen el suelo y controlan malezas. Otras especies como Vainillo y Zarcillo se utilizan para producir forrajes. Como parte del manejo integral de la finca la regeneración natural de árboles produce leña, postes y madera lo cual es de gran importancia para la economía de la finca (IICA, 2012).

#### **3.4.4. Terrazas individuales para el aprovechamiento forestal**

Las terrazas individuales se recomiendan en el caso de terrenos con laderas y pendientes muy pronunciadas donde se pretende obtener aprovechamiento forestal. Dichas terrazas poseen múltiples ventajas como la reducción de la erosión, mejor captación del agua de riego y el mejor aprovechamiento del abono.

Este tipo de terraza se puede combinar con terrazas de base angosta o acequias de ladera, sin embargo es importante destacar que las mismas requieren de barreras vivas o de piedra para su protección (MAG, 2018).

Dichas estructuras deben seguir la orientación de las curvas de nivel y deben tener una forma redonda o semi redonda. Cabe destacar, que la siembra de los árboles en dichas terrazas debe ser en zig-zag, respetando el espaciamiento debido entre árboles. Entre los árboles plantados se puede estimular la regeneración de pasturas naturales o el establecimiento de pastos mejorados (MAG, 2018).

Las terrazas individuales se pueden realizar manualmente lo cual genera que el costo económico sea bajo, al mismo tiempo asegura la disminución de la pérdida de suelo y por otra parte captan el agua de escorrentía favoreciendo la infiltración de la misma en la plataforma de la terraza (MAG, 2018).

#### **3.4.5. Dique de piedra y postes**

Son muros de piedra construidos en forma media luna a favor de las curvas de nivel. Tienen la finalidad de retener el agua de lluvia que forma las cárcavas, ya que al reducir la velocidad de la escorrentía se detienen los sedimentos arrastrados por la lluvia. Con el

transcurso de los años en los diques se forman terrazas fértiles, donde se pueden plantar árboles frutales para amarrar y proteger el suelo (IICA, 2012).

Las dimensiones y distancia entre los diques dependen de la profundidad de la cárcava. Sin embargo, en las laderas donde cae mucha lluvia se necesitan diques más anchos y a menor distancia, para que soporten la cantidad alta de precipitación (IICA, 2012).

Los diques de piedras son difíciles de construir en suelos arenosos y francos por lo que se recomienda construir en este caso con la combinación de piedras y postes que tengan la capacidad de fortalecer el muro. Es de suma importancia complementar los diques con barreras vivas y acequias de ladera para mejorar la infiltración de la agua de lluvia (IICA, 2012).

#### **3.4.6. Rediseño de apartos**

En el pastoreo intensivo la cantidad de animales por superficie de suelo es fundamental, ya que la tierra es el recurso más costo de las fincas y se le debe sacar el mayor provecho posible. La principal limitante para aumentar la carga animal o número de animales por hectárea es la disponibilidad de pastos ya que son el principal recurso alimenticio de las fincas (Gutiérrez, 2017).

El concepto de unidad animal de ha planteado para asignarle un valor relativo a cada categoría de ganado, de acuerdo con el consumo de pastos, en el cuadro 2 se muestra la equivalencia de cada categoría a Unidades Animal (UA).

**Cuadro 2.** Equivalencia a Unidades Animal.

Categoría Animal	Unidad Animal equivalente
Toro reproductor	1,25
Vacas adultas	1
Vaquillas/Novillas	0,75
Terneros (as) < 1 año	0,50

Fuente: (Gutiérrez, 2017)

Una finca lechera intensiva debe tener mas de 3 UA/ha de pastos, sin embargo, esto depende de la disponibilidad de forrajes y de su manejo (Gutiérrez, 2017). Para poder diseñar los apartos o potreros de una finca se deben tomar en cuenta factores como el pasto, la raza de las vacas y su necesidad alimenticia según su peso. Con respecto al pasto, se debe calcular aproximadamente 1kg de pasto estrella o kikuyo por metro cuadrado. Según Chi Chan (2008) el peso de la raza es de suma importancia ya que se debe calcular un 10% del peso corporal del animal para determinar la cantidad de metros cuadrados que requiere cada vaca para poder pastar y realizar sus necesidades. Seguidamente, la rotación se establece mediante el tipo de pasto que se implementa en la finca. Si es pasto estrella la rotación debe ser de 21 días y si es kikuyo de 35 a 40 días. Por último, se debe tener en cuenta que el pasto estrella crece en altitudes menores a los 1600 msnm y el kikuyo crece en alturas mayores a los 1600 msnm (W. Sanchez & Hidalgo, 2016).

#### **3.4.7. Manejo de ganado estabulado.**

La estabulación se basa en mantener el ganado permanentemente en el corral para darle un mejor cuidado y alimentación. Es una técnica empleada para ganadería de carne y de leche. La estabulación total es una buena opción para fincas en terrenos de ladera escarpada. Por otra parte, existe la semiestabulación que se refiere a que parte del alimento requerido por el ganado se recibe el en corral y la otra parte mediante pastoreo diario por un lapso determinado (MAG, 2018).

Los sistemas estabulados y semiestabulados permiten incrementar el peso de los animales en un tiempo corto, ya que bajo este método se les puede ofrecer alimentación constante durante todo el año, así como los nutrientes necesarios para una dieta completa. Otra ventaja de este sistema es que se evita el gasto de energía, por parte del ganado, buscando alimento y agua (MAG, 2018).

Se pueden diseñar corrales parcialmente techados, sin embargo, el aprovechamiento del espacio se disminuye ya que cada animal necesitaría de 8 a 10 m<sup>2</sup>. Por otra parte, si se emplea un establo totalmente techado cada animal requerirá entre 4 y 6 m<sup>2</sup>. Lo cual implica que en un galerón de 18 x 12 m se pueden manejar hasta 40 animales en estabulación total (MAG, 2018).

Para el establecimiento de un sistema estabulado se deben tomar en cuenta que ocho meses antes de comprar el ganado se deben sembrar los forrajes que se utilizarán para alimento, incluyendo bancos energéticos, proteicos y pastos de corte. Ya que la necesidad alimenticia de una sola vaca equivale a un 10% de su peso corporal. Es decir 45 kg para las Jersey cuyo peso aproximado es de 450 kg y 55 kg para las Holstein cuyo peso aproximado es de 55kg (MAG, 2018).

Un aspecto sumamente importante para tomar en cuenta en los sistemas estabulados y semiestabulados es el manejo de la boñiga y demás desechos del animal. Para contar con un sistema como este, el mismo debe ser sostenible. Los microorganismos de montaña ayudan en esta labor ya que a pesar de ser fertilizantes muy eficientes, también ayudan a la formación de suelo mediante una rápida descomposición de materia orgánica (MAG, 2018).

Los microorganismos de montaña (MM), se pueden aplicar de forma sólida o líquida. Si estos se aplican de forma líquida se pueden emplear como fumigadores en los establos para evitar los malos olores y descomponer la materia orgánica sin implementar grandes cantidades de agua. Este sistema de fumigación se puede emplear con agua proveniente de la lluvia ya que en muchos casos las fincas cuentan con sistemas de cosecha de agua para mitigar el consumo excesivo de este recurso tan preciado (Barquero, 2014).

El uso del método de estabulación trae consigo otro beneficio de tipo económico y es que, el estiércol y los orines del ganado se pueden aprovechar para producir abono orgánico o biogás, sin embargo, los biodigestores consumen altas cantidades de agua por lo que para una finca con varias cabezas de ganado no es factible ni sostenible ambientalmente la implementación del mismo. Sin embargo la venta del compostaje o abono orgánico significa para cualquier finca un ingreso económico además de las ganancias que producen los animales sean lecheros o de engorde (MAG, 2018).

Existen diversos tipos de abonos orgánicos, como el compost que se realiza mediante composteras giratorias, lombricompost y el Bokashi. Este último es de principal interés ya que es un abono resultante de la fermentación de la materia orgánica con microorganismos como hongos y bacterias, lo cual implica que se puede generar compost a base de MM y

los desechos del ganado, el cual es una excelente opción para manejar de forma sostenible las toneladas de desechos que las vacas producen diariamente (Barquero, 2014).

### **3.4.8. Alimentación del ganado**

- *Pastos mejorados*

El establecimiento de pastos mejorados en Costa Rica ha permitido incrementar la productividad en los sistemas pecuarios. Se estima que el incremento es de 55% para la ganadería lechera y 18% en la carne (Villalobos & Montiel, 2015). Las especies de pastos mejorados ofrecen mayor producción forraje, mejor contenido nutricional y mayor adaptabilidad, resistencia de plagas y capacidad para enfrentar la competencia con la vegetación natural espontánea (MAG, 2018).

El tipo de pasto mejorado que se selecciona para los potreros se debe elegir con base al tipo de suelo, topografía de la finca, altitud y clima. Por ejemplo las guineas se adaptan mejor a terrenos planos o ligeramente ondulados, no arcillosos y de buena fertilidad. No se recomienda en terrenos de ladera porque su crecimiento no brinda una adecuada cobertura al suelo, exponiéndolo a la erosión (MAG, 2018).

Las brachiarias se adaptan mejor que las anteriores a suelos de mediana fertilidad y pueden utilizarse en terrenos de pendientes ya que su crecimiento rastrero cubre mejor el suelo (MAG, 2018).

- *Bancos forrajeros*

Los bancos forrajeros son altas densidades de vegetación que ofrecen recursos de alimentación para que el ganado cuente con una dieta balanceada en energía y proteínas, especialmente durante la época seca. Para implementar los bancos forrajeros que usan plantas de rápido crecimiento, resistentes a podas frecuentes, que rebrotan con facilidad y que dan muchas hojas tanto en la época seca como en la lluviosa. Existen diferentes clasificaciones de bancos forrajeros como los bancos energéticos, proteicos y pastos de corte (MAG, 2018).

Los bancos energéticos son aquellos que proporcionan altos niveles de energía al animal, como por ejemplo la caña de azúcar. Los proteicos proporcionan al menos un 14% de proteína al animal. Hay muchas especies de arbustos como el morera, nacedero, cratyia.

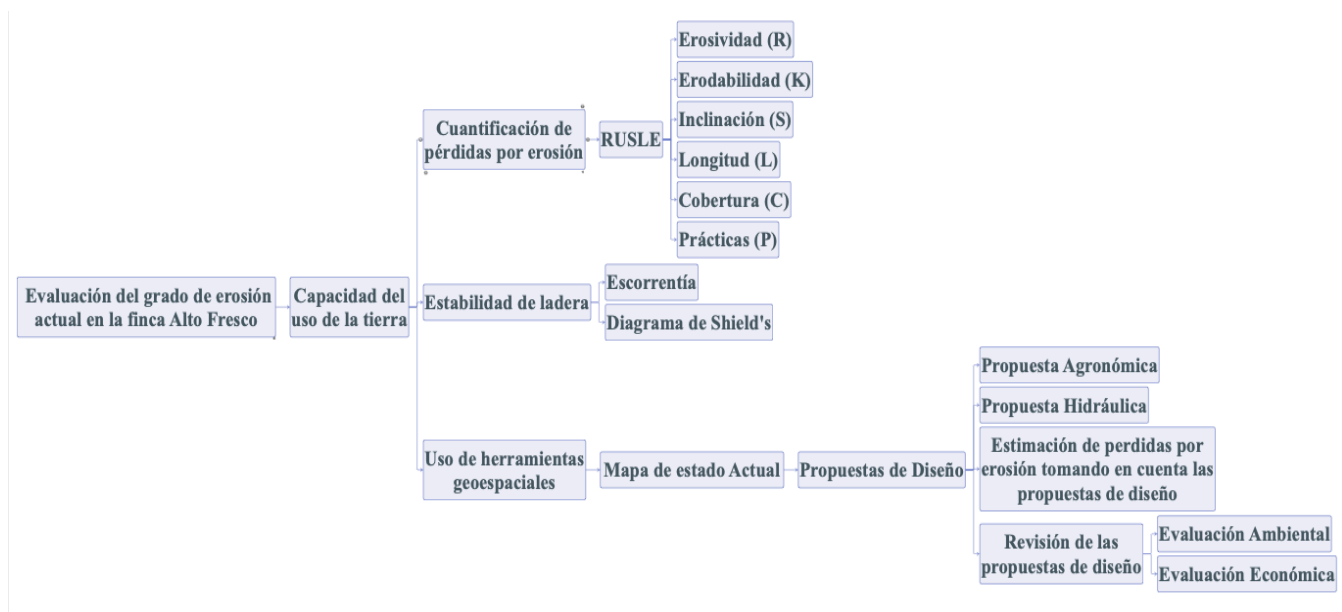
También existen árboles forrajeros como el madero negro, Poró, guácimo y leucaena (MAG, 2018).

La selección de las especies para implementar los bancos proteicos se basa en su adaptación a las condiciones de la zona. La *Cratylia* funciona muy bien en clima secos con periodo de verano prolongados, como el Pacífico Central y Norte. La morera es apta para climas con mayores precipitaciones, es exigente en fertilización y se utiliza en el Valle Central y el Caribe. El nacedero se adapta a suelos inundables en lugares de alta precipitación, como el Caribe (MAG, 2018).

Los pastos de corte que se pueden emplear son los pastos gigantes como el King grass o el candelario, los cuales poseen gran altura su rendimiento es aún mayor que los pastos comunes. El pasto candelario es específico para zonas altas (1800 msnm), y posee una altura de 2,5 m aproximadamente, un rendimiento de 6 kg por m<sup>2</sup> y tarde de 45 a 50 días para rebrotar (J. Sanchez & Soto, 1999).

## **4. METODOLOGÍA**

En la presente metodología se comenzará por describir la zona de estudio y la evaluación del grado de erosión actual en la Finca Alto Fresco. Esto se realizará, como se muestra en la figura 2, mediante la explicación de los procedimientos necesarios para obtener el diagrama de estabilidad de la ladera, los factores respectivos de la ecuación universal del suelo (RUSLE) y la matriz de uso de la tierra. Por otra parte, se explicará el proceso de diseño de las obras de conservación agronómicas y estructurales, adecuadas para mejorar el potencial productivo. Finalmente se describirán las matrices necesarias para emplear un análisis económico y ambiental que determinará la viabilidad del proyecto en términos económicos y ambientales.



**Figura 2.** Diagrama metodológico.

#### 4.1.Descripción de la zona de estudio

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el nivel de erosión en la finca Alto Fresco ubicada en Capellades de Alvarado está en aumento. Esto está vinculado con los factores climáticos que afectan la zona y con el alta pendiente que posee el terreno en estudio. Según Sánchez (2014) los suelos de la zona de Cartago son profundos, con alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente, buena conductividad hidráulica y excelente infiltración. Sin embargo, estos suelos también presentan problemas de erosión,

contaminación y pérdida de fertilidad. La topografía accidentada y la frecuencia e intensidad de las lluvias genera altas tasas de erosión en esta zona, si a esta problemática se le suman las prácticas inadecuadas de sobrepastoreo la erosión se producirá en un lapso aún más corto.

En el caso de la finca Alto Fresco se presentan evidencias muy marcadas de la degradación del suelo ya que existe la presencia de una cárcava de gran extensión y se puede verificar el constante lavado de suelo que producen las fuertes lluvias. Sin embargo, a pesar de la problemática que presenta el terreno, atribuida al pastoreo, la pronunciada pendiente y la alta frecuencia e intensidad de precipitación; es posible mitigar el avance de la erosión en la zona y el avance progresivo de la cárcava mediante el diseño de obras de conservación de suelo y la implementación de acciones para el mejor manejo del recurso.

#### **4.2.Capacidad de uso de la tierra.**

La clasificación del uso de la tierra comprende tres niveles los cuales son las clases, subclases y unidades de manejo. Las clases que se observan en el anexo 1, se definen como los grupos de tierras que presentan condiciones similares en el grado relativo de limitaciones y riesgo de deterioro para su uso en forma sostenible. Las subclases que se muestran en el anexo 2, son grupos de tierras dentro de una clase que tienen limitaciones del mismo tipo. Las unidades de manejo indican la o las limitantes condicionantes que restringen su utilización en actividades agrícolas, pecuarias y forestales. (MAG & MINAE, 2020)

La unidad de manejo posee los siguientes parámetros: pendiente, erosión sufrida, profundidad efectiva, textura, suelo, pedregosidad, fertilidad, toxicidad, salinidad, drenaje, riesgo de inundación, zonas de vida, periodo seco, neblina, viento.

La pendiente de un terreno se expresa cómo el grado de declive, lo que significa, una relación entre las distancias vertical y horizontal de dos puntos en términos porcentuales. Para estudios a nivel de detalle o superiores, la pendiente debe tener una mayor consideración en el micro relieve, por lo que la frecuencia de su medición debe ser mayor, pues afecta labores de labranza y movimiento del agua sobre el suelo (MAG & MINAE, 2020). La clasificación de la pendiente se observa en el anexo 3.

La erosión se refiere al daño visible causado a los suelos por la erosión acelerada no controlada. Para medir el grado de erosión se recurre a la observación, en el campo, de

pedestales, raíces desnudas, la existencia de canalículos, terracetos, surcos, cárcavas, deslizamientos, remoción de masas y la acumulación de sedimentos en el pie de pendientes y vías de desagüe (MAG & MINAE, 2020). Su clasificación se puede observar en el anexo 4.

La profundidad efectiva se define como el grosor de las capas del suelo, que permiten la penetración y el desarrollo normal de los sistemas radiculares. Su límite inferior está definido por capas o estratos contrastantes que impiden el desarrollo de las raíces (MAG & MINAE, 2020). La profundidad efectiva se clasifica según el anexo 5.

Por otra parte, la textura del suelo se obtiene mediante la prueba de Bouyucos y se categoriza según el anexo 6.

La pedregosidad se refiere al contenido de piedras o rocas que interfieren en las labores de labranza, crecimiento de raíces y el movimiento de agua (MAG & MINAE, 2020). Esta se categoriza mediante el anexo 7.

Para efectos de la clasificación, el criterio de fertilidad se deberá utilizar en aquellos terrenos con pendientes menores del 55% (MAG & MINAE, 2020). Para evaluar la fertilidad del suelo se deberá utilizar el anexo 8.

La toxicidad al cobre se refiere a las concentraciones de cobre en el suelo, que pueden llegar a ser tóxicas para la mayoría de los cultivos (MAG & MINAE, 2020). Este factor se clasifica mediante el anexo 9.

La salinidad corresponde a la concentración de sales solubles en el suelo, este parámetro se obtuvo mediante el anexo 10 el cual relaciona los valores de pH del suelo con su salinidad. Por otra parte, en el anexo 11 se muestra la categorización de la clasificación de la salinidad de los suelos.

El drenaje es la rapidez con que el agua se desplaza, ya sea por escurrimiento superficial (drenaje externo) o por su movimiento a través del perfil hacia espacios subterráneos (drenaje interno) En este sentido, la categoría drenaje tiene una relación directa con la pendiente y clase textural y este se clasifica según el anexo 12 (MAG & MINAE, 2020).

El riesgo de inundación se refiere a la probabilidad y frecuencia de ocurrencia de desbordes de ríos o quebradas inundando las áreas adyacentes (MAG & MINAE, 2020). Este riesgo se clasifica mediante el anexo 13.

La zona de vida es un conjunto de ámbitos específicos de los factores climáticos principales, constituido por la biotemperatura, precipitación y la humedad, los cuales caracterizan una condición ambiental particular para un área geográfica determinada. De acuerdo con el mapa ecológico de Costa Rica el país cuenta con doce zonas de vida diferentes las cuales están clasificadas en el anexo 14 (MAG & MINAE, 2020).

El período seco es el número de meses secos consecutivos durante el año. Para efectos comparativos se consideran meses secos aquellos donde la precipitación es inferior a la mitad de la evapotranspiración potencial (MAG & MINAE, 2020). Este se clasifica según la cantidad de meses que dure dicho periodo, como se muestra en el anexo 15.

La presencia de neblina, común sobre la vegetación arbórea, es una característica que se identifica fácilmente mediante la presencia de musgos y hepáticas, su frecuencia y densidad (MAG & MINAE, 2020). La cantidad de neblina se categoriza mediante el anexo 16.

El viento ejerce un efecto mecánico directo sobre las plantas, desecamiento del ambiente y provoca erosión eólica. La categorización de la velocidad del viento se muestra en el anexo 17.

### **4.3. Estabilidad de ladera**

#### **4.3.1. Escorrentía**

Para poder calcular el valor de la escorrentía superficial se obtuvo la precipitación de diseño, el número de curva y por ultimo la estabilidad de la ladera. Estos parámetros se obtuvieron de la siguiente manera.

#### **4.3.2. Cálculo de la precipitación de diseño**

Para determinar el valor de la escorrentía fue necesario calcular una precipitación de diseño; la cual se obtuvo a partir de datos brindados por la página *Giovanni Nasa*, en la cual se descargaron datos de precipitaciones diarias para un periodo de cinco años (2016-2020) en la zona delimitada por las coordenadas 523974,4 O 1098710,6 N (CRTM05).

Una vez descargados los datos, se calculó la precipitación máxima acumulada cada cinco días para cada año y a partir de dichos valores, se ordenaron los datos de mayor a menor y a cada uno de estos valores se le asignó un número de orden y posteriormente se calculó el periodo de retorno para cada dato mediante la ecuación 1.

$$Tr = \frac{n+1}{m} \quad (1)$$

Donde:

m: número de dato ordenado.

N: número de datos en total.

Una vez obtenido el periodo de retorno de cada dato se obtuvo que no había ningún dato con un Tr de 5 años por lo cual se procedió a interpolar entre el valor de Tr inmediatamente superior a 5 años y el inmediatamente inferior. Con dicha interpolación se obtuvo el valor de la precipitación de diseño.

#### **4.3.3. Cálculo de número de curva (NC)**

Para calcular el valor de escorrentía se empleó el método del número de curva el cual requiere en primera instancia el valor de la Condición Hidrológica de la zona en estudio el cual se puede obtener mediante el anexo 18, según la cobertura vegetal de la finca. Por otra parte, con el anexo 19 se obtuvo el grupo hidrológico del suelo según sus características de escurrimiento, profundidad, textura y taza de transmisibilidad del agua.

Seguidamente se procedió a emplear el anexo 20 para obtener el número de curva con condición de humedad antecedente II, perteneciente a la cobertura, condición hidrológica y grupo hidrológico del área en cuestión. Sin embargo, se debe obtener un valor real de la condición de humedad antecedente (CHA) con respecto a la precipitación de diseño calculada, por lo que con el anexo 21 se procedió a obtener el CHA real.

En el caso de que el CHA sea I o III se obtiene el número de curva mediante el anexo 22. Si el CHA se mantuviera en II se utiliza el número de curva obtenido en el anexo 20.

Para realizar el cálculo de infiltración potencial se emplea la ecuación 2.

$$S = \left( \frac{1000}{NC} - 10 \right) * 2,54 \quad (2)$$

Donde:

S: infiltración potencial (cm).

NC: número de curva.

Finalmente, para calcular la escorrentía de la zona en estudio se procedió a emplear la ecuación 3.

$$E = \frac{(P-0,2S^2)}{P+0,8(S)} \quad (3)$$

Donde:

E: escorrentía total acumulada (cm).

P: precipitación de diseño (cm).

S: Infiltración potencial (cm).

#### 4.3.4. Estabilidad de Ladera

Inicialmente, se calculó el radio hidráulico de la zona de estudio con la ecuación 4.

$$R = \frac{B}{h} \quad (4)$$

Donde:

R: radio hidráulico.

B: ancho (m).

h: escorrentía (m).

Con la ecuación 5 se calcularon las fuerzas de tracción o fuerzas con las que son empujadas las partículas de suelo debido al agua.

$$\tau_0 = \gamma_w RS \quad (5)$$

Donde:

$\tau_0$ : fuerzas de tracción (N/m<sup>2</sup>).

$\gamma_w$ : peso específico del agua (N/m<sup>3</sup>).

S: pendiente hidráulica (m/m).

Para realizar el cálculo del parámetro de Shield's se tomó como diámetro el valor en donde se encuentra el 50% de las partículas del suelo y se empleó la ecuación 6.

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)D} \quad (6)$$

Donde:

$\tau^*$ : parámetro de Shield's.

$\gamma_s$ : peso específico del material (N/m<sup>3</sup>).

$\gamma_w$ : peso específico del agua (N/m<sup>3</sup>).

D: diámetro de la partícula (m).

Posteriormente, se calculó el número límite de Reynolds con la ecuación 7 y 8.

$$Re^* = \frac{U^* \cdot D}{\nu} \quad (7)$$

$$U^* = (gRS)^{1/2} \quad (8)$$

Donde:

$Re^*$ : número de Reynold.

$U^*$ : Velocidad límite fraccionaria (m/s).

g: gravedad.

S: pendiente.

$\nu$ : viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

Por último, para conocer la ladera es estable o no, se empleó el diagrama de Shield's de la figura 1, donde se ploteó el valor del número de Reynold en el eje horizontal contra el parámetro de Shield's en el eje vertical. Se determina que una ladera es inestable cuando el punto resultado de este procedimiento se encuentra por encima de la curva del diagrama.

#### 4.4. RUSLE

La ecuación de (RUSLE) es un modelo empírico de erosión, para predecir pérdidas de suelo promedio anual por hectárea debido a erosión laminar. Utiliza un método de análisis por factores, los cuales corresponden a la erosividad de las precipitaciones (factor R), la erodabilidad del suelo (factor k), la topografía del paisaje descrito por la longitud e inclinación del terreno (factor LS), la cobertura vegetal (factor C) y finalmente las practicas de conservación (factor P) (Birkel, 2016).

La pérdida de suelo (A) en ton/ha/año, se estimó a través de la ecuación 9

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (9)$$

Donde:

**Factor R:** es un índice de erosión pluvial (parámetro que representa la energía cinética de la lluvia).

**Factor K:** es un factor de erodabilidad del suelo (parámetro que define su capacidad para ser disgregado)

**Factor L:** el factor longitud de pendiente (ladera de máxima pendiente).

**Factor S:** el factor pendiente (como variable que condiciona la mayor menor escorrentía del agua).

**Factor C:** un factor de cobertura de la tierra (como variable capaz de proteger al suelo de la actuación de la energía cinética de la lluvia) (anexo 38).

**Factor P:** un factor prácticas de conservación (se refiere a las prácticas de labranza que modifican la susceptibilidad del suelo a ser erosionado) (anexo 39).

#### 4.4.1. Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizó con el RTK. Se colocó la base en un área alta y despejada de estructuras y árboles. La base del RTK se conecta a una Tablet portátil, la cual posee el programa Field Genius donde se conectan las antenas y se toman los puntos con coordenadas x, y, z. Luego de conectar la base, se desconecta la misma y se procedió a anclar el ROVER, que es la antena móvil la cual sirve para tomar las coordenadas de cualquier área a un radio de 2km. Cabe destacar que el uso de este implemento brinda una precisión milimétrica, sin embargo, si los factores climáticos y la vegetación de la zona no es la correcta los datos generaran un sesgo representativo en la diferencia de altura del terreno.

Luego de obtener cada punto del área de la Finca Alto Fresco, se exportaron los datos a la computadora en los programas Qgis y Arcgis, con la finalidad de obtener el modelo de elevación digital (MED) de la zona de estudio y sus debidas curvas de nivel junto con la pendiente, entre otros parámetros.

#### 4.4.2. Geoproceso

Para poder modelar las condiciones actuales de la finca Alto Fresco se procedió a implementar el software Arcgis 10.8, donde se utilizaron varias herramientas de Geoproceso para obtener datos necesarios para la interpretación de resultados como el MED, las curvas de nivel, líneas de flujo superficial, porcentaje de pendiente y la zonificación de la finca. A continuación, se explicará cada uno de los procesos con mayor detalle.

- *Modelo de elevación digital (MED)*

Con el fin de obtener datos detallados de altura y pendiente de la finca en estudio se procedió a realizar en el programa Arcgis el Modelo de Elevación Digital (MED) de zona en estudio. Para esto fue necesario transformar los puntos de coordenadas x, y, z que se tomaron con el RTK a un archivo *shapefile* (.shp) en el cual se les dio el sistema de coordenadas CRTM05 y se generó una capa de polígono como lindero, el cual abarcó el

área de la finca y sus alrededores. También se generó una capa de línea para modelar el cauce del río que atraviesa el terreno.

Posteriormente se procedió a implementar la herramienta *Topo to Raster* en la cual se empleó como *feature layer* la capa de puntos de coordenadas, se seleccionó en *field* la opción de elevación, en *type* se marcó la opción de *PointElevation* y se utilizó un *output cell size* de 1 m debido a que la calidad de los datos tomados en campo fue bastante alta, dicho procedimiento se puede observar en el anexo 23.

Seguidamente antes de proceder a correr la herramienta se seleccionó la opción de *enviroments* donde se seleccionó como *output coordinate system* el CRTM05, la capa de lindero anteriormente creada se empleó como *processing extent* al igual que el *mask* en el *Raster Analysis*. Finalmente se procedió a generar el MED para toda la finca y cercanías como se muestra en el anexo 24.

Curvas de Nivel: A partir del MED se extrajeron las curvas de nivel con distancia de 1 m. Para este fin se utilizó la función de *contour* donde se empleó como *Input raster* el MED antes realizado. Luego se eligió el intervalo de contorno con valor igual a 1 m con la finalidad de obtener una alta precisión de las curvas del nivel en el terreno, este procedimiento se evidencia en el anexo 25.

- *Trazo de líneas de flujo superficial*

Para realizar las líneas de flujo superficial de la zona se procedió a emplear la herramienta *Flow Direction*, la cual realizó un raster definiendo la dirección del flujo en la ladera, utilizando como *input raster* el MED antes realizado como se muestra en el anexo 26.

- *Pendiente*

Para realizar el raster de pendiente se utilizó la herramienta *slope* donde se empleó como *input raster* el MED anteriormente calculado. El *output measurment* corresponde al tipo de pendiente que se desea obtener, en este caso es en grados por lo que se seleccionó “degree” y como *method* se empleó la opción planar, este procedimiento se puede observar en el anexo 27. Finalmente se clasificó la pendiente en los rangos porcentuales de 0-3, 4-8, 9-15, 16-30, 31-55, 56-75 y > 75, según (MAG & MINAE, 2020).

- *Zonificación de la Finca Alto Fresco.*

Para poder generar resultados certeros se propuso realizar una división de la finca en 8 áreas de muestreo las cuales poseen características de pendiente similares, seguidamente cada área se subdividió en diferentes zonas según el principio de muestrear una hectarea mediante cuatro zonas de muestreo. Debido a esto cada área delimitada posee 4 zonas por hectarea que posea (32 zonas en total), de esta manera se asegura un muestreo lo suficientemente preciso.

Para poder realizar una capa con la zonificación de la finca se procedió a realizar una capa de polígono en Qgis, donde se delimitaron las áreas y zonas de muestreo mediante los puntos de gps tomados en cada muestra.

#### 4.4.3. Erosividad (R)

El cálculo del factor R según la RUSLE se calcula mediante la ecuación 10, la cual cuantifica el efecto erosivo debido a su intensidad:

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30} \quad (10)$$

Donde:

R: Factor de erosividad (MJ\*mm/ha\*h).

E: Energía cinética de la tormenta (MJ/ha).

I<sub>30</sub>: Máxima intensidad de 30 min consecutivos (mm/h).

Sin embargo, para realizar este cálculo se requiere información muy detallada de las precipitaciones, es decir, un registro continuo de las variaciones de intensidad de la lluvia durante los diferentes aguaceros. Debido a esto y teniendo en cuenta que no se poseen estaciones climáticas muy cercanas a la zona de la finca, se procedió a emplear el índice de Fournier (IF) el cual se basa en el uso de los datos de precipitaciones en milímetros como se observa en la ecuación 11.

$$IF = \frac{P_{\max}^2}{P} \quad (11)$$

Donde:

IF: Índice de Fournier.

$P_{\max}$ : Precipitación media correspondiente al mes más lluvioso (mm).

P: Precipitación media anual (mm).

Debido a que este índice solo considera la precipitación mensual del mes más húmedo y no del resto de los meses se procedió a utilizar el índice modificado de Fournier que caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula con la ecuación 12.

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \quad (12)$$

Donde:

IMF: Índice Modificado de Fournier.

$P_i$ : Precipitación de cada mes (mm).

$P_t$ : Precipitación media anual (mm).

Luego de obtener el IMF se emplea la ecuación 13 para generar la relación con el factor de erosividad (R).

$$R = 2,56 * IMF^{1,065} \quad (13)$$

Una vez conocidas las formulas a emplear se realizó el Geoproceso en Arcgis con la finalidad de obtener un valor de erosividad para todas las zonas de la Finca. Para poder realizar este proceso se obtuvieron valores de precipitación de CHIRPS 2.0 donde se obtuvo un raster global de precipitación mensual del 2020 y por ende se realizó un *extract by mask* en la zona de estudio.

Por ser un área tan reducida los valores de precipitación mensual son iguales en todos los puntos del área, por lo cual, para poder generar el valor de R se procedió a realizar una capa de puntos sobre toda la zona de estudio y a los mismos se les asignó los valores de precipitación de todos los meses, antes obtenidos de CHIRPS 2.0.

Teniendo una capa de puntos con valores de precipitación para cada mes del 2020 se procedió a realizar el proceso de interpolación mediante el método de la ponderación de

distancia inversa (IDW), el cual genera un raster de precipitación mensual para todos los meses del año 2020; es decir, se obtienen 12 rasters los cuales se deben sumar con el *raster calculator* para obtener el valor de la precipitación media anual como se muestra en el anexo 28.

Una vez obtenida la precipitación anual se procedió a calcular el IMF mediante la ecuación 12, empleando el *raster calculator* como lo muestra en el anexo 29.

Finalmente, para calcular el factor R se usa la ecuación 13 mediante el *raster calculator* como se muestra en el anexo 30.

#### 4.4.4. Erodabilidad (K)

El factor de erodabilidad se refiere a la capacidad del suelo de ser erosionado. El mismo se puede calcular mediante nomogramas como se muestra en el anexo 31 y ecuaciones de regresión lineal. Para fines de este proyecto se obtendrá el factor mediante la ecuación 14. Sin embargo, para obtener este parámetro es necesario obtener los valores de materia orgánica, textura, permeabilidad y estructura del suelo en estudio.

$$K = (2,1 * 10^{-4}(12 - MO)M^{1,14} + 3,25(s - 2) + 2,5(p - 3))/100 \quad (14)$$

Donde:

M: (%limo + %amf) \* (100 - %arcilla).

MO: % materia orgánica.

s: tipo de estructura del suelo (1 granular muy fina; 2 granular fina; 3 granular gruesa; 4 en bloques-laminar-masiva).

p: permeabilidad (1 rápida; 2 moderadamente rápida; 3 moderada; 4 lenta a moderada; 5 lenta; 6 muy lenta).

K: está expresada en ton\*acre\*h\*(100\*acre\*ft\*ton\*in).

Es de suma importancia tener en cuenta que el parámetro de estructura del suelo se determina de forma visual según la morfología que se observe en cada zona, para darle un valor a dicha variable se emplea el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Código USLE según tipo de estructura.

<b>Código USLE</b>	<b>Tipo de estructura</b>
1	Granular muy fina
2	Granular fina
3	Granular de gruesa a media
4	Bloques, laminar, maciza

Fuente: Mancilla, 2008

Para obtener el factor  $p$  se procedió a implementar el cuadro 4 que relaciona el valor de la permeabilidad con la conductividad hidráulica.

**Cuadro 4.** Código de permeabilidad según conductividad hidráulica.

<b>Código USLE</b>	<b>Categoría de Permeabilidad</b>
1	Rápida (más de 12,7 cm/h)
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm/h)
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm/h)
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm/h)
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm/h)
6	Muy lenta (menor a 0,13 cm/h)

Fuente: Mancilla, 2008

Por otra parte, para obtener los factores  $M$  y  $MO$  se requirieron pruebas de laboratorio como las que se muestran en el cuadro 5.

**Cuadro 5.** Parámetros obtenidos en laboratorio.

<b>Laboratorio</b>
Muestras Disturbadas
Textura
Distribución de Partículas
Materia Orgánica

- *Textura*

Se pesaron 40g de suelo previamente secado a 105°C durante 24h y pasado por un tamiz de 2mm, se colocaron en la copa dispersora. Se añadieron 15mL de hexametáfosfato de sodio y 200mL de agua de agua destilada. Se colocó la copa en el dispensador eléctrico y se agitó a una velocidad de 2400rpm durante 15min. Se trasvasó al cilindro de Bouyoucos, con la piseta se aseguró de que no quedaran partículas de la muestra en la copa, se llenó el cilindro hasta la marca de 1000mL. Se introdujo el hidrómetro y se aseguró que llegara a la marca de 1130 mL. Se agitó con bastante fuerza y se le colocó el hidrómetro a los 40s (primera lectura). Inmediatamente, se introdujo un termómetro para obtener la temperatura de la mezcla. Posteriormente, se dejó en reposo durante 2 horas, al finalizar este lapso se realizó la lectura con el hidrómetro e inmediatamente se tomó la temperatura (Valencia, 2004).

Antes de realizar los cálculos se debe realizar la corrección debida a la temperatura. Por cada grado encima de 19,4°C se suman 0,3 a la lectura LH<sub>40s</sub> o LH<sub>2h</sub> y por cada grado menor a 19,4 °C se restan 0,3 a la lectura LH<sub>40s</sub> o LH<sub>2h</sub>. Una vez realizadas las correcciones se procedió a realizar los cálculos con los valores corregidos, estos se muestran en la ecuación 15, 16, 17 y 18.

$$Material_{suspensión} = \frac{L_{40s}}{m_m} * 100 \quad (15)$$

$$\%Area = 100 - Material_{suspensión} \quad (16)$$

$$\%Arcilla = \frac{L_{2h}}{m_m} * 100 \quad (17)$$

$$\%Limo = 100 - (\%Arena + \%Arcilla) \quad (18)$$

Donde:

L<sub>40s</sub>: lectura corregida a los 4s (g/L).

L<sub>2h</sub>: lectura corregida a las 2h (g/L).

$m_m$ : masa de la muestra (g).

Con ayuda del anexo 32, según el porcentaje de limo, arcilla o arena se determinó el nombre de la textura del suelo.

- *Distribución de partículas*

Una vez finalizado el proceso de bouyucos, se tomó el producto y se vertió sobre un tamiz de 0,063 mm asegurándose que la probeta quedara limpia y sin ninguna partícula, todo lo que se tamiza son limos y arcillas y se conservan solo las arenas.

Seguidamente se procedió a pasar el contenido de arenas a una cápsula de aluminio, este procedimiento se debe realizar con mucho cuidado, observando que no se quede ninguna partícula por fuera.

Luego se realizó una pirámide de tamices los cuales tienen un tamaño de 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm y 0,063 mm (de arriba hacia abajo respectivamente), en seguida se procedió a verter sobre la pirámide de tamices el contenido de la cápsula de aluminio anteriormente mencionada y a lavar con suma delicadeza cada tamiz, con el fin de obtener solo las partículas pertenecientes a cada nivel.

De este modo una vez que se obtuvieron las partículas asociadas a cada tamaño de tamiz se procedió a verterlas en una cápsula de aluminio identificada por tamaño de partícula.

Finalmente se procedió a insertar las cápsulas de aluminio en el horno a 105°C con el fin de secar el suelo y obtener el peso de las arenas gruesas, medias, finas y muy finas mediante la ecuación 19.

$$Peso\ arena = peso\ total - peso\ capsula \quad (19)$$

El peso de las partículas debe coincidir con el peso de las arenas totales obtenido por el método de bouyucos, si no es así se permite solo un 5% de error entre los pesos obtenidos.

- *Materia Orgánica*

Mediante el método de ignición, se pesó una muestra de 20g de suelo previamente secada a 105°C, posteriormente se colocó en una cápsula de porcelana y se maceró con un mortero. Seguidamente se pesó otra cápsula de porcelana y se colocaron 10g de este suelo macerado. Posteriormente se colocó en la mufla a 450°C durante 5h. Cuando se sacó la muestra de la mufla se pesó inmediatamente. Se realizó el mismo procedimiento para las demás submuestras disturbadas. Con la ecuación 20 se determinó la materia orgánica presente.

$$MO = \frac{pSS_{105^{\circ}C} - pSS_{450^{\circ}C}}{pSS_{450^{\circ}C}} \quad (20)$$

Donde:

$pSS_{105^{\circ}C}$ : peso del suelo seco a 105°C (g).

$pSS_{450^{\circ}C}$ : peso del suelo seco a 450°C (g).

MO: materia orgánica (%).

Se realizaron otras metodologías como realizar el mismo proceso por 16 h, sin embargo, se obtuvieron valores de MO muy altos de aproximadamente 19%. Dichos valores no resultaban confiables por lo que se procedió a llevar 5 muestras aleatorias al Centro de Investigaciones Agronómicas de la UCR (CIA) en donde se obtuvieron porcentajes igualmente altos de materia orgánica, por lo que se procedió a asumir el valor más crítico para realizar el cálculo de erodabilidad, que en este caso es 4%.

- *Conductividad Hidráulica*

Para obtener la conductividad hidráulica se empleó el método de la ecuación de Darcy mediante el análisis de 63 submuestras indisturbadas tomadas para cada zona de muestreo. Una vez en el laboratorio, se le colocó una malla fina en una de las superficies de cada cilindro, atada por medio de una liga. Por último, se dejaron las muestras saturando en una bandeja con agua para que esta ascendiera por capilaridad.

Posteriormente, se colocó en cada cilindro otro encima del mismo diámetro, el cual se mantuvo sujeto mediante una banda elástica. Se colocó en una grilla de madera un embudo,

sobre el cual se situó el primer cilindro, se llenó de agua el cilindro que se encontraba encima, asegurándose siempre de mantenerlo a carga constante.

Seguidamente, se colocó un beaker debajo del embudo, manteniendo la carga constante, se fijó un tiempo de dos minutos, posteriormente se midió y anotó el volumen que se obtuvo en ese tiempo, se hicieron 3 repeticiones de la medición de este volumen. Se realizó este procedimiento para las demás muestras.

Se determinó la conductividad con la ecuación 21.

$$K = \frac{V*L}{A*t*\Delta H} \quad (21)$$

Donde:

V: Volumen del cilindro con la muestra de suelo (cm<sup>3</sup>).

L: altura del cilindro con la muestra (cm).

A: área de transversal del cilindro (cm<sup>2</sup>).

$\Delta H$ : altura constante de agua sobre la muestra (cm).

t: tiempo que duro la medición (s).

K: conductividad hidráulica (cm/s).

#### 4.4.5. Infiltración

La infiltración se cálculo en campo mediante el uso del mini-disk es cual es un tubo de ensayo de 32.7 cm. de longitud y 3.1 cm. de diámetro. En la parte superior se encuentra un tapón de goma con un capilar graduado en centímetros para determinar la succión a utilizar. En su parte inferior posee un disco poroso por donde el agua fluye hacia el suelo.

Separado en dos cámaras por una placa de goma, la cámara superior llamada cámara de burbujas controla la succión sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo, su función principal es crear una succión constante sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo la cámara inferior esta graduada en centímetros y contiene el agua a aplicar en la prueba, posee un tubo mariotte que se comunica con la cámara superior.

Para su utilización se llena de agua ambas cámaras tapándose herméticamente con el disco y el tapón de goma, luego se coloca verticalmente sobre la superficie del suelo.

Previamente se coloca un relleno de arena en el suelo con el fin de lograr un buen contacto hidráulico entre el infiltrómetro y el suelo. Una vez hecho esto el agua dentro del tubo fluye y se infiltra dentro del suelo a una tensión igual a la que produce el capilar dentro de la cámara de burbujas de -0.5cm, -1.0cm hasta -6.0cm de columnas de agua.

Lo que se debe hacer es realizar una medición del tiempo que tarda el agua en bajar un mililitro en el tubo, cuando tomaron 20 mediciones de este tipo se procedió a tomar el tiempo que tarda el agua en bajar 5 mililitros y finalizarlo al haber tomado al menos 7 u 8 mediciones.

Para calcular la infiltración acumulada se procedió a emplear el Excel correspondiente al implemento (Mini-disk). El mismo generó una curva y una ecuación 22 propuesta por Zhang en 1997.

$$I=C_1t+C_2\sqrt{t} \quad (22)$$

Donde:

I: infiltración acumulada.

C<sub>1</sub>: constante relacionada con la conductividad hidráulica.

C<sub>2</sub>: sortividad del suelo.

Por otra parte, mediante el cálculo de la infiltración acumulada se obtiene la conductividad hidráulica (k) empleando la ecuación 23.

$$k=\frac{C_1}{A} \quad (23)$$

Donde:

C<sub>1</sub>: Pendiente de la curva de la infiltración acumulada.

A: Constante de van Genuchten.

La constante de van Genuchten se obtiene mediante el anexo 8 el cual correlaciona el tipo de suelo con la succión para obtener dicho parámetro.

Por otra parte, para obtener la infiltración base se asumió que esta es igual a la conductividad hidráulica obtenida en ecuación 22, debido a que como se explicó en el

apartado 3.4 de este documento la infiltración base posee un valor aproximado a la conductividad hidráulica.

#### 4.4.6. Factor de Inclinación y Longitud (LS)

Para calcular el índice LS se procedió a implementar la ecuación 24 de (Moore & Burch, 1986)

$$LS = \left( \frac{F_{accum} * (cell\ size)}{22,13} \right)^{0,4} * \left( \frac{\sin(slope)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (24)$$

Donde:

LS: Índice de inclinación y longitud.

Facum: Flow accumulation (geoproceso).

Cell size: tamaño de píxel (m).

Slope: factor S

La pendiente se obtuvo como se muestra en el apartado 4.3.2.4. de este documento. Sin embargo, la misma se obtuvo en grados por lo que, se procedió a implementar el raster calculator y transformarla a radianes como se muestra en el anexo 33, multiplicándola por  $\pi$  y dividiéndola entre 180°.

Luego, para calcular el factor de la longitud de la ladera se utiliza el raster de *flow accumulation* el cual se obtiene en primera instancia rellenando los sumideros del modelo de elevación digital de la zona, esto se realizó con la herramienta *fill*, como se muestra en el anexo 34.

Seguidamente, se realizó el raster de *flow direction* que se observa en el anexo 35 donde se tomó como *input raster* el *fill* del MED generado anteriormente.

Para generar el raster de *flow accumulation* necesario para este geoproceso se procedió a utilizar la herramienta *flow accumulation* como se denota en el anexo 36 y se emplea como *input raster* el *flow direction* raster antes creado. Como resultado se obtiene la visualización de las zonas negras donde no existe acumulación de flujo, y las zonas blancas donde existe dicha acumulación, que por lo general son los ríos.

Debido a que el tamaño de celda que se manejó en el proyecto es muy fino (1 m) se procedió finalmente a implementar la calculadora raster con la ecuación 21, como se

muestra en el anexo 37. De esta forma se generó un raster con los valores del factor LS requeridos para el cálculo de la RUSLE en cada área de zonificación.

#### **4.4.7. Cobertura (C)**

Para obtener el parámetro de cobertura de suelo en la finca Alto Fresco, se procedió a elegir las coberturas de las zonas en estudio y con respecto a esto se escogió un valor para C según el tipo de cubierta del suelo. Dichos valores se obtuvieron en el anexo 38.

#### **4.4.8. Prácticas (P)**

De la misma manera se procedió con el factor de practicas en la zona, se escogieron las prácticas realizadas por área de zonificación y se procedió a asignarles un valor según el anexo 39. Cabe destacar que cuando los suelos no poseen ninguna práctica de conservación este valor es 1.

#### **4.4.9. Obtención de mapa del estado de erosión actual**

Para la realización del mapa del estado actual de erosión se procedió a realizar un mapa de las 8,55 ha de terreno de la Finca Alto Fresco. Una vez obtenido dicho mapa se procedió a realizar la división del área obteniendo ocho áreas de muestreo en total. Como se mencionó anteriormente en el apartado 4.3.2.5. de zonificación de la finca, se subdividieron las áreas en 32 zonas de muestreo en total, por lo cual mediante el uso de imágenes satelitales y el uso del plugin Google Earth Engine se obtuvo un croquis de muestreo.

El croquis de muestreo funcionó para ubicar las diferentes submuestras disturbadas e indisturbadas que se tomaron durante la etapa de muestreo, así como los datos obtenidos de infiltración y penetración. Una vez que se obtuvo el croquis se procedió a utilizarlo como plantilla en 5 mapas diferentes.

El primer mapa que se obtuvo fue el de coeficiente R de erosividad, en el cual no existieron variables en ninguna de las 32 zonas, ya que como se mencionó en el apartado 4.3.3. el coeficiente R se obtuvo del resultado de la interpolación de los valores de precipitación en la zona y el índice modificado de Fournier. De forma consecutiva se procedió a realizar el segundo mapa el cual abarcó valores de erodabilidad (factor K), en este caso los valores difirieron en las 32 zonas de muestreo, debido a las diferencias en la

distribución de partículas, porcentaje de materia orgánica, estructura granular, infiltración y conductividad hidráulica.

Por otra parte, se realizó un mapa para el factor de longitud e inclinación (LS) según los valores obtenidos de pendiente en cada una de las 32 zonas en estudio. Finalmente, para los factores de cobertura (C) y prácticas (P) se le asignó a cada una de las zonas en estudio los valores correspondientes según la zona de muestreo.

Finalmente, cuando se obtuvieron las 5 capas con los diferentes factores de la RUSLE se procedió a implementar en la capa de zonificación de la finca la multiplicación de los factores R, K, LS, C y P, mediante la herramienta de *field calculator* como se muestra en el anexo 40, y de esta manera se obtuvo el valor de las pérdidas de suelo en toneladas por hectárea.

#### **4.5. Técnicas agronómicas**

La implementación de diseños agronómicos tiene la finalidad de mitigar el proceso de erosión en la zona de estudio. Si bien es cierto no se pueden implementar todas las técnicas de ganadería sostenible en una ladera con alto porcentaje de pendiente, como es el caso de la finca en cuestión, sí es posible aplicar ciertas metodologías como las que se detallan a continuación.

##### **4.5.1. Construcción de diques de piedra**

Para asegurar la adecuada protección de cárcavas se deben construir diques de piedra en las partes altas, medias y bajas. La finalidad es que los diques se levanten a la altura del terreno y formen un media luna ancha.

Como se muestra en el cuadro 6, estas estructuras se deben construir a una distancia establecida según el porcentaje de pendiente que posee la ladera.

**Cuadro 6.** Distanciamiento entre diques según la pendiente del terreno.

<b>Distancia entre diques (m)</b>	<b>Pendiente</b>
4-12	15%
2-4	15-30%
1,3-2	30-50%

Fuente: IICA, 2012

Para realizar un adecuado mantenimiento de la obra se propuso subir el muro anualmente, ya que el dique comienza a rellenarse de tierra progresivamente. Una vez estabilizado el equilibrio en el fondo de la cárcava se debe rehabilitar con vegetación protectora de mediano tamaño y raíces densas y profundas.

#### 4.5.2. Rotación de potreros.

Para implementar la rotación de potreros se procedió a calcular la cantidad y el área necesaria de apartos para 70 cabezas de ganado. Para realizar dicho procedimiento se necesitó seleccionar el pasto de cobertura, según el criterio de rendimiento en altitudes de 1700 a 1900 msnm.

Posteriormente se seleccionaron, según la capacidad de uso del suelo, las zonas aptas para la ganadería. De esta manera se obtuvo el porcentaje de área total disponible para pastoreo. Seguidamente se diseñó el área diaria requerida para las 70 cabezas de ganado mediante la relación de 1m<sup>2</sup> de suelo producirá 1 kg de pasto kikuyo o estrella.

El área que requiere cada potrero se determinó mediante la ecuación 25, la cual esta en función de 10% del peso corporal de la vaca. No obstante, para la modalidad semiestabulada se empleó la ecuación 26.

$$A_{potrero} = (10\% * P_{corporal}) * (V_t) \quad (25)$$

$$A_{potrero} = \frac{(10\% * P_{corporal}) * (V_t)}{2} \quad (26)$$

Donde:

$A_{potrero}$ : área que abarca un solo potrero (m<sup>2</sup>).

$P_{corporal}$ : peso corporal de la vaca (Kg).

$V_t$ : Cantidad de vacas totales.

En la ecuación 27 se corroboró que el área apta para ganadería es suficiente para la cantidad de vacas que posee la finca y el tiempo de rotación requerido según el tipo de pasto empleado.

$$P_t = \frac{A_{apta}}{A_{potrero}} \quad (27)$$

Donde:

$P_t$ : cantidad de potreros totales

$A_{potrero}$ : área que abarca un solo potrero ( $m^2$ ).

$A_{apta}$ : total del área apta para ganadería ( $m^2$ ).

Si el área no es suficiente se deben explorar otras opciones como el cambio a un sistema completamente estabulado que evite el sobrepastoreo.

#### 4.5.3. Cercas vivas

El método de delimitación de cercas vivas consistió en el uso de la herramienta *measure* de Arcgis, con la cual se midieron los perímetros de los apartos diseñados. Seguidamente se decidió colocar postes muertos cada 10 metros y entre dichos postes colocar los árboles (forrajeros, maderables o frutales) según el espaciamiento requerido de la especie arbórea. La ecuación 28 se utilizó para obtener la cantidad de árboles necesarios para la cerca

$$viva.N_{árboles} = \frac{P_{apartos}}{E_{requerido}} \quad (28)$$

Donde:

$N_{árboles}$ : número de árboles.

$P_{apartos}$ : perímetro de apartos (m).

$E_{requerido}$ : espaciamiento requerido entre plantas (m).

#### 4.5.4. Bancos Forrajeros

Para aplicar la siembra de bancos forrajeros se delimitó mediante Arcgis las zonas con mayor cercanía a los establos de la finca, con el objetivo de ahorrar tiempo de transporte. Luego se calculó mediante la ecuación 25 la cantidad de área por sembrar para suplir las necesidades alimenticias del ganado.

Los bancos forrajeros deben estar espaciados según la necesidad de cada especie de arbusto o pasto y deben sembrarse a contorno. Con la ecuación 29 se utilizó para calcular la densidad de siembra para cada especie.

$$D_{siembra} = \frac{A_{siembra}}{E_{requerido}} \quad (29)$$

Donde:

$D_{siembra}$ : densidad de siembra (árbol/ha).

$A_{siembra}$ : área de siembra (m<sup>2</sup>).

$E_{requerido}$ : espaciamiento requerido entre planta (m).

#### 4.5.5. Ganado Estabulado

Para diseñar el establo se consideró cementar con una capa de 25 cm de ancho el piso donde se mantienen las reses y proporcionarle al mismo un desnivel de 4 a 5% para facilitar su limpieza, el desnivel se orientó de forma opuesta a los comederos.

Se propuso construir un establo totalmente techado en donde cada animal contará con 5 m<sup>2</sup> de espacio, los comederos deben tener 0,5 m lineales por animal, 0,6 m de ancho y 0,5 m de profundidad. También se debe tener en cuenta la instalación de un bebedero por corral, separado de los comederos para facilitar el acceso de todos los animales. Los bebederos deben tener 1,5m de largo, 45 cm de ancho y 45cm de profundidad.

#### **4.5.6. Compost.**

Para realizar un abono bokashi de microorganismos de montaña (MM) se propuso primera instancia la búsqueda de dichos microorganismos dentro de las zonas boscosas de la finca. Los MM se buscan en hojarasca secas y en proceso de descomposición, sin embargo, no se debe tomar la primera capa de hojas que se encuentra en los primeros 2 cm de profundidad, sino que se recolecta la segunda capa que contiene la mayoría de los MM.

Para reproducir los MM se requiere del material recolectado en el bosque, un carbohidrato como sustrato y energía (semolina de arroz) y un azúcar como energía (melaza). Una vez reproducidos los MM se propuso la activación de forma líquida utilizando un recipiente de plástico con tapa, 2 kg de MM, medio galón de melaza, un saco limpio para usar como colador y 50 L de agua sin cloro.

Para realizar este procedimiento se debe colocar en el recipiente, el agua y la melaza, luego se sitúan en el saco el MM sólido y ubican dentro del recipiente. Se debe mantener el recipiente bajo sombra por 15 días hasta que el agua tome un color y olor fermentado. El producto líquido puede perdurar hasta dos meses si el recipiente se mantiene tapado y en la sombra.

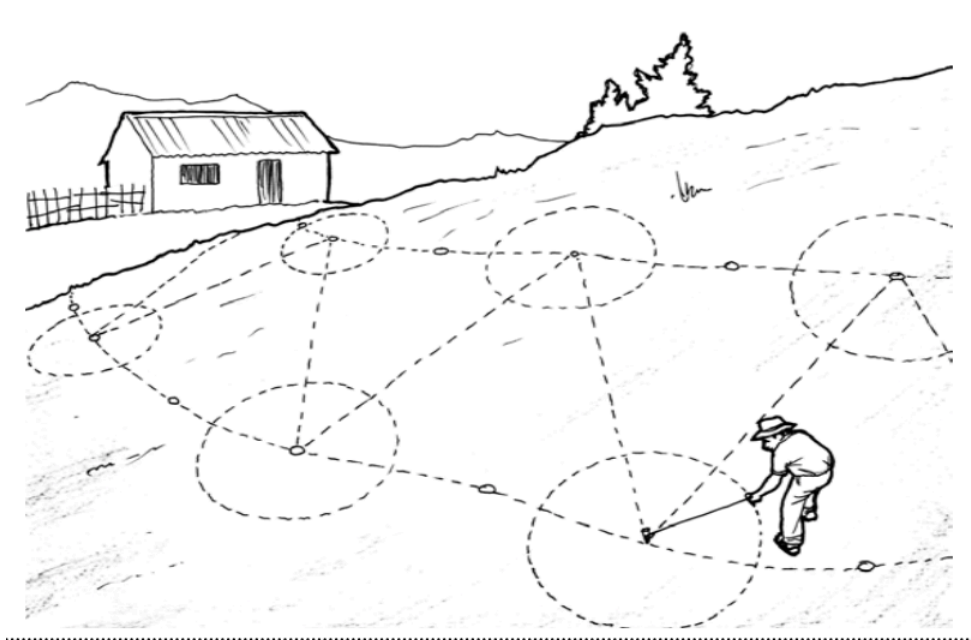
Los MM líquido se aplican combinados con agua en una relación de 1:20 ya que para diluir 1 litro de MM se requirieron 20 litros de agua. Esta mezcla se aplica con una bomba fumigadora en los establos para disminuir los malos olores y en la boñiga recolectada para acelerar la descomposición de la misma y su transformación a compost orgánico.

Finalmente es de suma importancia la rotación y aireación de la boñiga con los MM hasta la obtención de un abono orgánico de excelente calidad.

### **4.6. Propuesta hidráulica**

#### **4.6.1. Terrazas individuales**

Para construir las terrazas individuales se propuso en primera instancia el trazo de las curvas de nivel en la ladera. Luego se distribuye la construcción de las mismas en forma de triángulo según el espaciamiento que requiere la especie arbórea empleada. La figura 3 muestra la distribución del área según este método.



**Figura 3.** Distribución del área para la construcción de terrazas individuales. Fuente: Proyecto JALDA, 2012.

Luego de trazar la distribución de área, se procede a delimitar la zona de excavación que debe de ser de 1 o 2 m de diámetro. Una vez el área es delimitada se procede a iniciar excavación. Este trabajo es completamente manual y se realiza picando la parte alta del círculo y colocando la tierra removida en la parte inferior del mismo, hasta obtener una terraza casi plana. Es recomendable que la terraza tenga una pendiente de 5 o 10% hacia el interior de la estructura, para permitir mayor infiltración del agua.

Se debe reforzar el borde inferior de la terraza con piedras del lugar y se colocan barreras vivas en la parte superior de la terraza, con la finalidad de disminuir la velocidad del agua de escorrentía y por ende la fuerza de arrastre de las partículas de suelo.

Finalmente, para realizar la plantación de árboles en las terrazas se propuso la apertura de un hoyo dentro de cada una de ellas, con dimensiones de 40 cm de profundidad y 30 cm de diámetro. En el hoyo se coloca la plántula y se procede a tapar el resto. Es de suma importancia suplir las necesidades hídricas y nutritivas de las plántulas y árboles con el objetivo de obtener una buena calidad radicular que le de sostén al suelo y buena calidad de frutos.

Por otra parte, par realizar el cálculo de corte y relleno de cada terraza se empleó en primera instancia la ecuación 29, la cual indica la profundidad de corte a la que se debe realizar la terraza, en función de la pendiente y el ancho del banco que como se sabe tendrá un valor estándar de 1m.

$$S * \frac{x}{2} = \Delta H \quad (29)$$

Donde:

S: pendiente (%).

x: el ancho total del banco (m).

$\Delta H$ : la diferencia de altura o profundidad de corte (m).

Para calcular el área y volumen de relleno se procedió a emplear las ecuaciones 30 y 31 respectivamente.

$$A_{corte} = \frac{\frac{x}{2} * \Delta H}{2} \quad (30)$$

$$V_{corte} = A_{corte} * L \quad (31)$$

Donde:

$A_{corte}$ : área de corte (m<sup>2</sup>)

$V_{corte}$ : volumen de corte (m<sup>3</sup>)

L: longitud de la terraza (m)

Luego se calculó la cantidad de terrazas según la densidad de siembra del cultivo. Como la recomendación es diseñar las terrazas en forma de triangulo la ecuación 32 define la cantidad de árboles o terrazas que se deben sembrar en la zona.

$$D_{siembra} = \frac{A}{d^2} * 1,154 \quad (32)$$

Donde:

$D_{siembra}$ : densidad de siembra.

A: área en  $m^2$ .

d: distanciamiento entre plantas (m)

Finalmente se calculó el caudal de escorrentía de las terrazas en cada zona de muestreo mediante el cálculo del tiempo de concentración, el coeficiente de escorrentía y el área en hectáreas de las zonas analizadas. El método que se empleó fue el racional que se describe en la ecuación 33.

$$Q = \frac{C * I * A}{360} \quad (33)$$

Donde:

Q: caudal máximo en  $m^3/s$ .

I: intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración, y para un período de retorno dado en mm/h.

A: área (ha).

C: coeficiente de escorrentía.

#### **4.7. Estimación de pérdidas por erosión tomando en cuenta la propuesta de diseño.**

Para realizar un cálculo del impacto en las pérdidas de suelo por erosión tomando en cuenta el diseño propuesto se empleó la metodología detallada en el apartado 4.4 del presente documento.

Los cambios que se generaron a la ecuación RUSLE se muestran en el cuadro 7. Algunos factores como la erosividad, erodabilidad y la longitud e inclinación de la pendiente no son variables, sin embargo, la propuesta de diseño pretende mejorar valores de cobertura y prácticas de conservación.

**Cuadro 7.** Variantes en el cálculo de las RUSLE.

<b>Factor de la RUSLE</b>	<b>Variantes</b>
<b>Erosividad (R)</b>	Ninguna
<b>Erodabilidad (K)</b>	Ninguna
<b>Longitud-Inclinación (LS)</b>	Ninguna
<b>Cobertura (C)</b>	Cobertura mejorada
<b>Prácticas (P)</b>	Aplicación de prácticas de conservación agronómicas e hidráulicas.

#### **4.8. Análisis económico**

La relación de costo beneficio comparó de forma directa los ingresos y los costos para brindar información exacta sobre la rentabilidad del proyecto. Para realizar el cálculo de la relación se sumaron todos los ingresos traídos al presente y se dividieron entre los costos de infraestructura y mano de obra.

Para implementar la relación se aplicó la ecuación 32.

$$RBC = IT/CT \quad (32)$$

Donde:

RBC: relación beneficio costo.

IT: ingresos totales.

CT: costos totales.

Una vez obtenido el resultado se deben realizar las siguientes consideraciones:

- $RBC > 1$ , se recuperan los costos y hay un margen de ganancia.
- $RBC = 1$ , sólo se recuperan los costos, pero no se obtiene ganancia ni pérdida.
- $RBC < 1$ , hay pérdida, no se recuperan los costos ni hay ganancia.

#### **4.9. Análisis ambiental**

Se realizó la valoración previa del proyecto, esto fue basado en el llenado la matriz D1 de Setena, esto con la finalidad de comparar los resultados obtenidos de la evaluación del proyecto. Esta matriz brinda una nota según tres clasificaciones, la primera es la B<sub>2</sub> donde se obtienen resultados menores o iguales a 300, la segunda es la B<sub>1</sub> donde el resultado es

mayor que 300 y menor o igual a 1000 y la tercera es la A donde el resultado es mayor a 1000. En el caso de que la calificación final sea de tipo B<sub>2</sub> solo se debe realizar una declaración jurada de compromisos ambientales, de ser tipo B<sub>2</sub> se debe realizar un plan de gestión ambiental y si es tipo A se debe realizar un estudio de impacto ambiental para garantizar la viabilidad del proyecto.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 5.1. Ubicación geográfica de la finca Alto Fresco

La finca en estudio se ubicó en la zona de Capellades de Alvarado la cual pertenece al sector central de la cuenca del Reventazón, como se muestra en la figura 4. Esta finca posee un área de 8,55 ha, tiene una altitud ente 1750 y 1950 msnm, sus coordenadas son 524106,0 O-1098740,0 N (CRTM05), con clima tropical húmedo y una estación seca no marcada debido a la posición geográfica en la Vertiente del Caribe.

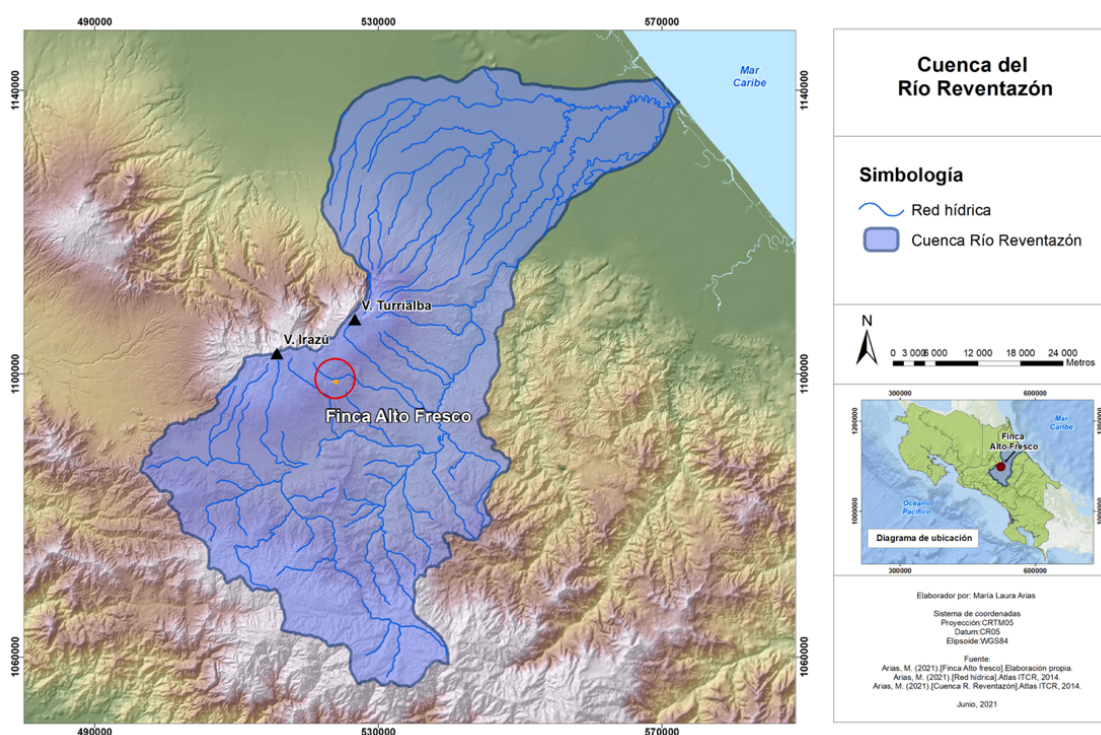


Figura 4. Ubicación de la finca Alto Fresco en la cuenca del Reventazón.

La finca Alto Fresco esta influenciada por afluentes del río Coliblanco y del río Birrís como se muestra en la figura 5, esto implica que la zona de análisis es propensa a inundaciones en sus faldas y a deslizamientos en su cumbre.

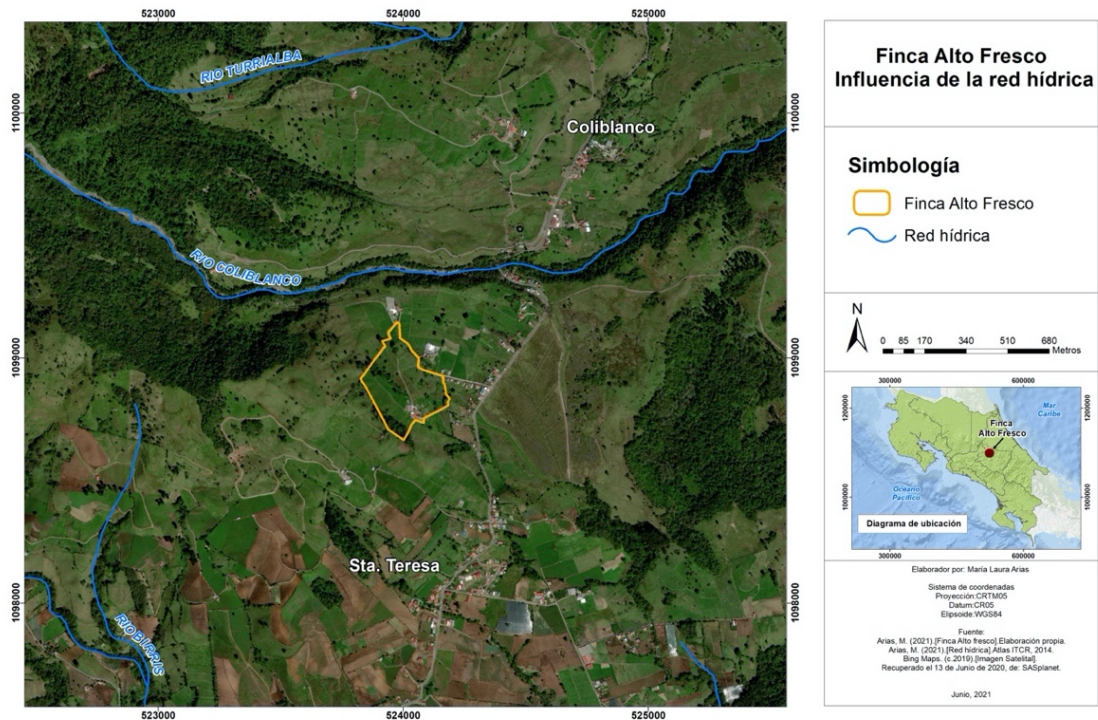


Figura 5. Influencia de ríos en la finca Alto Fresco.

## 5.2. Zonificación de la finca Alto Fresco.

Para brindar un enfoque detallado del proyecto, se decidió emplear agricultura de precisión mediante la zonificación de la finca, esto propició que la toma de muestras de campo fuese amplia y ordenada según las cualidades topográficas de cada sector. Como se puede observar en la figura 6, las 8,55 ha de la finca Alto Fresco se dividieron en 8 áreas identificadas por color, estas áreas poseen condiciones topográficas similares y cada área se subdividió en 4 zonas por hectárea dando como resultado un total de 32 zonas de muestreo las cuales están clasificadas dentro de las áreas delimitadas.

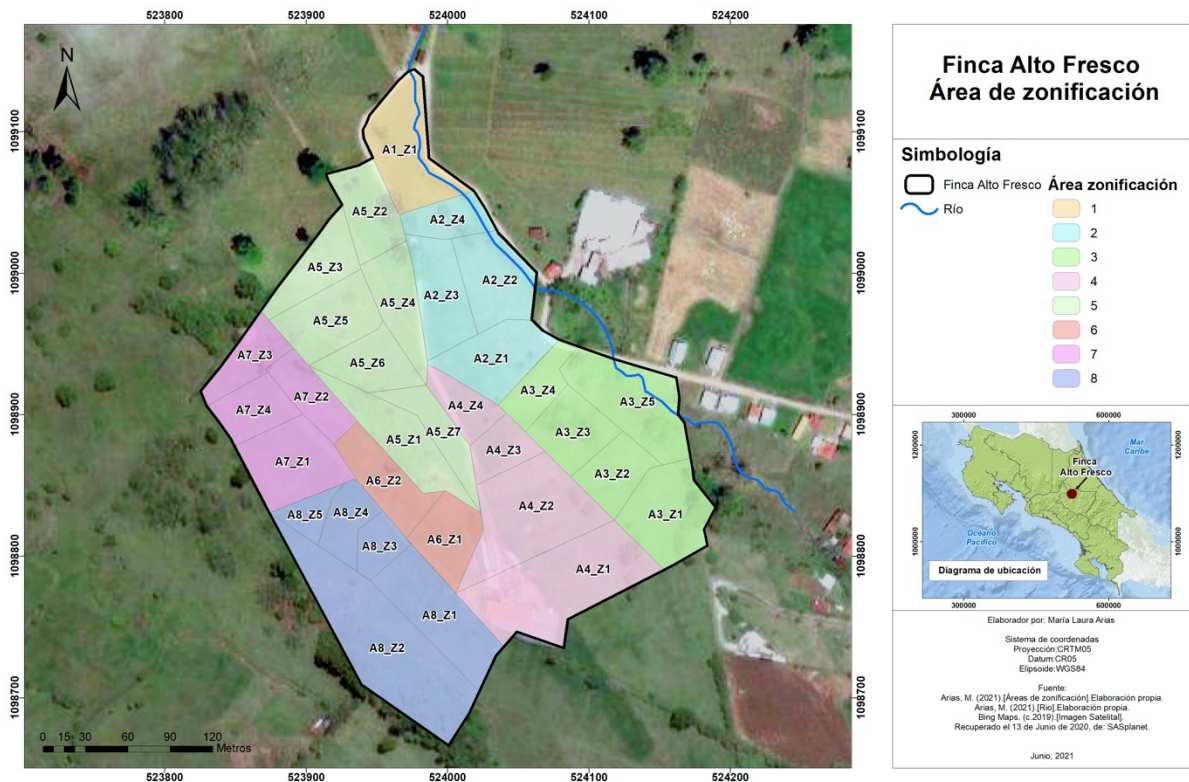


Figura 6. Zonificación de la finca Alto Fresco.

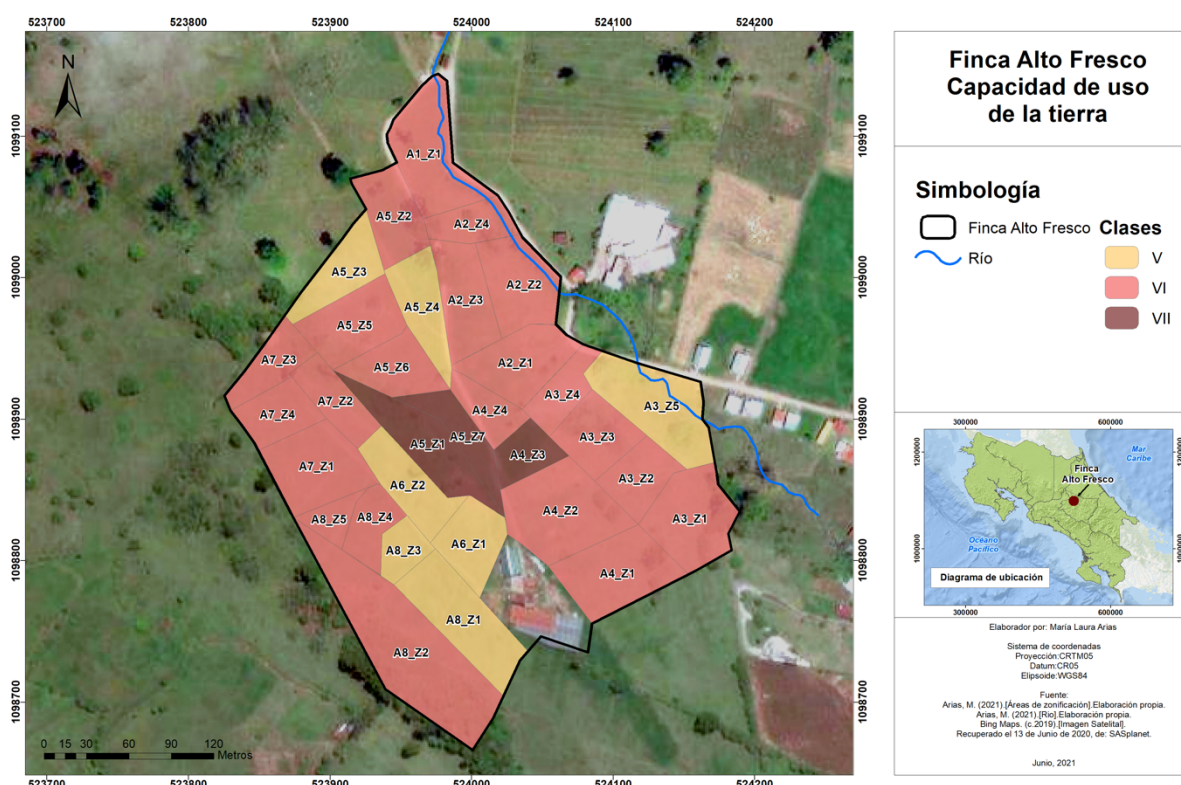
### 5.3. Clasificación del uso de la tierra

Con respecto a la clasificación del uso de la tierra, se implementó la metodología de la norma 41960 (MAG & MINAE, 2020), donde se obtuvo que las zonas delimitadas en la finca son de clase V, VI y VII, siendo VI la más predominante.

Las zonas con clase V, son tierras que presentan severas limitaciones para el desarrollo agrícola, por lo cual su uso se restringe a pecuario y forestal. Por lo cual, las zonas de esta clase son adecuadas para la actividad económica ganadera que se desarrolla en la finca de estudio. Sin embargo, las zonas clase VI presentan severas limitaciones para el desarrollo de actividades agrícolas anuales y semiperennes, pecuarias, y constituye el nivel máximo en el que se pueden desarrollar actividades de producción forestal u otros cultivos perennes. Las plantaciones forestales que se establecen en esta clase deben desarrollarse con prácticas de manejo adecuadas a las limitaciones de la tierra y los requerimientos de la especie. Debido a esto las zonas pertenecientes a la clase VI no son adecuadas para la actividad ganadera predominante en la finca. Finalmente, las zonas clase VII tienen severas limitaciones para

los usos agropecuarios, por lo que solo se permite el manejo forestal en caso de cobertura boscosa. En el caso en que el uso actual sea diferente al bosque, como es predominante en el área de estudio, se debe procurar la rehabilitación del uso forestal o del manejo de la vegetación natural.

En la figura 7 se representan las clases cada área de zonificación de la finca, en el anexo 41 se pueden observar las clases, subclases y unidades de manejo de cada zona de estudio.



**Figura 7.** Clasificación del uso de la tierra en la finca Alto Fresco.

Por otra parte, en la figura 8 se constata cuáles zonas de manejo tienen la capacidad de uso apta según su clasificación. Como es evidente, solo las zonas en clase V y las zonas boscosas (Área 8 – Zona 2, Area5 – Zona 1) cumplen con las actividades agropecuarias y forestales permitidas según la norma 41960 (MAG & MINAE, 2020).

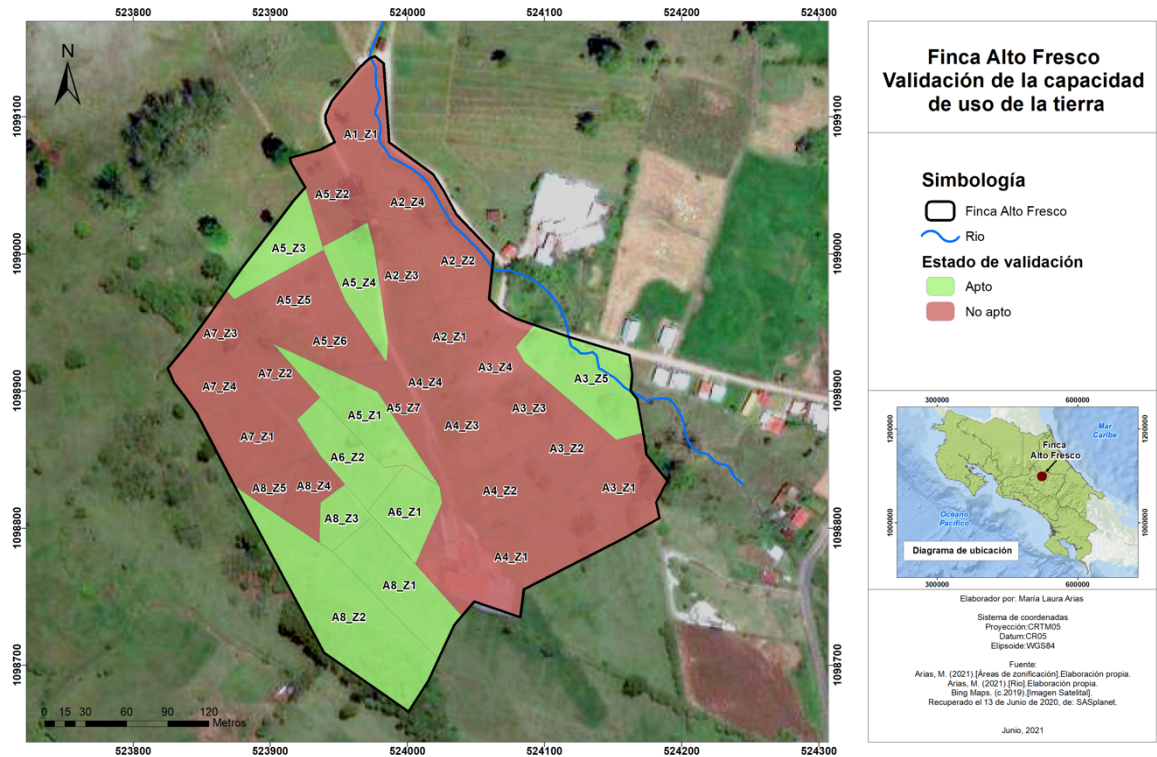


Figura 8. Validación de la capacidad de uso de la tierra en la finca Alto Fresco.

## 5.4. RUSLE

Con la finalidad de obtener los valores de la ecuación universal del suelo se procedió a realizar el cálculo mediante el álgebra de mapas al obtener la erosividad, erodabilidad, longitud e inclinación, cobertura y prácticas.

### 5.4.1. Erosividad (R)

El valor de erosividad obtenido mediante la ecuación 13 fue uniforme para toda la finca, debido a que los datos de precipitación mensual que se encontraron en el raster generado por la plataforma CHIRPS 2.0 fueron iguales en todas las zonas de la finca, esto ocurrió debido a que la zona de estudio es muy pequeña para presentar variaciones significativas de precipitación. En consecuencia la capacidad de erosión que tiene la lluvia en la finca Alto Fresco es de 985,84 MJ\*mm/ha\*h.

### 5.4.2. Erodabilidad (K)

Para obtener el valor de la erodabilidad se implementó la ecuación 14, los resultados de todas las variables de la ecuación se encuentran en los anexos 41, 42, 43 y 44. En el anexo 45 se puede observar los valores empleados para obtener el valor final en cada una de las zonas de manejo delimitadas en la finca Alto Fresco.

En la figura 9 se puede observar el resultado del grado de erodabilidad actual en la finca. Es notable que las áreas azul oscuro son las que poseen los suelos más susceptibles a la erosión, debido a que presentan mayores problemas de permeabilidad lenta y estructura gruesa. Mientras que las zonas amarillas indican ser las que poseen suelos menos influenciados por los factores antes mencionados.

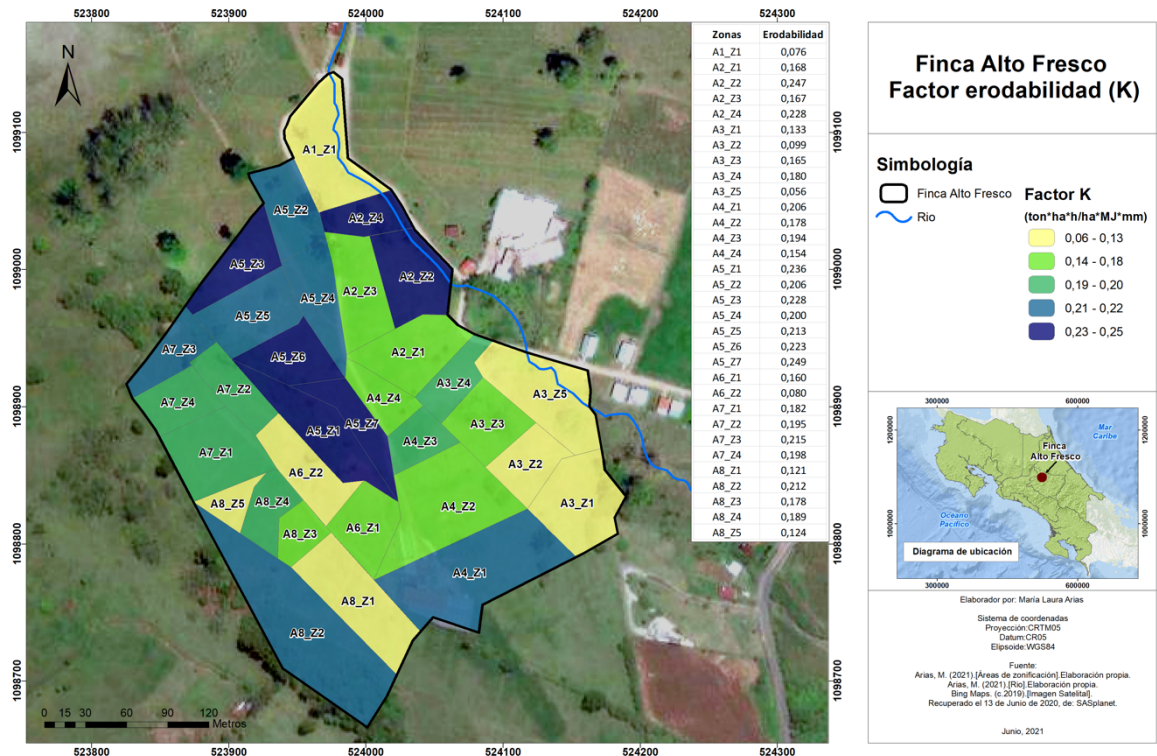
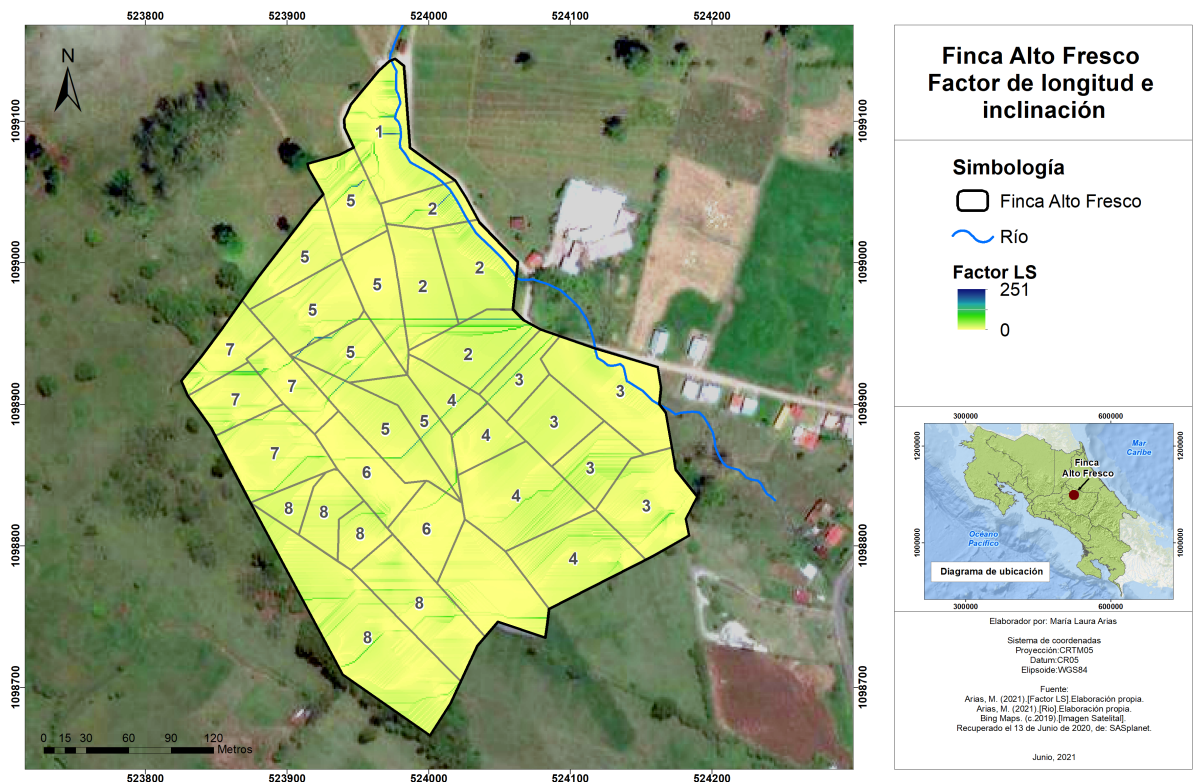


Figura 9. Factor de erodabilidad de la finca Alto Fresco.

### 5.4.3. Longitud e Inclinación (LS)

En la figura 10 se muestra el mapa del factor de longitud e inclinación obtenido mediante el uso de los rasters de pendiente en porcentaje, pendiente en grados y flow direction los cuales se pueden observar en el anexo 46, 47 y 48 respectivamente.

Este mapa muestra las zonas en las que se acumula el agua al fluir desde las áreas con mayor altitud de la ladera, esto implica que las zonas verdes-azuladas indican la dirección de flujo del agua de escorrentía y determina que la mayoría de las áreas de la finca Alto Fresco son afectadas por este factor. Cabe destacar que varias zonas verdes y azules coinciden con la existencia actual de cárcavas en proceso o ya establecidas por lo que el factor LS también funciona como indicador de zonas susceptibles a la formación de cárcavas y al desprendimientos acelerado del suelo.



**Figura 10.** Factor de Longitud e Inclinación de la finca Alto Fresco.

#### 5.4.4. Cobertura (C)

La figura 11 muestra que cobertura de la finca Alto Fresco es en su mayoría pastizal con sobrepastoreo ( $C=0,1$ ), a excepción del área 8 zona 3 y de área 5 zona, cuya cobertura es de bosque o matorral denso con alto contenido de materia orgánica ( $C= 0,001$ ). Debido a esto se procedió a obtener el mapa diferenciando ambos tipos de cobertura en las zonas de manejo.

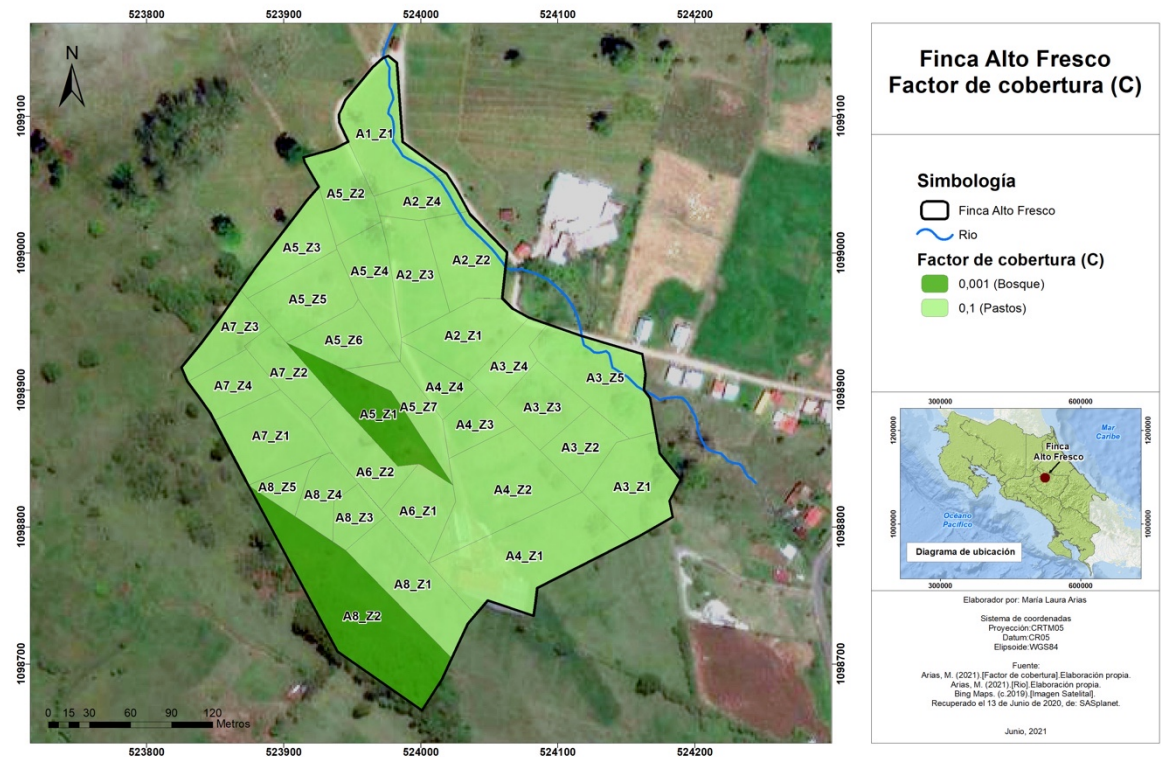


Figura 11. Factor de cobertura de la finca Alto Fresco.

#### 5.4.5. Prácticas (P)

El valor de las prácticas de conservación de las zonas de manejo de la finca Alto Fresco es 1, debido a que en la finca no existe ninguna práctica de conservación ya que es una zona dedicada a la ganadería y no poseen terrazas, acequias de ladera ni ninguna obra que pueda mitigar el avance de la erosión.

#### 5.4.6. Mapa de situación actual de la finca Alto Fresco.

En la figura 12 se pueden observar las pérdidas de suelo anuales (ton/ha) en cada una de las zonas de manejo y se puede afirmar que solo dos zonas (A5-Z1 y A8-Z2) tienen niveles aceptables de erosión ya que se encuentran entre 0 y 2 ton/ha de pérdidas anuales. El resto de zonas de la finca requieren de obras de conservación debido a que en primera instancia son clase V, VI y VII y por otra parte poseen una tasa de erosión considerada como inestable.

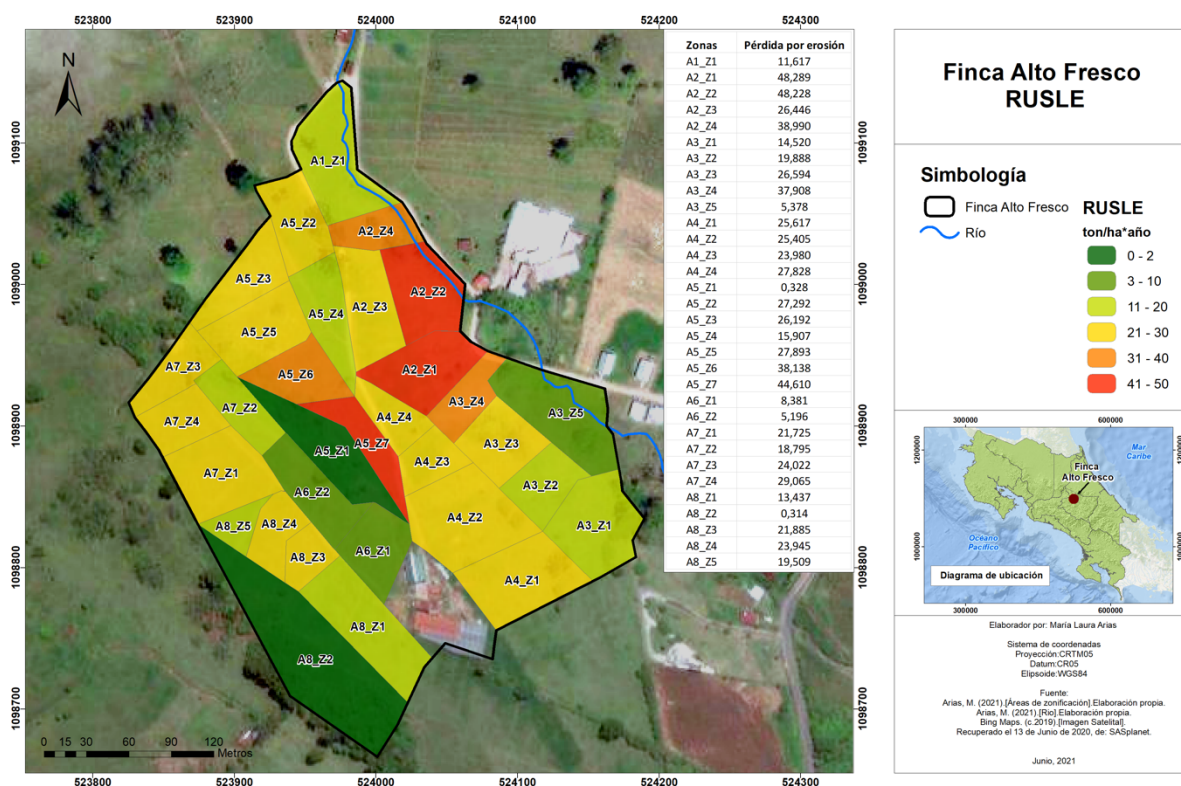


Figura 12. Mapa de pérdidas de suelo actuales en la finca Alto Fresco.

#### 5.5. Estabilidad de ladera

Según el resultado que se presenta en anexo 49 la finca Alto Fresco no posee estabilidad de ladera en ninguna de las zonas de estudio ya que a pesar de poseer un flujo laminar no turbulento ( $Re^* < 500$ ), la relación entre la fuerza de empuje y la fuerza de resistencia esta muy lejos de alcanzar el valor mínimo de la curva de Shield's debido a que las fuerzas de

empuje de las partículas son significativamente mayores que las fuerzas de resistencia al desprendimiento dejando como resultado una ladera inestable con necesidad de obras de conservación agronómicas e hidráulicas.

Por otra parte en la figura 13 se pueden observar las zonas cuya inestabilidad de ladera es alta, moderadamente alta y moderada, estos cambios en los valores de la inestabilidad se producen debido a que en la finca existen suelos con pendientes más manejables que otras y distintos diámetros de partícula. Lo cual implica que cuán más grande es el diámetro de partícula y menor sea el porcentaje de pendiente, la ladera tendrá una mayor tendencia a la estabilidad.

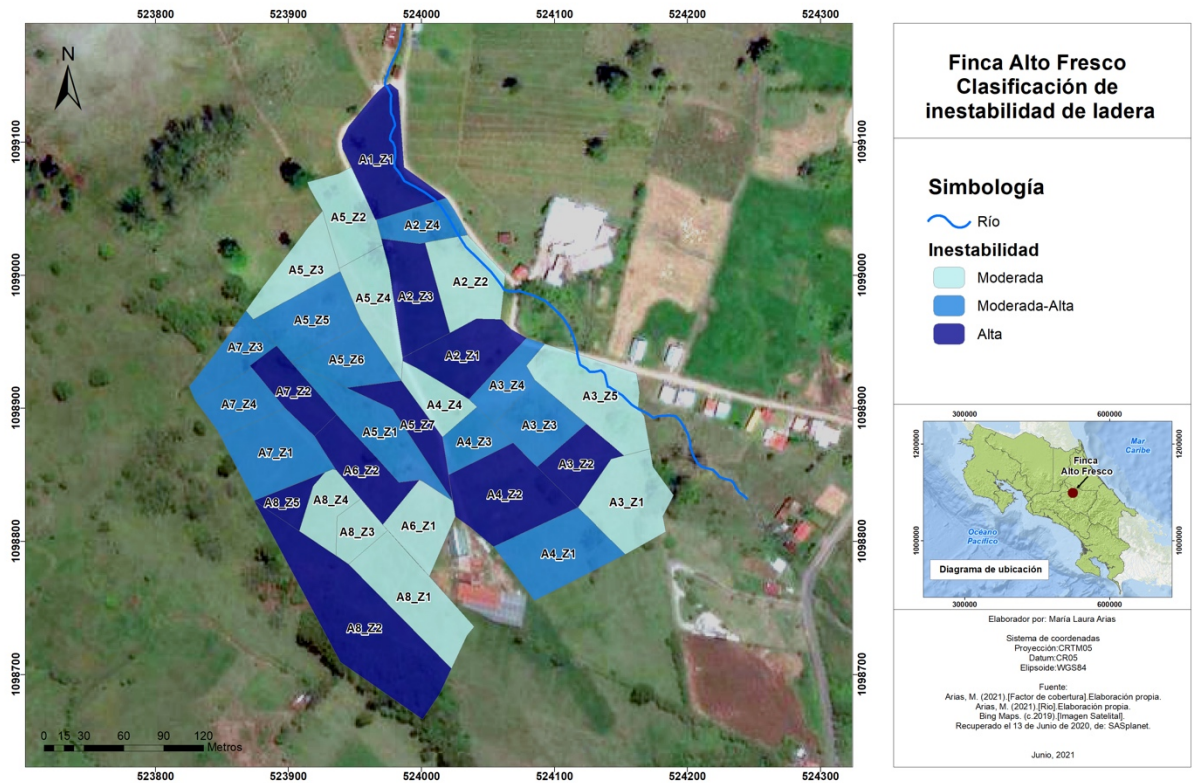


Figura 13. Clasificación de inestabilidad de ladera.

## 5.6. Propuesta agronómica

La aplicación de diques de piedra cada 1,5 metros en las cárcavas existentes en la finca mejoraran las condiciones del área 4 zona 2 y en área 5 zona 3, brindándoles a largo plazo una sustitución de suelo y generando terrazas para su aprovechamiento forestal.

Por otra parte, según el cuadro 8 la finca en estudio posee una carga animal alta ya que, acorde a la literatura, una finca lechera intensiva debe tener en promedio una carga de 3 UA/ha para garantizar rentabilidad económica.

**Cuadro 8.** Carga animal de la finca Alto Fresco.

Categoría animal	Unidad animal equivalente	Número de animales	
		Cabezas	Unidades animales
Toros	1,25	0	0
Vacas Adultas	1	70	70
Novillas	0,75	0	0
Terneros (as) < 1 año	0,5	5	2,5
<b>Total</b>		75	72,5
<b>Carga animal/ ha pasto</b>		9,994 cabezas/ha	9,661 UA/ha

A pesar de que la finca es altamente rentable, esta no cuenta con la disponibilidad de espacio necesario para las 70 vacas y 5 terneros que poseen, ya que de las 8,55 ha totales de la finca, solo 1,786 ha son aptas para la ganadería debido a que pertenecen a suelos clase V. La figura 14 muestra las áreas actualmente disponibles para la ganadería.

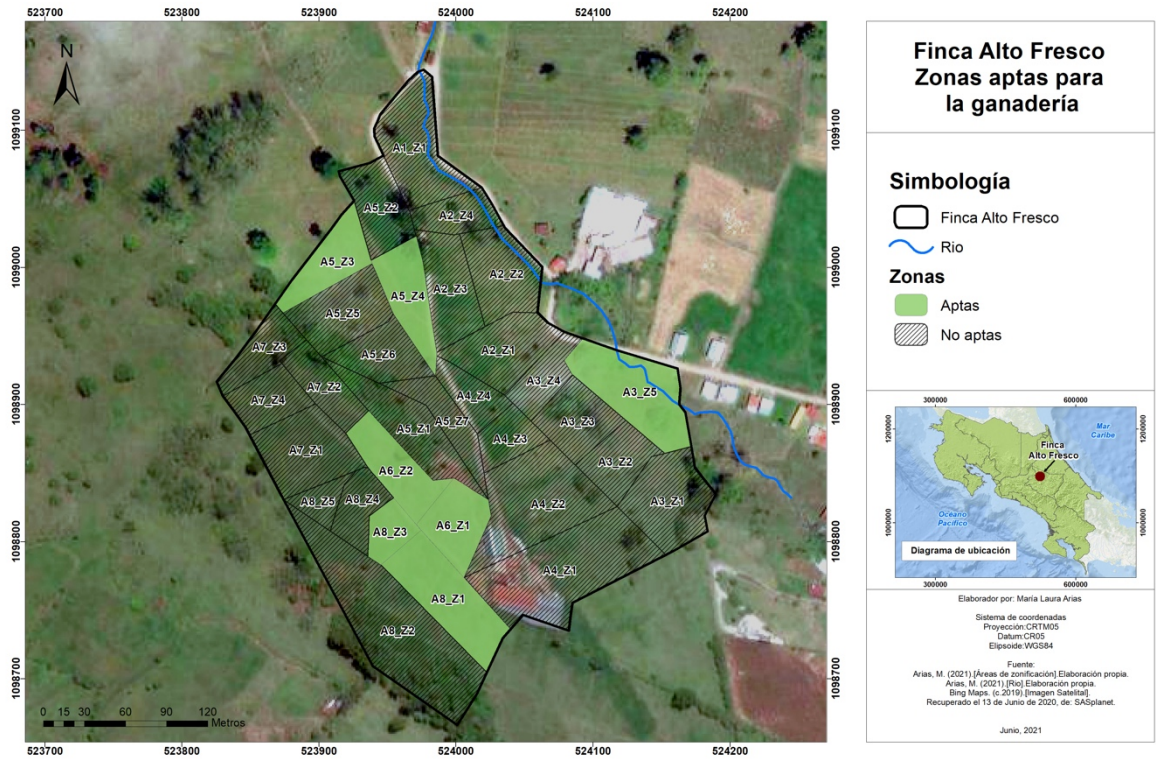


Figura 14. Mapa de zonas aptas para la ganadería.

Partiendo del hecho de que cada vaca requiere de 45 m<sup>2</sup> diarios en un potrero, se obtiene como resultado la imposibilidad de establecer una rotación adecuada en el espacio apto para la ganadería. Debido a esto, la ganadería estabulada es la mejor opción para mantener la alta carga animal de la finca.

Actualmente en Alto Fresco se posee la estructura adecuada para implementar la estabulación completa de todas las cabezas de ganado que poseen. La estructura actual construida es usada para colocar las vacas luego del ordeño por la tarde. El cuadro 9 evidencia el área de la infraestructura predispuesta.

Cuadro 9. Área de infraestructura actual de la finca Alto Fresco.

Infraestructura	Área (m <sup>2</sup> )
Establo	632,2
Invernadero	431,9
Lechería	261,5

Como se mencionó anteriormente, una vaca bajo el sistema estabulado requiere de 8 a 10 m<sup>2</sup> si el establo no está techado por completo, y de 4 a 6 m<sup>2</sup> si el establo está techado totalmente. En este caso los finqueros cuentan con un establo techado, por lo que, al brindar 5 m<sup>2</sup> a cada vaca para su debido reposo y alimentación, se abarcarían 350 m<sup>2</sup> del espacio predispuesto. El resto del espacio se emplea para la canoa de alimento y los bebederos. La alimentación de las vacas es de suma importancia ya que de esto depende la calidad y la cantidad de leche que producen. Para suplir las necesidades alimenticias del ganado es necesario contar con áreas para pastos de corta y bancos forrajeros. Se debe buscar que la cobertura del suelo de estos pastos sea permanente para evitar el transporte de partículas de suelo en las zonas destinadas para su siembra.

Por lo tanto, se seleccionó el pasto candelario y el arbusto forrajero morera y se propuso brindarle al ganado un 75% de su alimentación de pasto candelario y un 25% de arbusto morera. De esta manera se requerirá un área de 2 ha para establecer una poda diaria de candelario y 1 ha para establecer una poda diaria de arbusto morera. Cabe recalcar que se debe contar con una picadora de pasto para poder brindar el alimento cosechado al ganado.

Otro aspecto importante para tener en cuenta en el establecimiento de un sistema estabulado es el manejo de los desechos del ganado, ya que al poseer 70 cabezas de ganado se producen toneladas de boñiga diariamente. La forma más eficiente de manejar el alto o porcentaje de excreciones es transformarlas en abono orgánico del tipo Bokashi empleando microorganismos de montaña (MM) en estado líquido. Los MM se deben emplear como fumigadores luego de limpiar la boñiga en cada establo, esto genera la inexistencia de malos olores y la limpieza adecuada del establo. Seguidamente, se propuso utilizar el área de la finca cubierta por plástico de invernadero para colocar la boñiga y fumigar la misma con MM, manteniendo una buena rotación y aireamiento del material se asegura la buena calidad del abono orgánico.

Por otra parte, previendo la necesidad de luz solar de los animales y posibles problemas de estrés por el cambio de pastoreo a estabulación, se propuso establecer apartos opcionales en las zonas aptas para la ganadería. Para esto es necesario establecer grupos de al menos 20 vacas con características de producción similares. De esta manera se obtendrán 4 grupos, 3

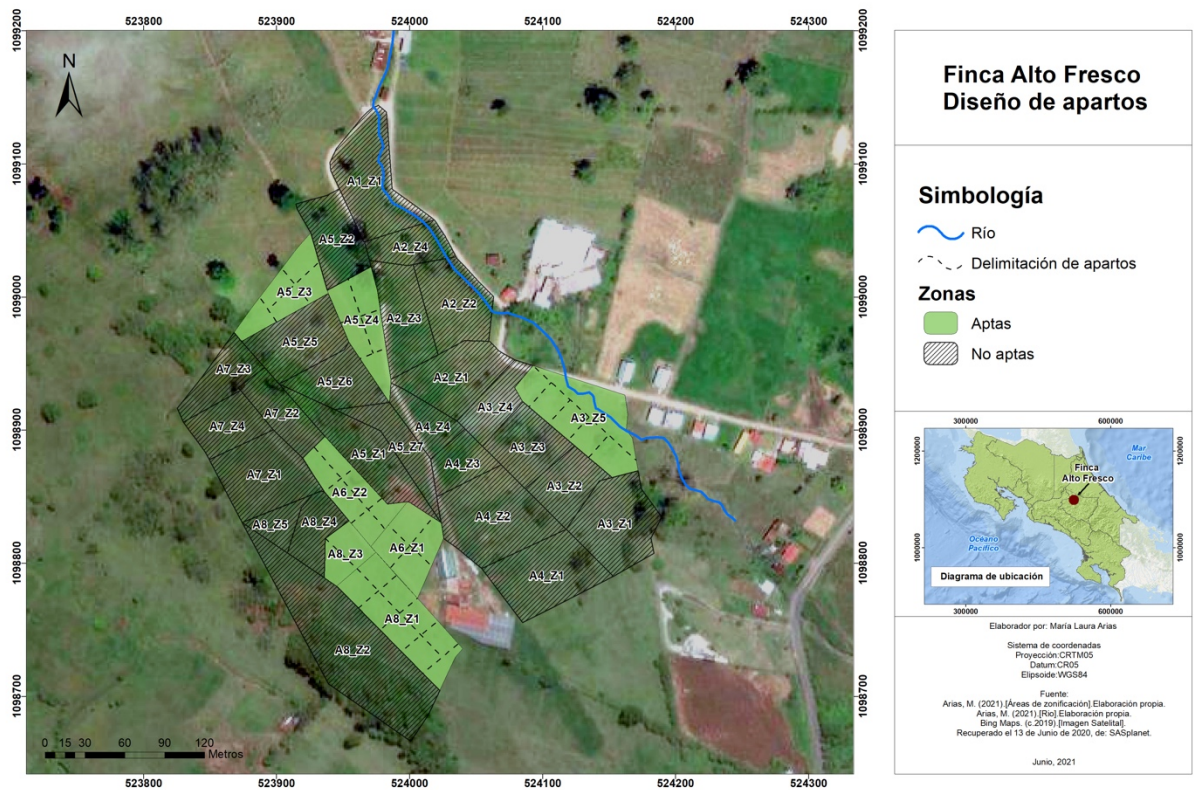
de ellos con 20 vacas y 1 de 10. En el cuadro 10 se muestra el área necesaria por apartado para 20 vacas, así como la cantidad de apartos que se pueden construir.

**Cuadro 10.** Diseño de apartos en la finca Alto Fresco.

<b>Características</b>	<b>Datos</b>
Raza	Jersey
Peso promedio	450 kg
10% del peso corporal	45 kg
Necesidad de espacio para cada vaca	45 m <sup>2</sup> /animal
Necesidad de espacio para 20 vacas	900 m <sup>2</sup>
Necesidad de espacio real	450 m <sup>2</sup>
El área apta para ganadería	17865,86 m <sup>2</sup>
Cantidad de apartos en clase V	39,70 m <sup>2</sup>

El área necesaria se divide en dos debido a que las vacas no pasaran todo el día en el apartado, sino que se propuso una duración de 2 horas por grupo determinado lo que implica un tiempo neto de 8 horas diarias.

Los potreros deben tener cobertura de pasto kikuyo y deben estar delimitados por cercas vivas las cuales se deben construir con postes muertos distanciados cada 10 m y árbol de Poró distanciados cada 5 m. El árbol es un árbol forrajero lo cual implica que sus podas también sirven de alimento para el ganado. El perímetro que forman las cercas vivas de los apartos da como resultado 1525,6 m, lo cual indica que se pueden sembrar 305 árboles de Poró en dicho perímetro. En la figura 15 se determinó la división de apartos según el área disponible.



**Figura 15.** Diseño de apartos.

Si bien es cierto, se podían aprovechar las zonas aptas para ganadería en 39 apartos, el área 3 zona 5 tiene influencia de un riachuelo por lo que hay que respetar una distancia de 5 a 10 m, esto genera que no se pueda aprovechar en su totalidad y se determina que solo se pueden utilizar 36 apartos para establecer una rotación diaria en caso de ser necesario.

El resto del área de la finca se puede utilizar para aprovechamiento forestal. Se propuso sembrar árboles de aguacate hass cada 6 metros junto con pasto kikuyo como cobertura e implementar barreras vivas de vetiver en la parte superior de las terrazas individuales con el objetivo de disminuir la velocidad del agua de escorrentía y fomentar la infiltración de la misma en las terrazas

En la figura 16 se puede observar la delimitación de todas las prácticas agronómicas propuestas y el cambio positivo en el factor de cobertura de la RUSLE.

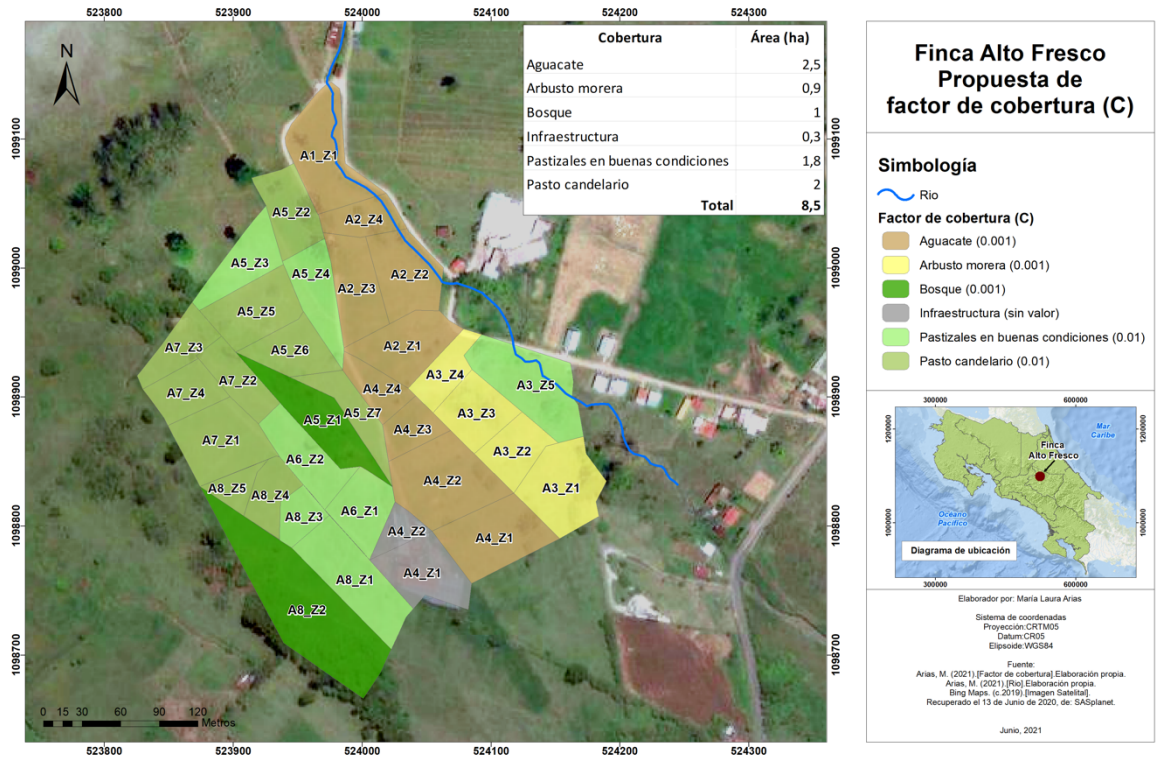
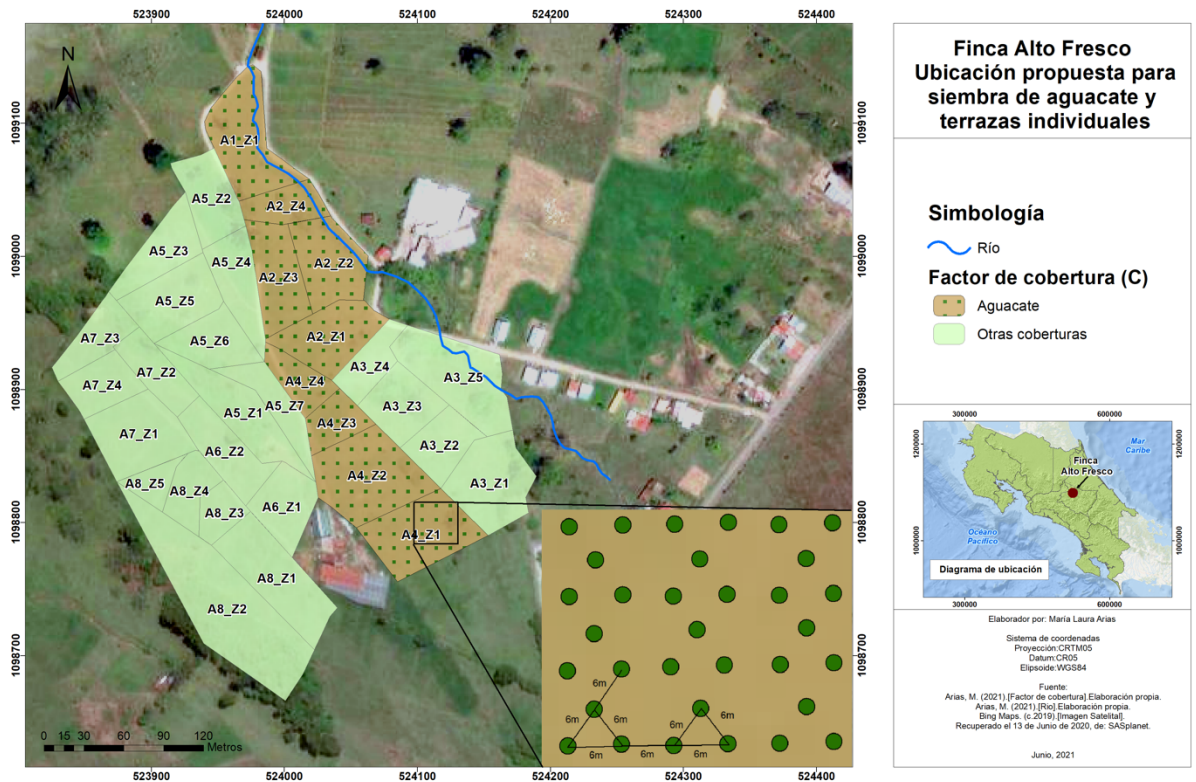


Figura 16. Propuesta de cambio de cobertura para la finca Alto Fresco.

## 5.7. Propuesta hidráulica

La propuesta de diseño hidráulica se basa en la construcción de terrazas individuales para la siembra de árboles de aguacate hass. Las mismas deben estar ubicadas en tresbolillo a 6 m de distancia. Los árboles de aguacate se ubicarán en las zonas inferiores de la finca como es evidente en la figura 17 donde se muestra la zona de cobertura y un croquis de la ubicación de los árboles y terrazas.



**Figura 17.** Ubicación de siembra de aguacate en terrazas individuales.

El sistema de terrazas individuales es menos invasivo que el de terrazas comunes ya que este se puede realizar de forma manual con un pico. Para implementar el método se propuso la construcción de las terrazas de 1 m de diámetro con una pendiente interna de 5%. Sin embargo, es importante conocer cual es el área de corte y relleno que se aplicará. Dichos datos se obtuvieron primero de forma individual y luego por zona. En el cuadro 11 se presenta el área y el volumen de corte para cada zona de plantación, en el anexo 50 se muestran los resultados del procedimiento completo empleando las ecuaciones 29, 30 y 31.

**Cuadro 11.** Parámetros de corte y relleno para la construcción de terrazas individuales.

	<b>Zonas</b>	<b>Área de corte (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen de corte total (m<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	A1-Z1	7,076	7,076
<b>2</b>	A2-Z1	5,548	5,548
	A2-Z2	5,568	5,568
	A2-Z3	4,684	4,684
	A2-Z4	2,916	2,916
<b>4</b>	A4-Z1	11,031	11,031
	A4-Z2	9,729	9,729
	A4-Z3	3,101	3,101
	A4-Z4	2,616	2,616

La densidad de siembra y de construcción de las terrazas se obtuvo mediante la ecuación 32 y se obtuvo como resultado una densidad total de 900 árboles en total, sin embargo, parte de la zona delimitada para aguacate no se debe aprovechar por su cercanía con el afluente de la finca (se deben respetar de 5 a 10 m de distancia del río). Debido a esto la densidad total es de 824 árboles de aguacate. En el cuadro 12 se puede observar la densidad de siembra por zona.

**Cuadro 12.** Densidad de siembra y construcción de terrazas.

<b>Áreas</b>	<b>Zonas</b>	<b>Densidad de siembra (árboles)</b>
<b>1</b>	A1-Z1	120,414
	<b>2</b>	A2-Z1
<b>2</b>	A2-Z2	92,992
	A2-Z3	87,285
	A2-Z4	48,002
	<b>4</b>	A4-Z1
A4-Z2		167,527
A4-Z3		44,718
A4-Z4		45,195
<b>Total</b>		824

Finalmente se calculó el caudal de escorrentía en las terrazas individuales mediante la ecuación 33 y se obtuvieron los resultados por zona de plantación como se muestra en el cuadro 13.

**Cuadro 13.** Caudal de escorrentía por zona de plantación.

Áreas	Zonas	Q (m3/s)
1	A1-Z1	0,113
2	A2-Z1	0,094
	A2-Z2	0,093
	A2-Z3	0,088
	A2-Z4	0,053
4	A4-Z1	0,158
	A4-Z2	0,143
	A4-Z3	0,050
	A4-Z4	0,050

### **5.8. Estimación de pérdidas de suelo empleando el diseño propuesto.**

Al aplicar las obras de conservación agronómicas e hidráulicas se mejora considerablemente la cobertura del suelo, esto es evidente en la figura 16. Donde se muestra el cambio de cobertura de pastizales en sobrepastoreo a pastizales en buenas condiciones y bosques. El factor de prácticas también mejora ya que anteriormente la finca no contaba con ningún tipo de diseño de obras de conservación que mitigara la erosión, por lo que al emplear la propuesta de diseño el factor de prácticas de conservación tendrá como resultado los factores que se muestran en la figura 18.

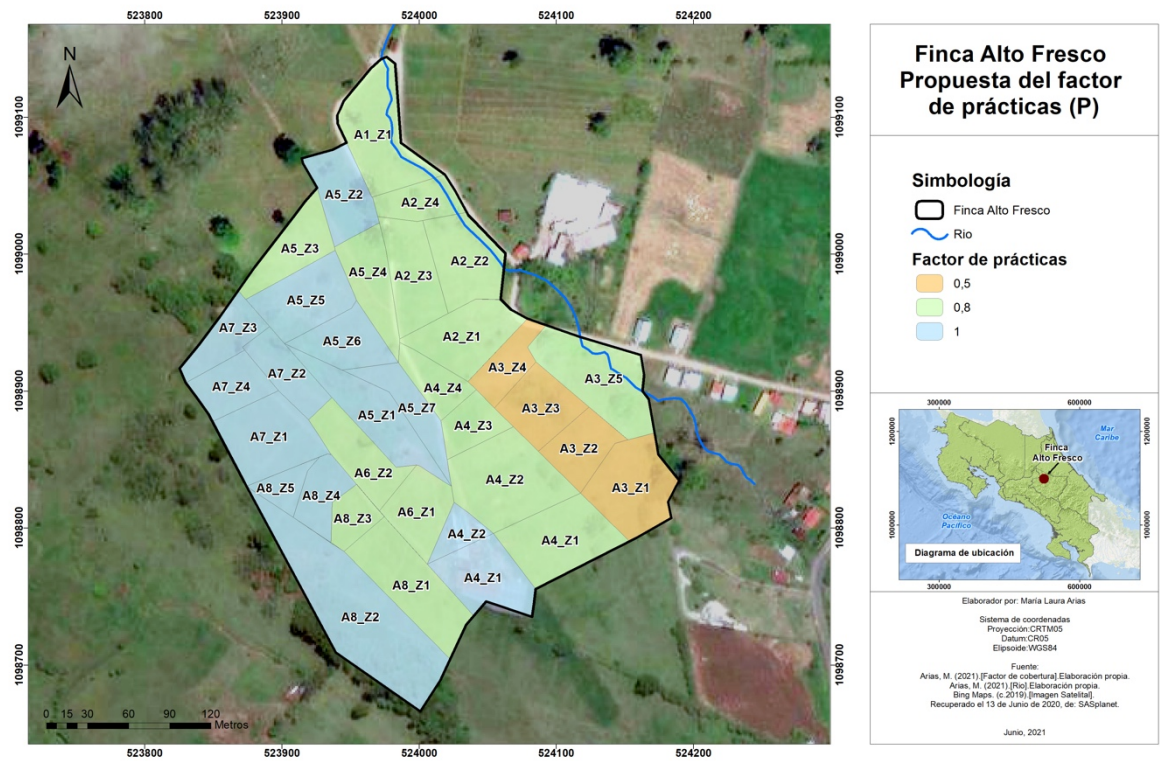


Figura 18. Propuestas de mejora para el factor P.

La figura 19 evidencia una disminución considerable en las pérdidas de suelo (ton/ha anuales) principalmente en la zona que actualmente están destinadas al sobrepastoreo, al suelo desnudo por derrumbes y a la inexistencia de obras de conservación.

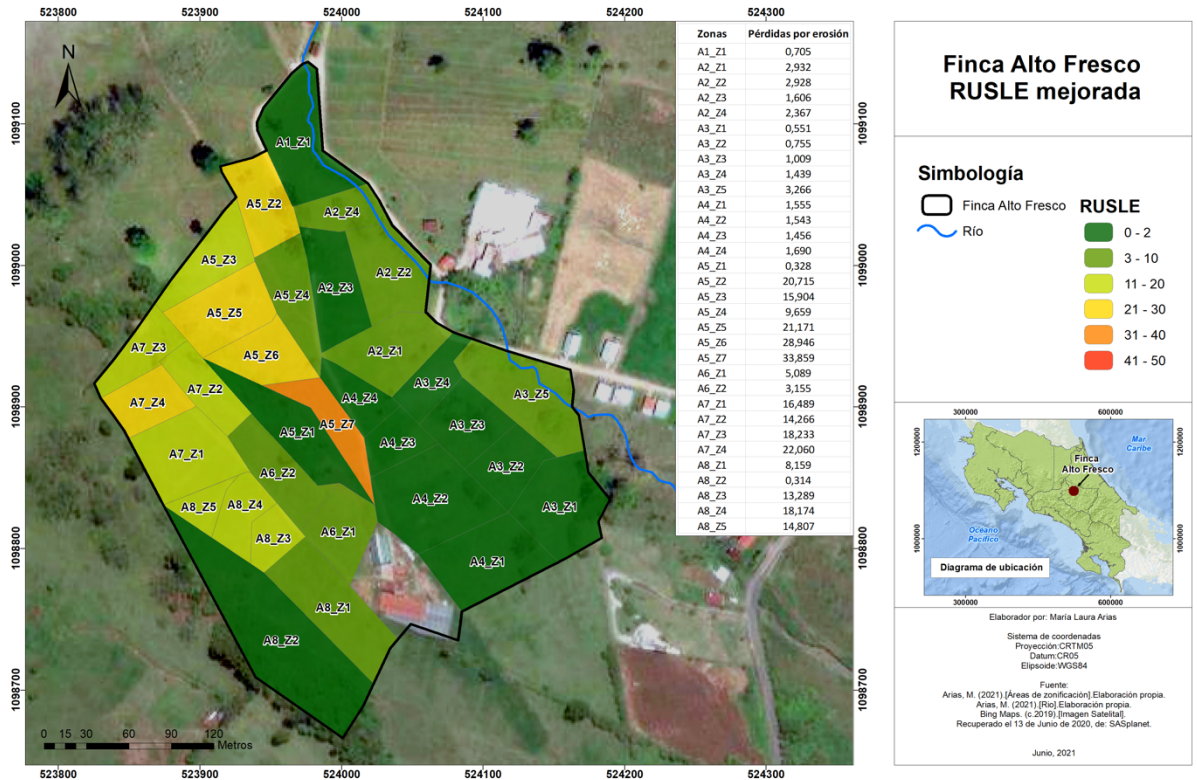


Figura 19. RUSLE mejorada.

Por otra parte, en la figura 20 se muestran que las áreas más beneficiadas por la implementación de cobertura y prácticas de reforestación son las destinadas al cultivo de aguacate en terrazas individuales. Las áreas destinadas al pastoreo poseen una mediana mejora en comparación con la situación actual y las zonas destinadas al cultivo de bancos forrajeros y pastos de corta presentan una leve mejoría en la pérdida de suelo. Las zonas sin cambio representan actualmente los sectores de bosque que posee la finca, para los cuales no se realizaron propuestas de conservación.

Este mapa demuestra que el mejor uso de suelo que se le puede dar a la finca Alto Fresco es el forestal. Sin embargo, las prácticas empleadas en el presente proyecto se acoplan a la actividad económica de los dueños de la finca.

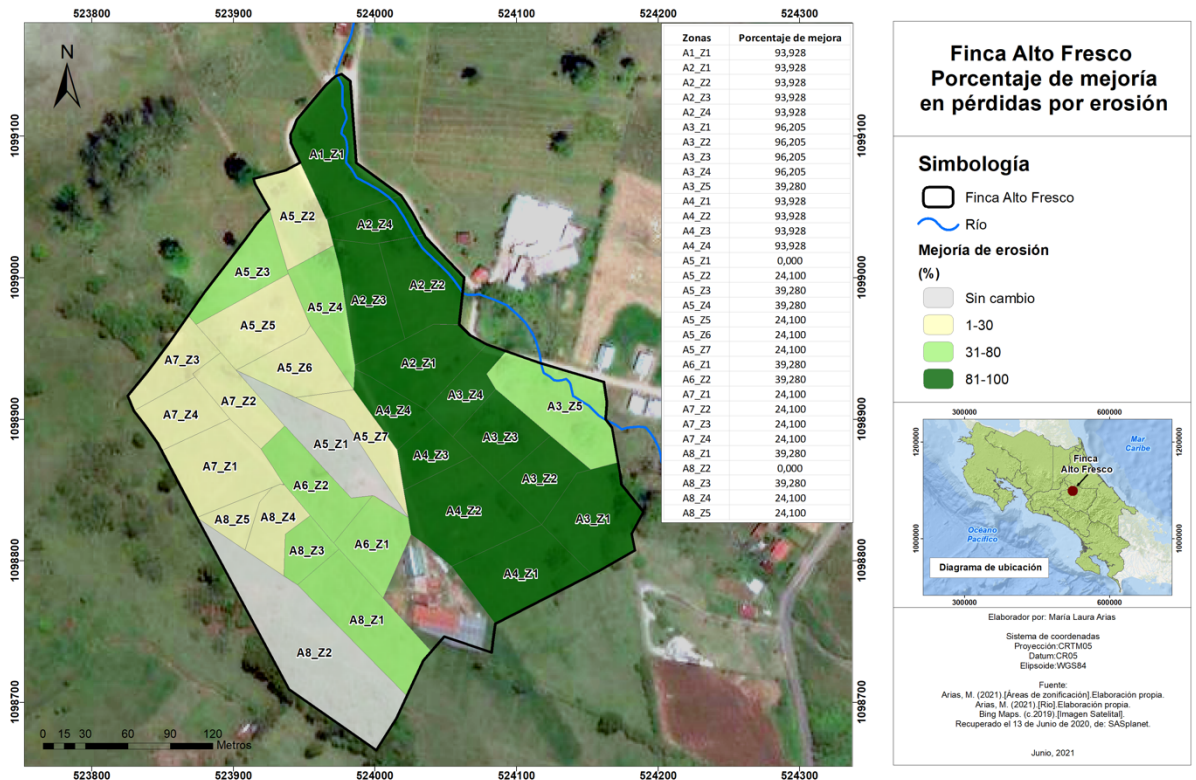


Figura 20. Porcentaje de mejoría en pérdidas por erosión.

### 5.9. Demostración de la hipótesis de estudio

La hipótesis planteada, como se muestra en la figura 21, se cumple en su mayoría ya que actualmente las zonas con un valor alto y moderadamente alto de pérdidas de suelo poseen en su mayoría niveles de infiltración inferiores a la intensidad de la precipitación, lo que quiere decir que son suelos propensos a la sobresaturación de su espacio poroso. Sin embargo, existen algunas excepciones como el caso del área 5 zona 7 que posee una alta capacidad de infiltración, no obstante, presenta niveles altos de pérdida de suelo. Otro ejemplo contrario a este es el caso de las zonas boscosas del área 5 zona 1 y el área 8 zona 2 que presentan niveles bajos de erosión junto con niveles bajos de infiltración. Debido a esto no se puede afirmar con total certeza la hipótesis planteada.

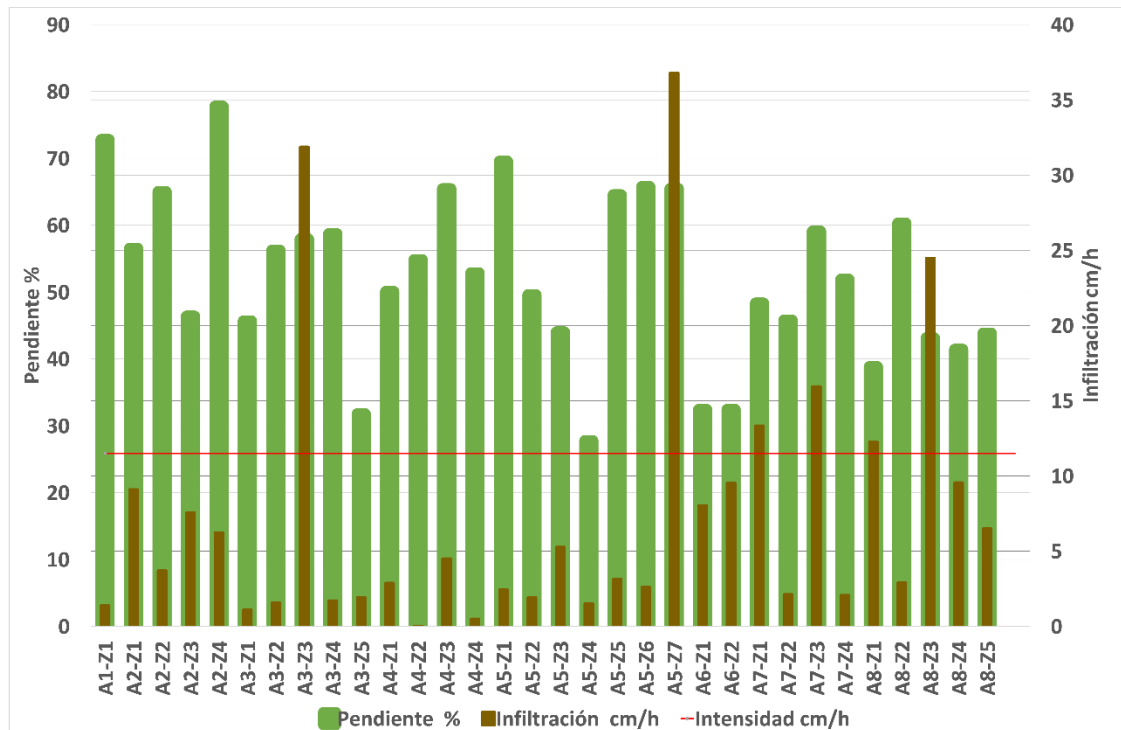


Figura 21. Gráfico de pendiente vs Infiltración.

### 5.10. Análisis económico

Para realizar el análisis económico basado en indicador de costo-beneficio se utilizaron los costos presentados por el MAG (2018). Este documento brinda costos muy acertados de las obras agronómicas e hidrológicas implementadas en el proyecto. En cuadro 14 se pueden observar los costo aproximados de las obras propuestas y sus materiales. Cabe destacar el establecimiento de ganado estabulado no tiene costo asociado ya que en la finca cuentan con todas las condiciones de infraestructura y mano de obra y mano de obra para implementar la propuesta.

**Cuadro 14.** Costos de implementación de propuesta.

Obras	Materiales	Costo total
<b>Terrazas individuales</b>	Mano de obra	¢412.000,00
<b>Barreras vivas</b>	Vetiver	¢388.104,00
<b>Pastos</b>	Candelario	¢1.200.000,00
	Kikuyo	¢1.072.274,40
<b>Arbustos</b>	Semilla de morera	¢54.000,00
<b>Diques</b>	Mano de obra	¢210.000,00
<b>Estabulación de ganado</b>	Infraestructura	¢0,00
<b>Cercas vivas</b>	305 árboles de poro	¢106.750,00
	152 postes muertos	¢43.420,00
	Alambre	¢300.600,00
	Grapas	¢6.912,00
<b>Total</b>		¢3.794.060,40

Por otra parte en el cuadro 15 se observan los costos para 7 años de producción de aguacate hass según la propuesta establecida por SEPSA (2020), donde se toman en consideración factores como el costo de mano de obra, fertilizantes, insecticidas, herbicidas, transporte, poda, chapeas, entre otros. Los valores fueron dados para el cultivo de 1 ha de aguacate hass por lo que se procedió a recalcular el costo para las 2,5 ha destinadas para esta

actividad. También se calculó el costo acumulado para cada año, con la finalidad de implementar el indicador de costo beneficio a los 7 años de producción.

**Cuadro 15.** Costos de producción de aguacate.

<b>Años</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Costo de siembra total/ha	€3.310.889,10	€1.175.372,25	€1.882.158,99	€3.382.782,00	€2.707.144,50	€3.565.860,80	€3.756.064,93
Costo en las 2,5 ha	€8.277.222,75	€2.938.430,63	€4.705.397,48	€8.456.955,00	€6.767.861,25	€8.914.652,00	€9.390.162,33
Costo acumulados	€8.277.222,75	€11.215.653,38	€15.921.050,85	€24.378.005,85	€31.145.867,10	€40.060.519,10	€49.450.681,43

En el cuadro 16 se brinda la información del dinero que se proyecta obtener en la venta de la producción de los 824 árboles de aguacate durante 7 años. Se debe resaltar que el precio del aguacate que se vende en la finca equivale a un 30% del precio al que se vende en el mercado. Actualmente el precio al mercado es de 2300 colones/kg por lo que en la finca se vende a 700 colones/kg. Por otra parte también es necesario saber que los árboles de aguacate comienzan su etapa productiva a los 3 años de ser sembrados.

**Cuadro 16.** Proyección de producción de aguacate hass.

<b>Años</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Kg/árbol</b>	0	0	10	20	30	50	50
<b>Producción de cada árbol</b>	€0,00	€0,00	€7.000,00	€14.000,00	€21.000,00	€35.000,00	€35.000,00
<b>Producción de 824 árboles</b>	€0,00	€0,00	€5.768.000,00	€11.536.000,00	€17.304.000,00	€28.840.000,00	€28.840.000,00
<b>Producción Acumulada</b>	€0,00	€0,00	€5.768.000,00	€17.304.000,00	€34.608.000,00	€63.448.000,00	€92.288.000,00

Finalmente al emplear el indicador de costo beneficio para una proyección de 7 años de cultivo y cosecha se obtuvo un resultado de 1,86 por lo que se puede afirmar que luego de 7 años de producción la inversión requerida es saldada y se obtienen ganancias 1,86 veces la inversión. Debido a esto, el proyecto es viable económicamente.

### 5.11. Análisis ambiental

Se realizó el llenado de la D1 de SETENA, en la cual se determinó que el proyecto es Categoría B2, esto significa que bajo susceptibilidad de impacto ambiental (SIA) es menos de 300 puntos como se muestra en el cuadro 17 cual implica que sólo con realizar una Declaración Jurada de compromisos Ambientales es suficiente. Por lo cual, el proyecto es ambientalmente viable.

**Cuadro 17.** Valoración previa ambiental del proyecto, resultados D1 de formulario SETENA.

---

Valoración previa del proyecto (D1)			
Tipo	Nota	Procedimiento	Calificación obtenida
A	Mayor a 1000	Estudio de Impacto Ambiental	
B1	Mayor a 300 y menor a 1000	Pronóstico y Plan de Gestión Ambiental	88
B2	Menor a 300	Declaración Jurada de Compromisos Ambientales	

---

## **6. CONCLUSIONES**

Este proyecto demostró la importancia de la adecuada cobertura y prácticas de conservación en la finca Alto Fresco, ya que, gracias a herramientas geoespaciales se logró identificar de una manera eficaz las zonas con mayor pérdida de suelos y se propusieron las medidas adecuadas para asegurar la mitigación de la erosión. Las principales conclusiones que se obtuvieron del proyecto fueron:

- El uso del suelo óptimo para la finca es el forestal bajo la categoría de conservación, utilizando terrazas individuales ya que reduce la erosión en un 95%.
- La falta de cobertura forestal en la finca Alto Fresco potencia la erosión del suelo en un 95%.
- El planteamiento de buenas prácticas de conservación de suelo en un entorno ganadero que presenta valores altos de pendiente, baja capacidad de infiltración y transporte de partículas, mejora en un 39% con la aplicación de coberturas adecuadas a la zona de estudio y prácticas de conservación.
- El pastoreo intensivo y la inadecuada distribución de apartos, por ende, la inexistencia de la rotación de ganado genera la compactación del suelo y el desprendimiento total de la cobertura herbácea lo cual aumenta el potencial erosivo en un 39%.
- La implementación de sistemas de información geográfico en la ganadería genera resultados de una precisión de 1m por píxel, lo cual fomenta la adecuada toma de decisiones, con el fin de generar un diagnóstico correcto de la finca y subsanar la problemática con modelos geoestadísticos que permitan una planificación financiera de la actividad ganadera.
- El uso previo de mapas de factor LS genera información sobre las zonas susceptibles a la formación de cárcavas y deslizamientos.
- El proyecto es viable económica y ambientalmente debido a que las ganancias 1,86 veces mayores a la inversión en la siembra de aguacates y que el proyecto no posee ningún factor de peligro ambiental ya que su SIA es 88 por lo cual no requiere un plan de gestión o un estudio ambiental.

## **7. RECOMENDACIONES**

En este apartado del documento se incluyen algunas recomendaciones a seguir para la implementación del proyecto por los dueños de la finca o demás ganaderos interesados en la aplicación de la propuesta de diseño.

- La finca se ubica en una zona con altos regímenes pluviales, por lo que se puede implementar el sistema de cosecha de agua y de esta forma evitar la utilización de agua potable en la limpieza de los establos y la lechería.
- Antes de invertir en una actividad ganadera, se recomienda realizar un estudio de capacidad de uso de la tierra para analizar el área efectiva para uso agropecuario y determinar la viabilidad de la actividad entre estabulada o pastoreo.
- Ante un cambio climático evidente, el productor agropecuario debe crear conciencia de los problemas que se generan en la actividad agropecuaria y con esto buscar soluciones sustentables y sostenibles ante el consumo excesivo de agua, el manejo de los desechos del ganado, el sobrepastoreo y pérdida de cobertura forestal.
- A la hora de aplicar la ganadería de pastoreo es importante contar con el espacio suficiente para la cantidad de cabezas de ganado que se posee, y mantener una rotación diaria de los apartos con el fin de permitir el crecimiento adecuado de los pastos.
- Los cambios de uso de suelo bruscos y sin estudio previo de sostenibilidad generan a largo plazo problemas serios de erosión y de modificación de terreno, por ejemplo, la extensión de cárcavas.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración utilizados para el cálculo del balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 9(1), 23–33.  
<https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1674>
- Artigas, M., & García, I. (2012). *Efecto del cultivo de cobertura con y sin pastoreo sobre implantación, crecimiento y rendimiento de soja*. UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA FACULTAD DE AGRONOMÍA.
- AtlasDigitalCR. (2008). Suelos 2008. Retrieved July 3, 2021, from <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6749?show=full>
- Ballesteros, M., & López, T. (2017, November). *El Nexos entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica El caso de la cuenca alta del río Reventazón*. 182, 32. Retrieved from <http://www.mag.go.cr/asuntos-internacionles/anexo-entre-agua-energia-alimentacion-CR.pdf>
- Barquero, L. C. (2014). *¿Cómo hacer Microorganismos de Montaña (MM)? [Brochure]*. Retrieved from <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Brochure-MicroCIA-VF-2017web.pdf>
- Birkel, C. (2016). *Caracterización del comportamiento hidrológico actual, bajo escenarios de cambio de cobertura y escenarios futuros de clima de la región hidrológica de Aquin/Saint-Louis Du Sud, Haití*. UCR.
- Chi Chan, H. (2008). Manejo Sostenible de Potrereros [Brochure]. *InfoAgro*. Retrieved from [www.infoagro.go.cr](http://www.infoagro.go.cr)
- CIA. (2021). *Suelos CR*. San José, Costa Rica.
- Colotti, E. (2000). La Erosividad: Cualidad De La Lluvia Poco Conocida. *Nueva Etapa*, 15(1012–7089), 99–116. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/721/72102406.pdf>
- Cubero, D. (2015a). Suelos De Costa Rica Orden Andisol [Brochure]. *INTA-Costa Rica*, 1–2.
- Cubero, D. (2015b). Suelos de Costa Rica orden inceptisol [Brochure]. *INTA-Costa Rica*, 2012–2013. Retrieved from <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1825.PDF>
- Enríquez, R. A., & Orozco, O. A. (2011). Conductividad hidráulica en diferentes suelos del municipio de San José de los remates, Boaco 2009. Retrieved May 9, 2021, from

- <http://repositorio.una.edu.ni/2173/>
- FAO. (1993). Erosión de suelos en America Latina. Retrieved May 7, 2021, from FAO website: <https://www.fao.org/3/t2351s/t2351s00.htm>
- FAO. (2015a). Costa Rica padece problemas con la erosión del suelo. Retrieved May 7, 2021, from <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/516589/>
- FAO. (2015b). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. Retrieved May 7, 2021, from <https://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- FAO. (2017). El manejo y procesos naturales que impactan las propiedades físicas del suelo. Retrieved May 7, 2021, from <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/evaluacion-de-los-indicadores-globales-de-la-salud-del-suelo/salud-del-suelo-fisica/es/>
- FAO. (2018). Estudio de las causas de la deforestación y degradación forestal en Guinea Ecuatorial. Retrieved May 7, 2021, from FAO website: <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA0399ES/>
- Fléchet, G. (2007). El sobrepastoreo acelera la erosión de los suelos en el norte de México. *Institut de Recherche Pour Le Développement*, 281, 2.
- Gómez-Tagle Ch, A., Gómez-Tagle R, A. F., Batlle-sales, J., Zepeda, H., Santamaría, M. G., Maldonado, S., & Emmanuel, L. J. (2008). CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DE CAMPO: USO DE UN INFILTRÓMETRO DE CARGA CONSTANTE Y ANILLO SENCILLO. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 287–297.
- Gutiérrez, E. (2017). Sistemas intensivos sostenibles de ganadería de leche. Retrieved August 5, 2021, from INTA-Costa Rica website: <https://bit.ly/2lQKaw9>
- Hernández, A. (2010). *Geomorfología uso de la tierra y dinámica erosión / sedimentación como aspectos claves para iniciar la gestión ambiental en la cuenca hidrográfica del río Nosara, Guanacaste, Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica Universidad.
- IICA. (2012). Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central. Retrieved October 9, 2021, from Proyecto de red de innovación agrícola website: <http://repiica.iica.int/docs/b3470e/b3470e.pdf>
- Jiménez, G., & Marinidou, E. (2010). Sistemas Silvopastoriles. In *Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)*. Retrieved from <https://www.biopasos.com/documentos/072.pdf>

- Jiménez, R. (2009). El suelo como recurso ambiental. Retrieved July 25, 2021, from [papers://ae99785b-2213-416d-aa7e-3a12880cc9b9/Paper/p4411](https://papers://ae99785b-2213-416d-aa7e-3a12880cc9b9/Paper/p4411)
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land cover change in tropical regions (University of Louvain; Vol. 28). <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Leh, M., Bajwa, S., & Chaubey, I. (2013). Impact of land use change on erosion risk: AN integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology (University of Arkansas; Vol. 24). <https://doi.org/10.1002/ldr.1137>
- MAG. (2018). Manual de herramientas sobre tecnologías de producción agropecuaria. Retrieved June 7, 2021, from <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P01-10955.pdf>
- MAG. (2019). Manejo y Conservación de suelos Agrícolas. Retrieved March 17, 2021, from <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P36-11098.pdf>
- MAG, & FAO. (1996). *Aspectos de producción y conservación de suelos y agua en áreas ganaderas* (I. Ondoy, Ed.). Retrieved from <http://www.fao.org/3/ar805s/ar805s.pdf>
- MAG, & MINAE. *Norma 41960 Establecimiento de la metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras agroecológicas de Costa Rica Texto Completo Norma 41960.* , (2020).
- Mancilla, G. (2008). Uso y conservación de suelos: Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal. Retrieved August 15, 2021, from Universidad De Chile website: [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes\\_docentes\\_USLE.pdf](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf)
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Retrieved February 14, 2021, from <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>
- Meléndez, G. (2008). Taller de Abonos Orgánicos. *Soil Science Society of America Journal*, 1, 120–150. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>
- Monsalve Ó. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo . Una revisión Factors involved in the process of nitrogen mineralization when organic amendments are added to a soil . A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas.*, 11(1), 200–209. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>

- Moore, I., & Burch, G. (1986). Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294–1298.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Moreno, S. (2018). *Potencial fitorremediador de Bacopa Monnieri Pennell en suelos salinos* (Instituto Politécnico Nacional). Retrieved from  
[https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27315/TESIS\\_SALVADOR\\_MORENO\\_GARCIA\\_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27315/TESIS_SALVADOR_MORENO_GARCIA_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Narváez, Ii. (2013). Percepción sobre la tendencia de caudales, precipitación, temperatura y cambio de uso del suelo con relación al uso y manejo del agua en la zona norte de Cartago, Costa Rica. Retrieved March 20, 2021, from  
<http://www.sidalc.net/repdoc/A10786e/A10786e.pdf>
- Núñez, J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. (EUNED, Ed.). San José, Costa Rica.
- Núñez, J. (2004). Determinación de textura en muestras de suelo. In UNED (Ed.), *UNED Research Journal* (EUNED, Vol. 2, pp. 13–30). San José, Costa Rica: UNED.
- Piscitelli, M., Varni, M., Sfeir, A., & Ares, G. (2010). Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul-Buenos Aires). *Revista de La Facultad de Agronomía, La Plata*, 109(1), 17–22.
- Prado, J. V., Rivera, P., de León, B., Mauricio, C., & Martínez, A. (2017). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: Caso el malacate. *Agrociencia*, 51(3), 265–284.
- Proyecto JALDA. (2012). Construcción de terrazas individuales. Retrieved November 23, 2021, from [https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/green/green72-9\\_1-16.pdf](https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/green/green72-9_1-16.pdf)
- Ramírez, F., Hincapié, E., & Sadeghian, S. (2009). Erodabilidad De Los Suelos De La Zona Central Cafetera Del Departamento De Caldas. *Cenicafé*, 60(1), 58–71. Retrieved from  
[http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060\(01\)58-71.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/157/1/arc060(01)58-71.pdf)
- Ramírez, L. (2008). *CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO REVENTADO*, . 32(2), 73–92.
- Reeder, J., Schuman, G., Morgan, J., & LeCain, D. (2005). *Response of Organic and Inorganic Carbon and Nitrogen to Long-Term Grazing of the Shortgrass Steppe*. 33,

485–495.

- Salazar, C. (2015). *Suelos de Costa Rica Orden Ultisol [Brochure]*. 2. Retrieved from <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>
- Sánchez, I. (2014). Estrategias de manejo en el cultivo de avena (*Avena sativa*) como un uso del suelo en la zona norte de Cartago. Retrieved November 7, 2021, from <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2511/1/36943.pdf>
- Sanchez, J., & Soto, H. (1999). CONTENIDO DE ENERGIA ESTIMADA PARA EL CRECIMIENTO DEL GANADO BOVINO, EN LOS FORRAJES DEL TROPICO HUMEDO DE COSTA RICA. Retrieved November 25, 2021, from [https://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v23n02\\_173.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_agr/v23n02_173.pdf)
- Sanchez, W., & Hidalgo, C. (2016). EXPERIENCIAS CON PASTOS Y FORRAJES EN LA ZONA ALTA LECHERA DE LA MICROCUENCA PLANTÓN-PACAYAS, CARTAGO. Retrieved November 23, 2021, from MAG website: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1643.pdf>
- Sancho, F., & Villatoro, M. (2005). Efecto De La Posición En La Pendiente Sobre La Productividad De Tres Secuencias De Suelos En Ambientes Ústicos De Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 159–174.
- SEPSA. (2020). Modelo de costos de producción de aguacate hass. Retrieved December 7, 2021, from [http://www.infoagro.go.cr/EstadisticasAgropecuarias/CostosProduccion/Documents/AGUACATE\\_Nacional\\_2020.pdf](http://www.infoagro.go.cr/EstadisticasAgropecuarias/CostosProduccion/Documents/AGUACATE_Nacional_2020.pdf)
- Suraj, B., Kumaraperumal, R., Kannan, B., & Ragunath, K. P. (2019). Soil erodibility estimation and its correlation with soil properties in Coimbatore district. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3), 3327–3332.
- Unidad de Gestión Nacional de Costa Rica. (2010). Plan De Cuenca Del Río Reventazón-Parismina. Retrieved November 24, 2021, from [https://www.sica.int/documentos/plan-de-cuenca-del-rio-reventazon-parismina-2008-2010\\_1\\_28765.html](https://www.sica.int/documentos/plan-de-cuenca-del-rio-reventazon-parismina-2008-2010_1_28765.html)
- USDA. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Retrieved June 16, 2021, from [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051913.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051913.pdf)



## **9. ANEXOS**

### Anexo 1. Clases de capacidad de uso.

Clases	Características
<b>I</b>	<p>Dentro de esta clase se incluyen tierras que no presentan limitación alguna para el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias o forestales, adaptadas ecológicamente a la zona.</p> <p>Las tierras de esta clase se encuentran sobre superficies planas o casi planas, con erosión sufrida nula, con suelos muy profundos, de texturas medias superficiales sobre moderadamente gruesas o moderadamente finas en el subsuelo, sin piedras, sin problemas por toxicidad de cobre u otros elementos, salinidad, drenaje bueno, sin riesgo de inundación, en zonas de vida de condición húmeda, período seco moderado y sin efectos adversos por neblina y viento.</p>
<b>II</b>	<p>Las tierras de esta clase presentan leves limitaciones que solas o combinadas reducen la posibilidad de elección de actividades agrícolas, pecuarias y forestales a desarrollar o se incrementan los costos de producción debido a la necesidad de usar prácticas de manejo y conservación de suelos.</p> <p>Las limitaciones que se pueden presentar solas o combinadas son: pendiente ligeramente ondulada, erosión sufrida leve, suelos profundos, texturas moderadamente finas o moderadamente gruesas superficiales sobre finas en el subsuelo, ligeramente pedregosos, fertilidad media, toxicidad leve de cobre u otros elementos, salinidad leve, drenaje moderadamente excesivo o moderadamente lento, riesgo de inundación leve, zonas de vida muy húmedas, excepto bosque muy húmedo Montano (bmh-M), con período seco fuerte o ausente, y condición de neblina y viento moderada.</p>
<b>III</b>	<p>Las tierras de esta clase presentan limitaciones moderadas solas o combinadas, que restringen la elección de las actividades agrícolas, pecuarias o forestales a desarrollar o se incrementan los costos de producción. Para desarrollar los cultivos anuales se requieren prácticas intensivas de manejo y conservación de suelos y aguas.</p> <p>Entre las limitantes presentes en esta clase están: pendiente moderadamente ondulada, erosión sufrida moderada, profundidad efectiva moderada, texturas finas o muy finas superficiales sobre muy finas en el subsuelo, pedregosidad moderada, toxicidad de cobre u otros elementos, leve riesgo de inundación moderado, en zonas de vida de bosque seco Tropical (bs-T) y bosque muy húmedo Montano (bmh-M), con período seco muy fuerte.</p>
<b>IV</b>	<p>Las tierras de esta clase presentan fuertes limitaciones, que solas o combinadas, restringen su uso a cultivos semiperennes, perennes y actividades forestales.</p> <p>Los cultivos anuales se pueden desarrollar únicamente en forma ocasional y con prácticas muy intensivas de manejo y conservación de suelos y aguas, excepto en climas pluviales, donde este tipo de actividad no es recomendable.</p>

	Entre las limitaciones que pueden presentarse solas o combinadas en esta clase tenemos: pendiente ondulada, pedregosidad y fertilidad baja.
<b>V</b>	Las tierras de esta clase presentan severas limitaciones para el desarrollo agrícola por lo cual su uso se restringe al uso pecuario y forestal.  Las limitaciones que pueden ocurrir solas o combinadas son: suelos poco profundos, las texturas del suelo y subsuelo gruesas, fuertemente pedregosos, toxicidad de cobre u otros elementos moderada, salinidad moderada, drenaje lento o excesivo, riesgo de inundación severo, bosques pluviales, condición de neblina y viento fuerte.
<b>VI</b>	Las tierras de esta clase presentan severas limitaciones para el desarrollo de actividades agrícolas anuales y semiperennes, pecuarias, y constituye el nivel máximo en el que se pueden desarrollar actividades de producción forestal u otros cultivos perennes. Las plantaciones forestales que se establezcan en esta clase deberán desarrollarse con prácticas de manejo adecuadas a las limitaciones de la tierra y los requerimientos de la especie.  Las limitaciones que se pueden presentar, solas o combinadas son pendiente fuertemente ondulada, erosión sufrida severa y fertilidad muy baja.
<b>VII</b>	Las tierras de esta clase tienen severas limitaciones para los usos agropecuarios, por lo cual solo se permite el manejo forestal en caso de cobertura boscosa. En aquellos casos en que el uso actual sea diferente al bosque, se procurará la rehabilitación del uso forestal o del manejo de la vegetación natural. En el caso en que el uso actual del suelo no incluya patrimonio natural del Estado, se permitirá el cambio de uso agropecuario a otro.  Las limitaciones que se pueden presentar solas o combinadas son: pendiente escarpada, toxicidad de cobre u otros elementos fuerte y riesgo de inundación muy severo.
<b>VIII</b>	Estas tierras no reúnen las condiciones mínimas para actividades de producción Agrícola, pecuaria o forestal. En el caso en que el uso actual del suelo no incluya patrimonio natural del Estado, se permitirá el cambio de uso agropecuario a otro.  Las limitaciones que se pueden presentar solas o combinadas son: pendiente fuertemente escarpada, erosión muy severa, profundidad efectiva superficial, extremadamente pedregosos, salinidad fuerte, drenaje nulo y una zona de vida de paramo pluvial Sub Alpino (pp-SA).

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

## Anexo 2. Subclases de capacidad de uso.

Subclases	Características
<b>Erosión (e)</b>	Es la pérdida actual de suelo provocada por la escorrentía superficial o cualquier otro agente causal. La erosión actual o sufrida ocurre por malas prácticas de manejo de la tierra y potencial según el grado de inclinación de la pendiente.
<b>Suelo (s)</b>	Se refiere a las limitaciones que se presentan, provocadas por uno o varios de los siguientes factores: profundidad efectiva, textura, pedregosidad, fertilidad, toxicidad por cobre u otros elementos y salinidad.
<b>Drenaje (d)</b>	Agrupar las limitaciones causadas por exceso o deficiencia de humedad en el suelo o por riesgo de inundación.
<b>Clima (c)</b>	Son limitaciones debidas a las distintas características climáticas que afectan negativamente el crecimiento de las plantas. Para caracterizar las limitaciones por clima, el sistema emplea las zonas de vida (Holdridge, Leslie R. Ecología basadas en zonas de vida. Quinta reimpresión-San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1996, c 1978), el periodo seco, el viento y la neblina.

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

## Anexo 3. Clasificación de la Pendiente.

Categoría	Relieve	Pendiente
<b>I</b>	Plano o casi plano	0 a 3%
<b>II</b>	Ligeramente ondulado	4 a 8%
<b>III</b>	Moderadamente ondulado	9 a 15%
<b>IV</b>	Ondulado	16 a 30%
<b>V</b>	Fuertemente ondulado	31 a 55%
<b>VI</b>	Escarpado	56 a 75%
<b>VII</b>	Fuertemente escarpado	>75%

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

#### Anexo 4. Clasificación de la erosión.

<b>Categoría</b>	<b>Erosión</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Nula	Sin síntomas de erosión
<b>II</b>	Ligera o leve	Los suelos presentan pocos canalículos de escasos centímetros de profundidad después de las lluvias, la presencia de pedestales de poca altura (menores a 3 cm) puede ser un índice de erosión leve, lo mismo que muestras leves de pisoteo de ganado en pastos.
<b>III</b>	Moderada	Se observan evidencias de erosión a través de la presencia generalizada durante todo el ciclo del cultivo, de canalículos y surcos pocos profundos, o pedestales altos (3 a 5 cm).
<b>VI</b>	Severa	Se observa la presencia de abundantes surcos, aun después de la labranza, de canalículos y surcos profundos durante todo el ciclo del cultivo, y la presencia de trillos profundos sin vegetación y pequeños deslizamientos en laderas, con macollas de pasto sobre pedestales de suelo (5 a 10 cm); así como los efectos de las aguas mal encausadas, provenientes de obras de infraestructura vial.
<b>VIII</b>	Muy severa	Se presentan cárcavas profundas y densas. Los suelos están prácticamente destruidos o son fuertemente truncados. En esta categoría se incluyen los deslizamientos y remoción en masa.

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

#### Anexo 5. Clasificación de profundidad.

<b>Categoría</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Muy Profundo	>de 120 cm
<b>II</b>	Profundo	De 91 a 120 cm
<b>III</b>	Moderadamente profundo	De 61 a 90 cm
<b>V</b>	Poco profundo	De 31 a 60 cm
<b>VIII</b>	Superficial	< de 30 cm

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

**Anexo 6. Clasificación textural.**

<b>Categoría</b>	<b>Relieve</b>	<b>Pendiente</b>
<b>V</b>	Gruesas	Arenosa, arenosa franco gruesa y media.
<b>I</b>	Moderadamente gruesas	Arenosa franco fina, franco arenosa media y gruesa.
<b>I</b>	Medianas	Franco arenosa fina, franco limosa, limosa.
<b>I</b>	Moderadamente finas	Franco arcillosa, franco arcillo limosa, franco arcillo arenosa.
<b>II</b>	Finas	Arcillosa (menos del 60% de arcilla), arcillo arenosa y arcillo limosa.
<b>IV</b>	Muy finas	Arcillosa (mas de 60% de arcilla).

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

### Anexo 7. Clasificación de la pedregosidad.

<b>Categoría</b>	<b>Pedregosidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Sin pedregosidad	No hay piedras o son tan pocas que no interfieren en la preparación del suelo.
<b>II</b>	Ligeramente pedregoso	El contenido de piedras solo permite la utilización de maquinaria liviana o herramientas de mano para preparar el terreno. El área ocupada por piedras expuestas varía de 1 a 1000 m <sup>2</sup> /ha, es decir, 0,01-10% del área.
<b>III</b>	Moderadamente pedregoso	El contenido de piedras es suficiente para impedir cualquier uso de maquinaria agrícola en la preparación de terrenos, por lo que sólo se pueden usar implementos manuales. El área ocupada por las piedras supera los 1000 m <sup>2</sup> , hasta los 2000 m <sup>2</sup> /ha, es decir, de 11 a 20%.
<b>IV</b>	Pedregoso	La superficie se encuentra cubierta de piedras, las cuales ocupan entre 21 y 50% de la superficie. Sólo se podrán usar implementos manuales ocasionalmente.
<b>V</b>	Fuertemente pedregoso	La superficie se encuentra cubierta de piedras, las cuales ocupan entre el 51% y 75% de la superficie. Para la preparación de los terrenos, solo se podrán usar implementos manuales ocasionalmente.
<b>VIII</b>	Extremadamente pedregoso	La superficie se encuentra prácticamente cubierta de piedras, en más del 75% de estas cubriendo la superficie.

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

### Anexo 8. Clasificación de la fertilidad.

<b>Categoría</b>	<b>Fertilidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Alta	Suma de bases mayor que 15 cmol (+) /l, acidez < 0,3 cmol (+) /l, pH neutro (> 6,5 a 7) y saturación de acidez menor de 10%.
<b>II</b>	Media	Suma de bases mayor de 5 cmol (+) /l, acidez < 0,5 cmol (+) /l, pH ligeramente ácido (> 5,5 a 6,5) y saturación de acidez menor que 30%.
<b>IV</b>	Baja	Suma de bases menor a 5 cmol (+) /l, acidez de 0,5 a 1 cmol (+) /l, pH fuertemente ácido (de 4,5 a 5,5) y saturación de acidez menor a 50 %.
<b>VI</b>	Muy baja	Suma de bases menor a 5 cmol (+) /l, acidez > 1 cmol (+) /l, pH extremadamente ácido (<4,5) y saturación de acidez mayor a 50 %.

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

### Anexo 9. Clasificación de la toxicidad.

<b>Categoría</b>	<b>Toxicidad por cobre</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Nula	0-25 mg/L
<b>III</b>	Leve	26-75 mg/L
<b>V</b>	Moderada	76-150 mg/L
<b>VII</b>	Fuerte	>150 mg/L

Fuente:(MAG & MINAE, 2020)

#### Anexo 10. Clasificación de suelos salinos.

<b>Suelo</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>PSI (%)</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Normal</b>	<4	<15	6,5 a 7,5	Buena permeabilidad, aireación y estructura
<b>Salino</b>	>4	<15	7,0 a 8,5	Presencia de costras blancas en la superficie.
<b>Salino-sódico</b>	>4	>15	<8,5	Poca permeabilidad, baja aireación, de flocculación de moderada a alta
<b>Sódico</b>	<4	>15	8,2 a 10	Mala permeabilidad, difícil de trabajar y alta deflocculación de sus partículas

Fuente: (Moreno, 2018).

#### Anexo 11. Clasificación de la salinidad del suelo.

<b>Categoría</b>	<b>Salinidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Nula	0 – 4 dS/m
<b>V</b>	Moderada	4.1 – 16 dS/m
<b>VIII</b>	Fuerte	>16 dS/m

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

**Anexo 12.** Clasificación de drenaje.

<b>Categoría</b>	<b>Drenaje</b>	<b>Descripción</b>
<b>V</b>	Excesivo	El agua se elimina del suelo rápidamente, ya sea porque posee texturas gruesas; o pendientes onduladas o mayores asociadas a texturas finas.
<b>II</b>	Moderadamente excesivo	El agua se elimina del suelo en forma moderadamente rápida. Muchos de estos suelos son de texturas moderadamente gruesas o de relieve moderadamente ondulado a fuertemente ondulado asociado a texturas moderadamente finas a finas.
<b>I</b>	Bueno	El agua se elimina del suelo con facilidad. Los suelos planos bien drenados tienen comúnmente texturas medias; sin embargo, suelos con texturas finas, con buena estructura, en pendientes hasta moderadamente onduladas, pueden incluirse dentro de esta clase. Además, no debe poseer características redoximórficas dentro de los primeros 90 cm de profundidad.
<b>II</b>	Moderadamente lento	En esta categoría, el agua se elimina del suelo con cierta lentitud, de modo que el perfil permanece saturado por periodos menores a tres meses. El drenaje moderadamente lento por lo general se da en suelos de relieves planos a casi planos, con características redoximórficas después de los 30 cm de profundidad, pueden aparecer ocasionalmente capas gleyzadas después de los 60 cm de profundidad.
<b>V</b>	Lento	El agua se elimina del suelo con lentitud suficiente para mantenerlo saturado durante períodos muy apreciables de tiempo (3 a 9 meses al año). Los suelos de drenaje lento pueden tener características redoximórficas dentro de los primeros 30 cm de profundidad, y es frecuente que se presenten capas gleyzadas después de los 30 cm de profundidad.

<b>VIII</b>	Nulo	El agua permanece sobre la superficie del suelo la mayor parte del año (más de 9 meses al año) Estos suelos presentan hidromorfismo o gleyzación a través de todo el perfil.
-------------	------	--

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

### Anexo 13. Clasificación de riesgo de inundación.

<b>Categoría</b>	<b>Anegamiento o Inundación</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Nulo	Los suelos no presentan ningún riesgo de sufrir inundaciones
<b>II</b>	Leve	Se presentan en forma ocasional y, por lo general, en años excepcionalmente lluviosos. Sin embargo, su permanencia no es mayor de una semana.
<b>III</b>	Moderado	Las inundaciones, por lo general, ocurren todos los años, pero su permanencia es inferior a dos semanas.
<b>V</b>	Severo	Las inundaciones ocurren varias veces al año y permanecen por periodos cortos (menos de dos semanas)
<b>VII</b>	Muy Severo	Las inundaciones ocurren varias veces al año y por periodos mayores a dos semanas.

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

### Anexo 14. Clasificación de zonas de vida.

<b>Categoría</b>	<b>Zona de vida</b>	<b>Sigla</b>
<b>I</b>	Bosque húmedo tropical	bh-T
<b>I</b>	Bosque húmedo premontano	bh-P
<b>I</b>	Bosque húmedo montano bajo	bh-MB
<b>III</b>	Bosque seco tropical	bs- T
<b>II</b>	Bosque muy húmedo tropical	bmh-T

<b>II</b>	Bosque muy húmedo premontano	bmh-P
<b>II</b>	Bosque muy húmedo montano bajo	bmh-MB
<b>III</b>	Bosque muy húmedo montano.	bmh-M
<b>V</b>	Bosque pluvial premontano	bp-P
<b>V</b>	Bosque pluvial montano bajo	bp- MB
<b>V</b>	Bosque pluvial montano	bp-M
<b>VIII</b>	Bosque pluvial subalpino	bp-SA

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

#### Anexo 15. Duración del periodo seco.

	<b>Período seco</b>	<b>Duración</b>
<b>II</b>	Ausente	<1 mes
<b>I</b>	Moderado	2 – 3 meses
<b>II</b>	Fuerte	4 – 5 meses
<b>III</b>	Muy Fuerte	>5 meses

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

## Anexo 16. Clasificación de la neblina.

<b>Categoría</b>	<b>Neblina</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	Ausente	Aquí se incluyen los sitios en que la neblina no representa ningún obstáculo para un normal desarrollo de las actividades agrícolas productivas. Se reconoce en el campo por la ausencia o poca frecuencia del musgo sobre los árboles, el cual puede aparecer inclusive cubriendo parcialmente algunas ramas de la mayoría de los árboles del lugar.
<b>II</b>	Moderada	Esta categoría corresponde a lugares afectados por neblina casi a diario durante la época lluviosa y en forma menos frecuente durante la época seca. En el campo se determinan tales condiciones por la abundancia de musgo, el cual cubre gran parte de las ramas y de los troncos de casi todos los árboles. Este puede ser colgante (5 a 15 cm de longitud) o en forma más corta, pero formando capas. Se excluye de esta categoría la proliferación de barba de viejo.
<b>V</b>	Fuerte (Bosque Nuboso)	Corresponde a áreas en las que la neblina es tan frecuente que ocurre casi todos los días y es producida por el contacto diario entre las nubes y el terreno. Son sitios fácilmente

---

reconocibles por la abundancia del musgo, el que cubre todo o casi todo el árbol, formando en la mayoría de los casos una verdadera "alfombra" sobre las ramas o tronco de los árboles maduros o viejos. Resulta común observar bajo tales condiciones, que los postes de las cercas, los cortes de caminos, los suelos y las rocas se encuentran cubiertos de musgos. Los bosques naturales de tales sectores son de baja altura.

---

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

#### Anexo 17. Velocidad del viento.

<b>Categoría</b>	<b>Viento</b>	<b>Velocidad</b>
<b>I</b>	Ausente	>15 km/h
<b>II</b>	Moderado	15 a 30 km/h
<b>V</b>	Fuerte	<30 km/h

Fuente: (MAG & MINAE, 2020)

#### Anexo 18. Condición Hidrológica.

<b>Cobertura vegetal</b>	<b>Condición Hidrológica</b>
>75% del área	Buena
Entre 50% y 75% de área	Regular
<50% del área	Pobre

Fuente: (Villón, 2004)

**Anexo 19.** Clasificación hidrológica de los suelos.

<b>Grupo de suelos</b>	<b>Descripción</b>
<b>A</b>	Mas bajo potencial de escorrentía: Incluye arenas con muy poco limo y arcilla. También incluye suelos profundos de alta permeabilidad por razones especiales (ejemplo oxisoles)
<b>B</b>	Moderadamente bajo potencial de escorrentía: Principalmente, suelos arenosos menos profundos que A. También suelos de alta permeabilidad por razones especiales menos profundos que A. Su capacidad de infiltración después de saturadas es superior al promedio.
<b>C</b>	Moderadamente alto potencial de escorrentía: Comprende suelos superficiales y suelos que contienen alto contenido de arcilla y coloides, aunque menos que aquellos del grupo D. Después de saturación el grupo tiene una capacidad de infiltración menor que el promedio
<b>D</b>	Moderadamente alto potencial de escorrentía: Suelos con infiltración muy lenta, cuando están muy húmedos. Incluye principalmente arcillas expansivas y suelos superficiales con horizontes casi impermeables (o roca) cerca de la superficie.

Fuente: (Villón, 2004)

**Anexo 20.** Curvas de escorrentía para los complejos suelo-cobertura (NC), para condición de humedad II Ia=0.2S.

	<b>Cobertura</b>		<b>Grupo de suelos</b>			
			A	B	C	D
<b>Uso de la tierra</b>	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Número de curva			
<b>Rastrojo</b>	Hileras rectas	-	77	86	91	94
<b>Cultivo en hileras</b>	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras rectas	Buena	67	78	85	89
	C/curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
	C/curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
	C/curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
	C/curvas de nivel y terrazas	Buena	62	71	78	81

<b>Pastos de pastoreo</b>	-	Mala	68	79	86	89
	-	Regular	49	69	79	84
	-	Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	6	35	70	79

Fuente: (Villón, 2004)

### Anexo 21. Condición de Humedad Antecedente.

<b>Condición de Humedad Antecedentes Propuesto por SCS</b>		
<b>CHA</b>	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento de consideración (cm)	
	Estación Seca	Estación de Crecimiento
<b>I (seca)</b>	Menor de 1,3	Menor de 3,5
<b>II (media)</b>	1,3 a 2,5	3,5 a 5
<b>III (húmeda)</b>	Más de 2,5	Más de 5

Fuente: (Villón, 2004)

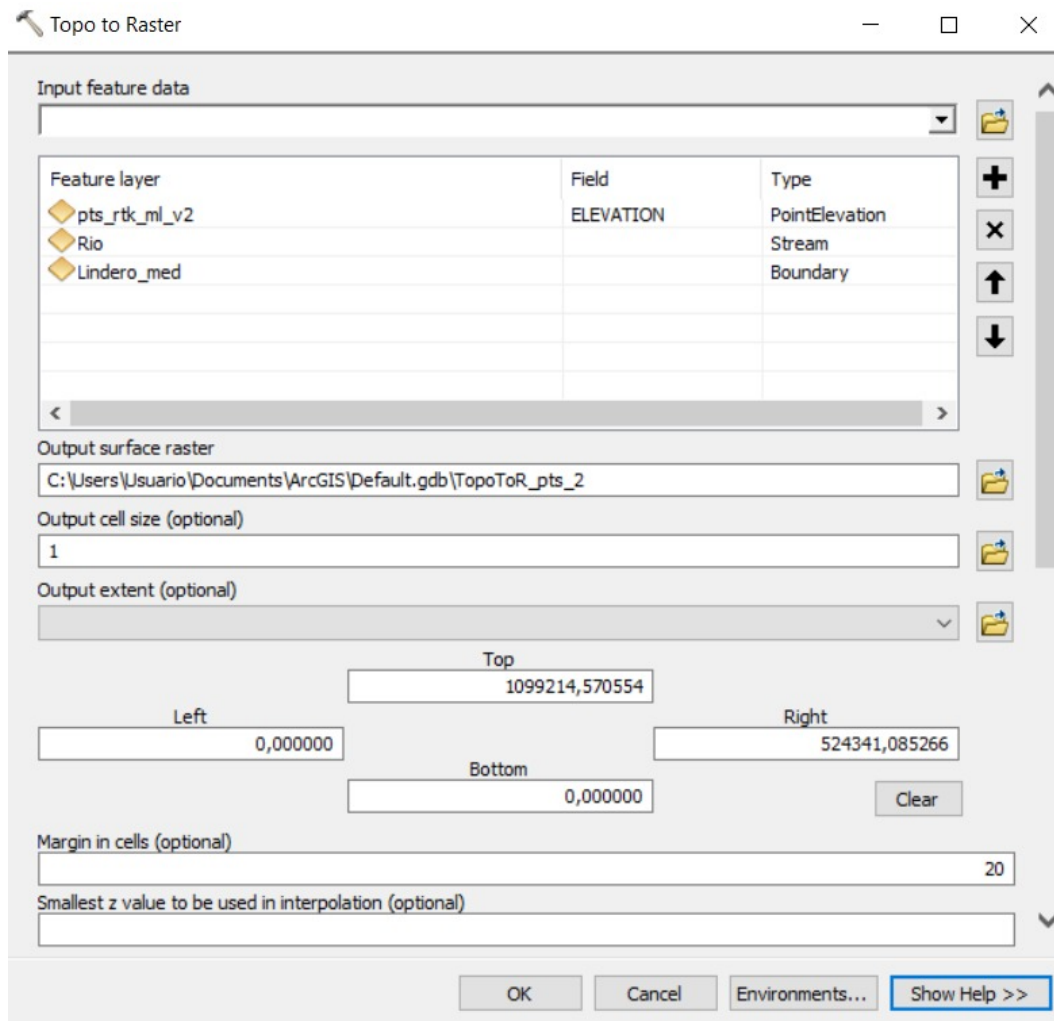
### Anexo 22. Número de curva (NC), para condición de humedad (CHA), I y III.

<b>NC para condición</b>	<b>NC para condiciones</b>	
	<b>I</b>	<b>III</b>
<b>II</b>	I	III
<b>81</b>	64	92
<b>80</b>	63	91
<b>79</b>	62	91
<b>78</b>	60	90
<b>77</b>	59	89
<b>76</b>	58	89
<b>75</b>	57	88
<b>74</b>	55	88
<b>73</b>	54	87

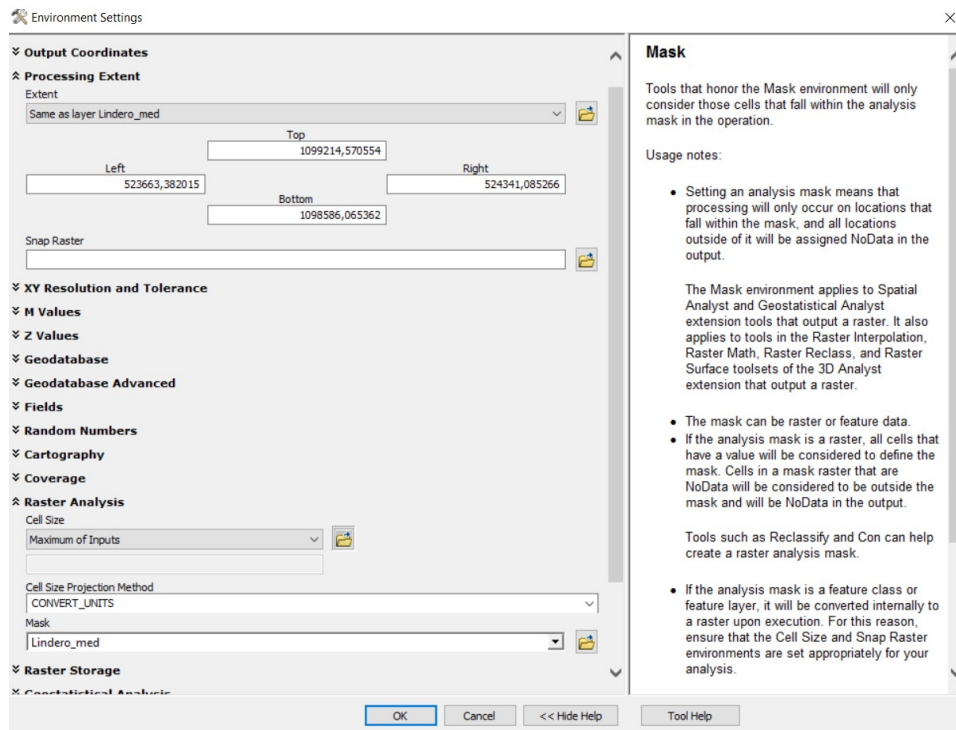
<b>72</b>	53	86
<b>71</b>	52	86
<b>70</b>	51	85
<b>69</b>	50	84
<b>68</b>	48	84
<b>67</b>	47	83
<b>66</b>	46	82
<b>65</b>	45	82
<b>64</b>	44	81
<b>63</b>	43	80
<b>62</b>	42	79
<b>61</b>	41	78
<b>60</b>	40	78

Fuente: (Villón, 2004)

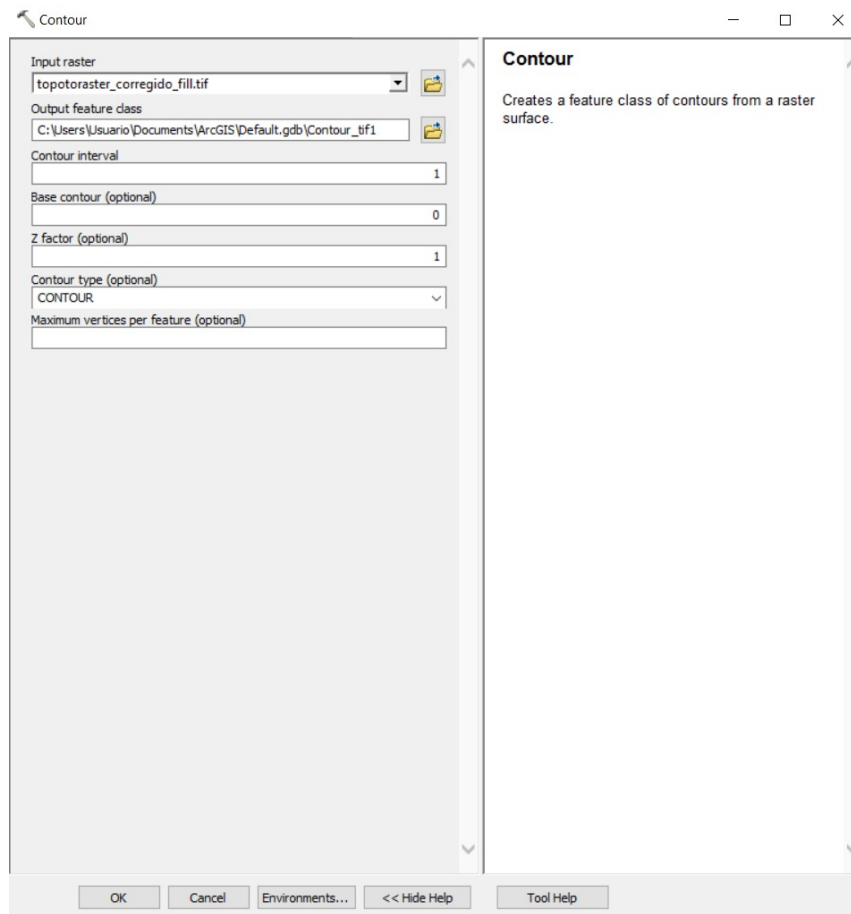
Anexo 23. Geoproceso de la herramienta topo to raster.



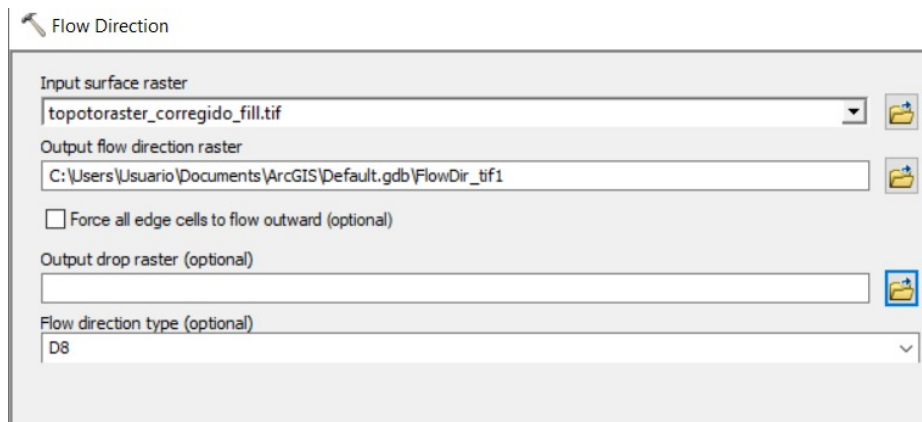
## Anexo 24. Environment settings de la herramienta topo to raster.



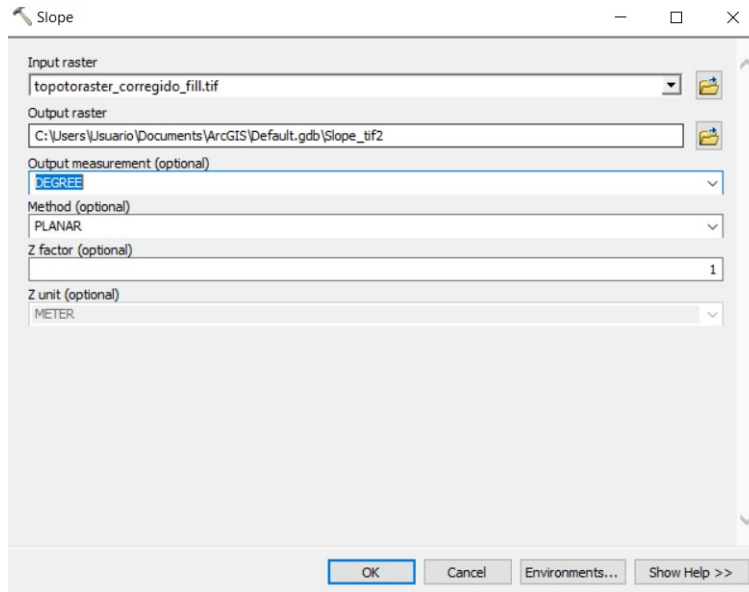
## Anexo 25. Geoproceso de la herramienta Contour.



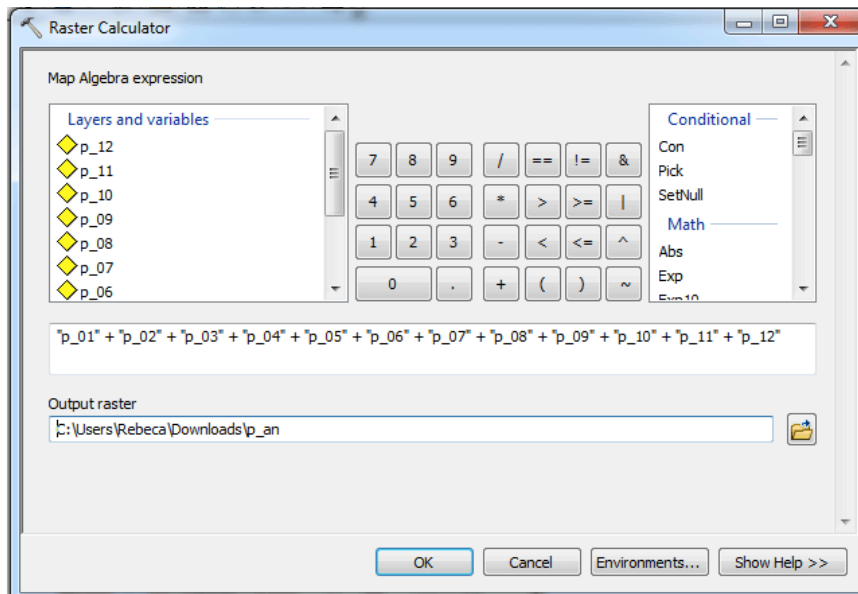
## Anexo 26. Geoproceso de la herramienta Flow Direction.



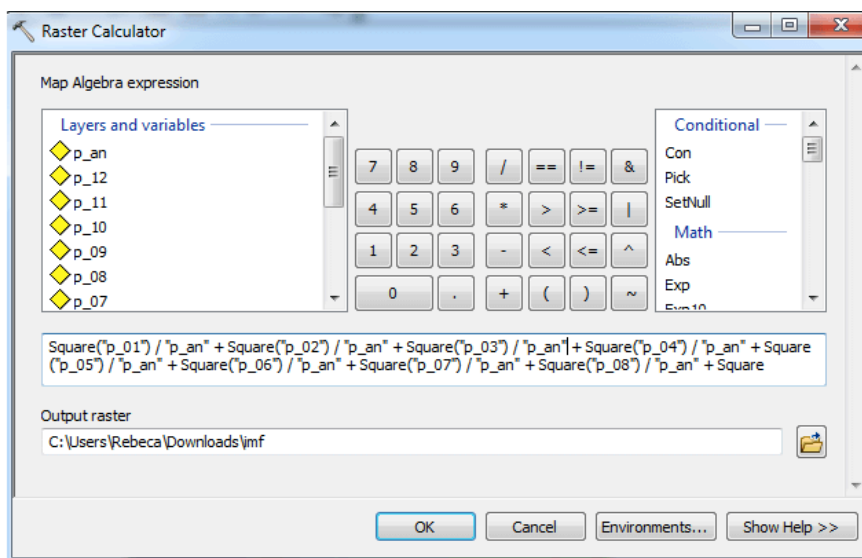
### Anexo 27. Geoproceso de la herramienta Slope.



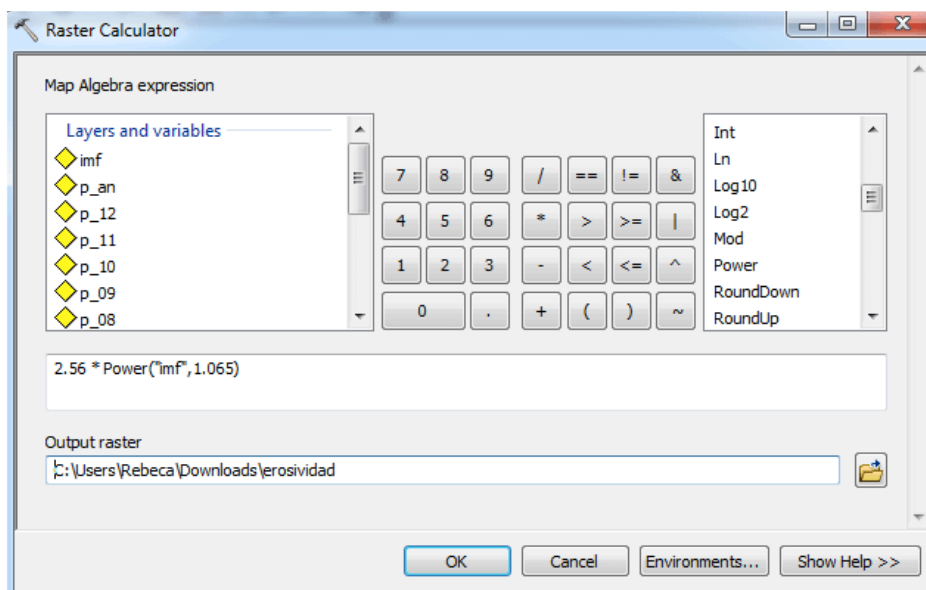
### Anexo 28. Raster Calculator de los 12 rasters de precipitación mensual.



### Anexo 29. Raster calculator para índice modificado de Fournier

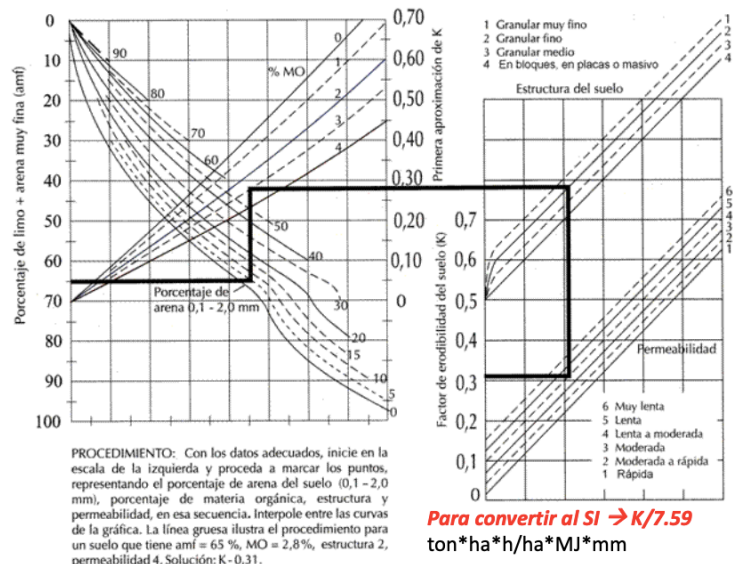


### Anexo 30. Raster calculator para factor de erosividad (R).

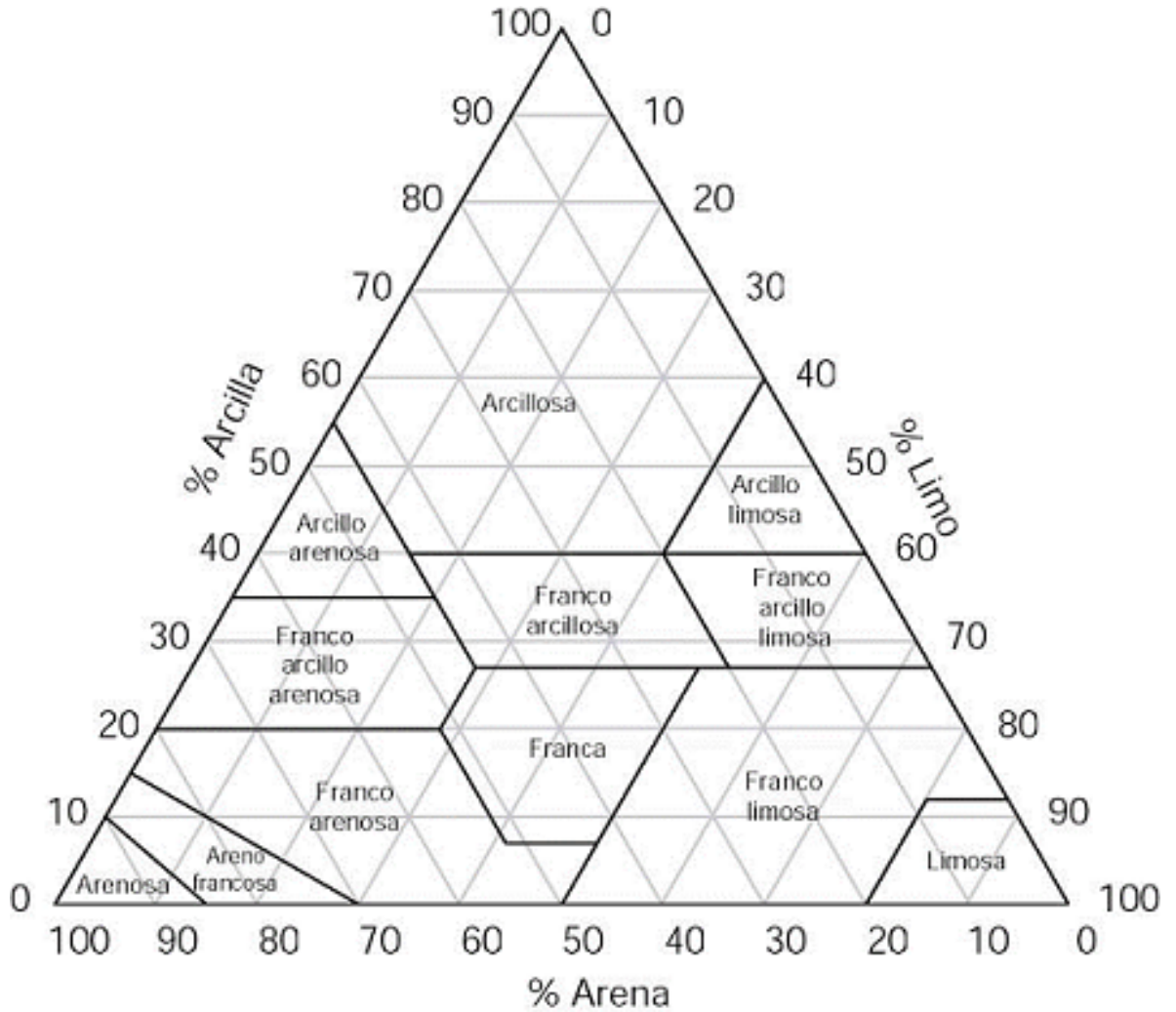


**Anexo 31.** Nomograma para estimar la erodabilidad del suelo. Fuente: (Suraj, Kumaraperumal, Kannan, & Rangunath, 2019)

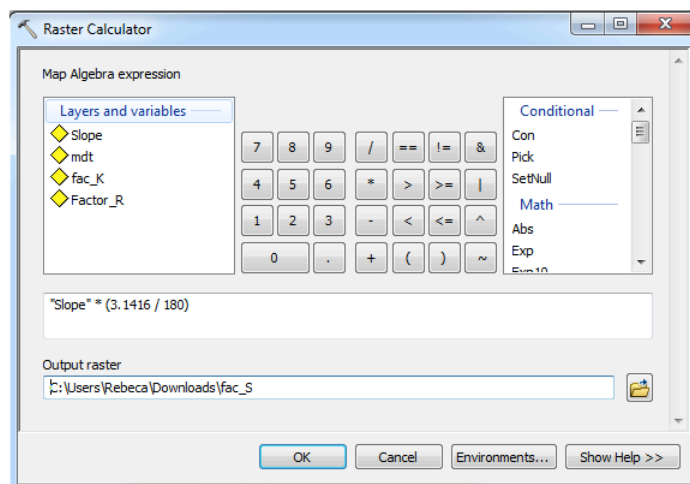
## Erodabilidad del suelo: Estimación



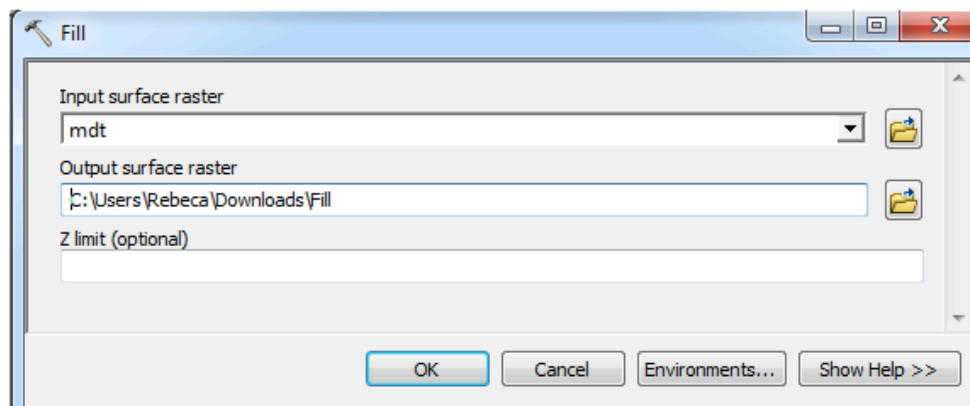
Anexo 32. Triangulo textural. Fuente: (Núñez, 2004)



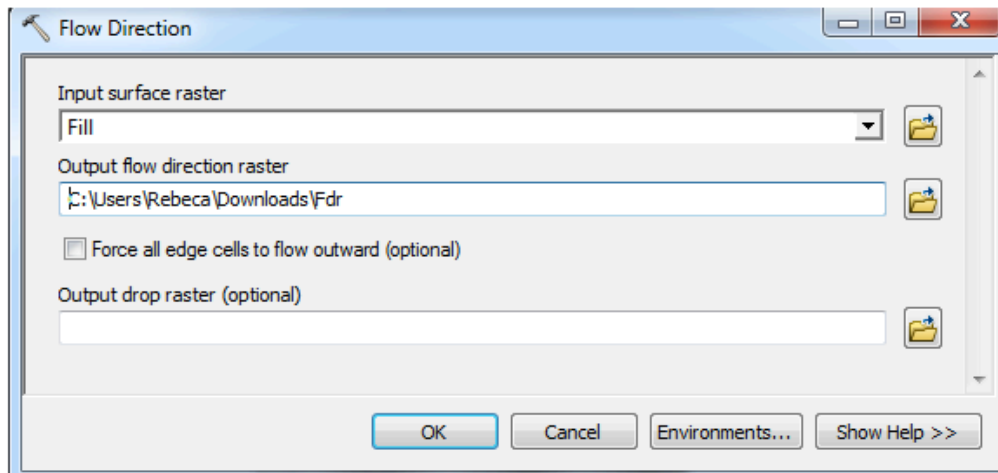
**Anexo 33.** Cálculo de pendiente en radianes.



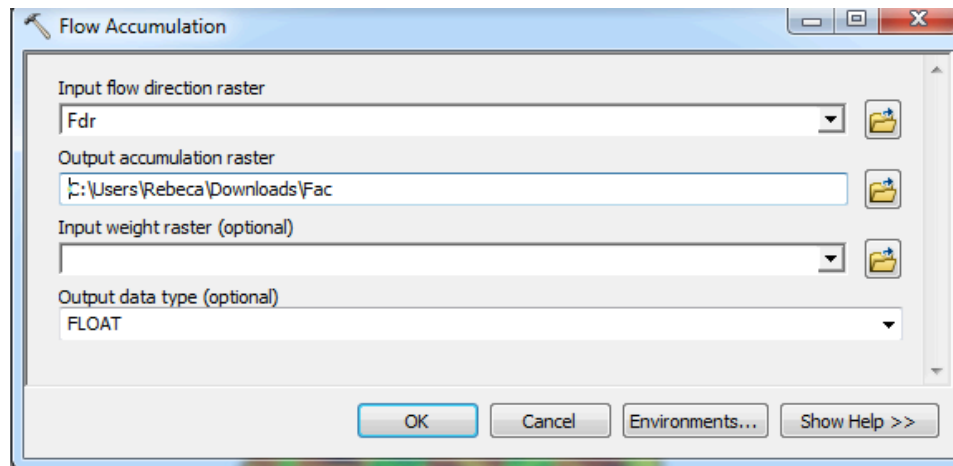
**Anexo 34.** Relleno de sumideros mediante la herramienta Fill.



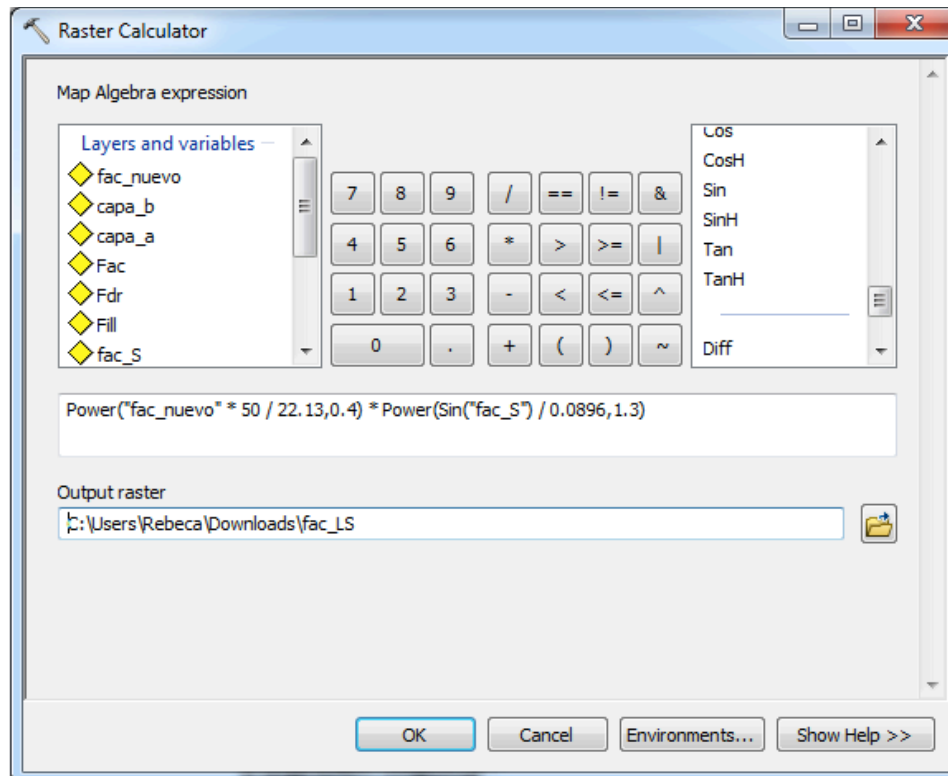
**Anexo 35.** Flow direction.



**Anexo 36.** Flow accumulation.



Anexo 37. Cálculo del factor LS.



**Anexo 38.** Factor de cobertura.

<b>Práctica agrícola</b>	<b>Valor de C</b>
<b>Suelo desnudo</b>	1,0
<b>Bosque o matorral denso con alto contenido de materia orgánica</b>	0,001
<b>Praderas (pastizales) en buenas condiciones</b>	0,01
<b>Pastizales o pradera sobre pastoreo</b>	0,1
<b>Cereal en producción: maíz, sorgo, mijo</b>	0,4 a 0,9
<b>Algodón, tabaco</b>	0,5 a 0,7
<b>Maní en producción</b>	0,4 a 0,8

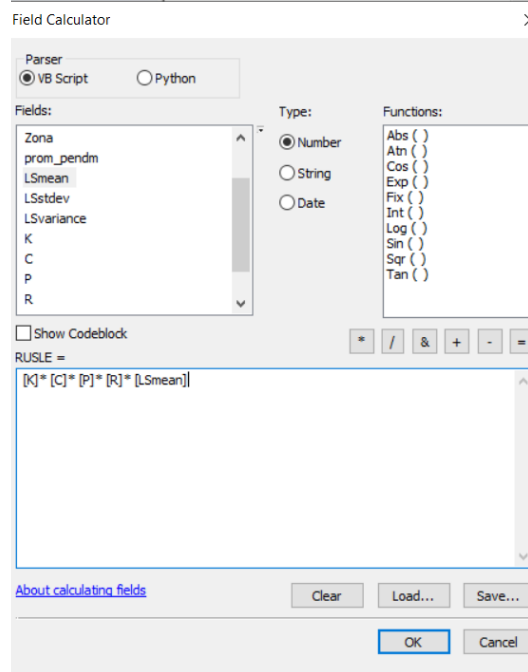
Fuente:(Núñez, 2001)

**Anexo 39.** Factor de prácticas.

<b>Tipo de cobertura</b>	<b>Factor P</b>
<b>Área urbana</b>	1
<b>Suelo desnudo</b>	1
<b>Bosque denso</b>	1
<b>Bosque ralo</b>	1
<b>Bosque mezclado con cultivos (Agroforestería)</b>	0,8
<b>Cultivos</b>	0,5
<b>Cultivos de inundación</b>	0,5
<b>Pastura densa</b>	1
<b>Pastura rala</b>	1
<b>Pasturas con cultivos</b>	0,8
<b>Humedales</b>	1
<b>Cuerpos de agua</b>	1

Fuente:(Mancilla, 2008)

## Anexo 40. Cálculo de la RUSLE.



**Anexo 41. Resultados de textura mediante el método de Bouyucos.**

<b>AREA</b>	<b>Muestra</b>	<b>MAT. SUSPEN.</b>	<b>ARENA</b>	<b>ARCILLA</b>	<b>LIMO</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>
<b>1</b>	<b>A1-Z1</b>	73,775	26,225	38,925	34,85	Franco Arcilloso
<b>2</b>	<b>A2-Z1</b>	63,850	36,150	33,925	29,925	Franco Arcilloso
	<b>A2-Z2</b>	70,975	29,025	26,275	44,7	Franco
	<b>A2-Z3</b>	74,075	25,925	38,925	35,15	Franco Arcilloso
	<b>A2-Z4</b>	69,450	30,550	27,700	41,75	Franco Arcilloso
<b>3</b>	<b>A3-Z1</b>	64,450	35,550	30,275	34,175	Franco Arcilloso
	<b>A3-Z2</b>	64,150	35,850	35,350	28,8	Franco Arcilloso
	<b>A3-Z3</b>	76,575	23,425	32,700	43,875	Franco Arcilloso
	<b>A3-Z4</b>	64,300	35,700	32,850	31,45	Franco Arcilloso
	<b>A3-Z5</b>	54,075	45,925	37,850	16,225	Arcillo Arenoso
<b>4</b>	<b>A4-Z1</b>	70,450	29,550	32,325	38,125	Franco Arcilloso
	<b>A4-Z2</b>	68,025	31,975	34,825	33,2	Franco Arcilloso
	<b>A4-Z3</b>	55,450	44,550	29,450	26	Franco Arcilloso
	<b>A4-Z4</b>	55,450	44,550	27,325	28,125	Franco
<b>5</b>	<b>A5-Z1</b>	71,950	28,050	29,000	42,95	Franco Arcilloso
	<b>A5-Z2</b>	60,450	39,550	29,750	30,7	Franco Arcilloso
	<b>A5-Z3</b>	71,200	28,800	32,025	39,175	Franco Arcilloso
	<b>A5-Z4</b>	73,025	26,975	34,675	38,35	Franco Arcilloso
	<b>A5-Z5</b>	72,875	27,125	32,175	40,7	Franco Arcilloso
	<b>A5-Z6</b>	72,875	27,125	32,175	40,7	Franco Arcilloso
	<b>A5-Z7</b>	73,700	26,300	31,425	42,275	Franco Arcilloso
<b>6</b>	<b>A6-Z1</b>	78,925	21,075	31,575	47,35	Franco Arcilloso
	<b>A6-Z2</b>	75,525	24,475	47,175	28,35	Arcilla
<b>7</b>	<b>A7-Z1</b>	76,575	23,425	32,700	43,875	Franco Arcilloso
	<b>A7-Z2</b>	71,650	28,350	35,200	36,45	Franco Arcilloso
	<b>A7-Z3</b>	71,950	28,050	32,775	39,175	Franco Arcilloso
	<b>A7-Z4</b>	74,450	25,550	32,775	41,675	Franco Arcilloso
<b>8</b>	<b>A8-Z1</b>	73,625	26,375	33,775	39,85	Franco Arcilloso
	<b>A8-Z2</b>	81,050	18,950	33,850	47,2	Franco Arcillo Limoso

<b>A8-Z3</b>	81,350	18,650	36,425	44,925	Franco Arcillo Limoso
<b>A8-Z4</b>	71,050	28,950	23,850	47,2	Franco Limoso
<b>A8-Z5</b>	78,700	21,300	36,350	42,35	Franco Arcilloso

**Anexo 42.** Resultados de distribución de partículas en la finca Alto Fresco.

<b>DISTRIBUCION</b>		<b>Porcentaje según % de arena</b>				
<b>DE</b>						
<b>PARTICULAS</b>						
<b>AREA</b>	<b>Muestra</b>	<b>0,5 mm</b>	<b>0,25 mm</b>	<b>0,125 mm</b>	<b>0,063 mm</b>	<b>SUMA</b>
<b>1</b>	<b>A1-Z1</b>	9,021	4,065	6,819	6,320	26,225
<b>2</b>	<b>A2-Z1</b>	7,305	7,574	10,770	10,501	36,150
	<b>A2-Z2</b>	5,365	5,337	8,790	9,532	29,025
	<b>A2-Z3</b>	5,401	4,438	7,649	8,437	25,925
	<b>A2-Z4</b>	6,601	5,401	9,274	9,274	30,550
<b>3</b>	<b>A3-Z1</b>	12,448	6,746	8,566	7,790	35,550
	<b>A3-Z2</b>	10,656	8,508	9,307	7,379	35,850
	<b>A3-Z3</b>	5,481	3,837	6,376	7,731	23,425
	<b>A3-Z4</b>	8,033	6,075	10,163	11,430	35,700
	<b>A3-Z5</b>	12,325	12,213	12,551	8,836	45,925
<b>4</b>	<b>A4-Z1</b>	5,400	5,982	9,139	9,028	29,550
	<b>A4-Z2</b>	9,480	5,890	8,190	8,414	31,975
	<b>A4-Z3</b>	14,581	8,674	11,117	10,177	44,550
	<b>A4-Z4</b>	15,252	9,091	10,761	9,447	44,550
<b>5</b>	<b>A5-Z1</b>	4,917	5,605	8,592	8,936	28,050
	<b>A5-Z2</b>	2,672	5,729	14,735	16,415	39,550
	<b>A5-Z3</b>	5,298	5,532	8,956	9,015	28,800
	<b>A5-Z4</b>	3,379	3,689	8,926	10,981	26,975
	<b>A5-Z5</b>	3,370	4,641	9,198	9,916	27,125
	<b>A5-Z6</b>	7,043	7,101	0,640	12,340	27,125
	<b>A5-Z7</b>	2,763	4,144	8,992	10,401	26,300
<b>6</b>	<b>A6-Z1</b>	1,775	2,451	6,931	9,918	21,075

	<b>A6-Z2</b>	1,281	2,757	8,437	12,001	24,475
<b>7</b>	<b>A7-Z1</b>	0,989	2,561	8,061	11,814	23,425
	<b>A7-Z2</b>	2,832	4,146	9,401	11,971	28,350
	<b>A7-Z3</b>	1,841	3,434	10,412	12,363	28,050
	<b>A7-Z4</b>	1,629	3,172	8,802	11,946	25,550
	<b>8</b>	<b>A8-Z1</b>	5,159	3,973	7,587	9,656
	<b>A8-Z2</b>	1,122	2,686	6,405	8,737	18,950
	<b>A8-Z3</b>	1,606	2,042	6,534	8,467	18,650
	<b>A8-Z4</b>	3,236	4,725	10,423	10,566	28,950
	<b>A8-Z5</b>	1,056	2,679	7,578	9,987	21,300

**Anexo 43.** Resultados de %MO para muestra representativa de la finca Alto Fresco.

ID USUARIO	ID LAB	%		Relación	
		C	N	C/N	MO
<b>A4 - Z1</b>	S-21-01353	9,23	0,94	9,8	13,1989
<b>A5 - Z6</b>	S-21-01354	8,37	0,78	10,7	11,9691
<b>A3 - Z1</b>	S-21-01355	6,57	0,61	10,8	9,3951
<b>A2 - Z4</b>	S-21-01356	8,76	0,83	10,6	12,5268
<b>A6 - Z2</b>	S-21-01357	9,81	1,04	9,4	14,0283

**Anexo 44.** Conductividad hidráulica para cada zona de muestreo de la finca Alto Fresco.

Área	Zona	Conductividad Hidráulica (cm/h)	Código de Permeabilidad
Área 1	1	16,116	1
Área 2	1	6,222	3
	2	5,627	3
	3	4,863	3
	4	3,641	3
Área 3	1	35,930	1
	2	22,748	1
	3	22,065	1
	4	6,873	3
	5	14,589	1
Área 4	1	11,165	2
	2	8,456	2
	3	4,710	3
	4	13,207	1
Área 5	1	10,329	2
	2	4,839	3
	3	1,680	4
	4	3,537	3
	5	5,104	3
	6	3,127	3
	7	1,431	4
Área 6	1	12,941	1
	2	10,691	2
Area7	1	19,621	1
	2	2,854	3
	3	4,662	3
	4	12,065	2
Área 8	1	16,317	1
	2	22,627	1
	3	4,582	3
	4	12,901	1

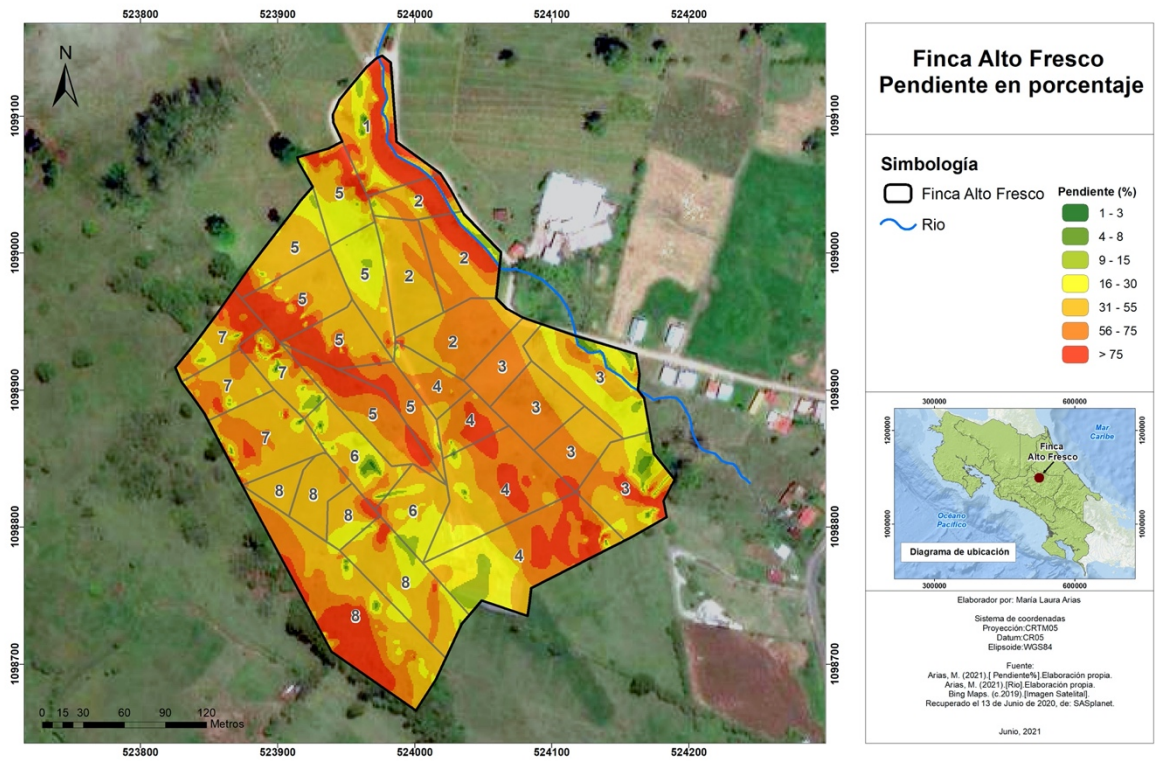
5	19,734	1
---	--------	---

**Anexo 45.** Factores empleados para la obtención de la erodabilidad en la finca Alto Fresco.

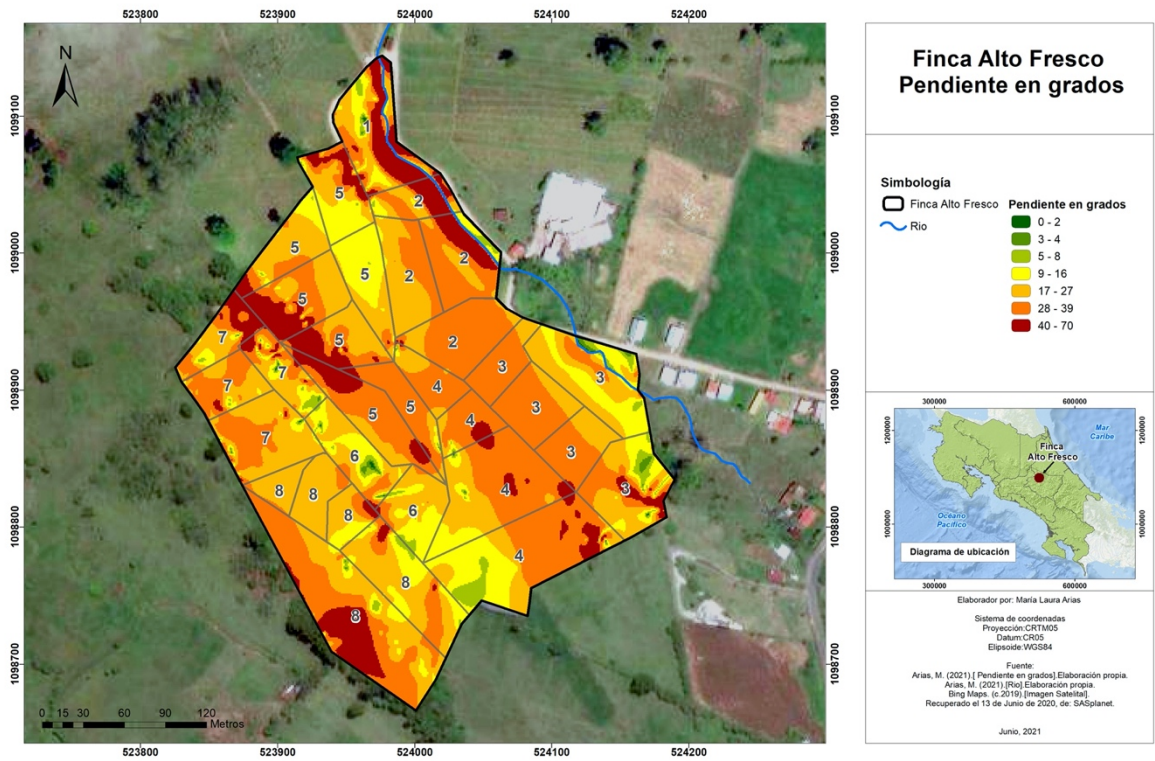
Área	Zona	Limos + Arenas muy finas	ArenasT-amf	MO	M	Estructura	Estructura	Conductividad Hidráulica cm/h	Permeabilidad	K
Área 1	1	41,1702	19,9048	4	2514,4715	Granular fina	2	16,1164	1	0,0764
Área 2	1	40,4262	25,6488	4	2671,1629	Granular gruesa	3	6,2215	3	0,1680
	2	54,2323	19,4927	4	3998,2764	Granular gruesa	3	5,6267	3	0,2471
	3	43,5873	17,4877	4	2662,0945	Granular gruesa	3	4,8631	3	0,1675
	4	51,0241	21,2759	4	3689,0429	Granular gruesa	3	3,6413	3	0,2283
Área 3	1	41,9649	27,7601	4	2926,0059	Granular gruesa	3	35,9304	1	0,1328
	2	36,1793	28,4707	4	2338,9893	Granular gruesa	3	22,7479	1	0,0990
	3	51,6064	15,6936	4	3473,1110	Granular gruesa	3	22,0647	1	0,1653
	4	42,8798	24,2702	4	2879,3758	Granular gruesa	3	6,8726	3	0,1801
	5	25,0611	37,0889	4	1557,5449	Granular gruesa	3	14,5892	1	0,0558
Área 4	1	47,1534	20,5216	4	3191,1062	Laminar	4	11,1650	2	0,2060
	2	41,6145	23,5605	4	2712,2233	Laminar	4	8,4561	2	0,1780
	3	36,1775	34,3725	4	2552,3217	Laminar	4	4,7103	3	0,1938
	4	37,5717	35,1033	4	2730,5219	Laminar	4	13,2066	1	0,1540
	1	51,8858	19,1142	4	3683,8929	Bloque	4	10,3290	2	0,2355

Área <b>5</b>	<b>2</b>	47,1149	23,1351	4	3309,8219	Granular gruesa	3	4,8390	3	0,2055
	<b>3</b>	48,1896	19,7854	4	3275,6904	Granular gruesa	3	1,6800	4	0,2285
	<b>4</b>	49,3315	15,9935	4	3222,5784	Granular gruesa	3	3,5368	3	0,2003
	<b>5</b>	50,6164	17,2086	4	3433,0553	Granular gruesa	3	5,1042	3	0,2129
	<b>6</b>	53,0401	14,7849	4	3597,4467	Granular gruesa	3	3,1268	3	0,2228
	<b>7</b>	52,6758	15,8992	4	3612,2446	Granular gruesa	3	1,4308	4	0,2486
	Área <b>6</b>	<b>1</b>	57,2676	11,1574	4	3918,5388	Granular fina	2	12,9414	1
<b>2</b>		40,3508	12,4742	4	2131,5323	Granular fina	2	10,6907	2	0,0797
Área <b>7</b>	<b>1</b>	55,6893	11,6107	4	3747,8931	Granular gruesa	3	19,6211	1	0,1818
	<b>2</b>	48,4206	16,3794	4	3137,6580	Granular gruesa	3	2,8535	3	0,1953
	<b>3</b>	51,5379	15,6871	4	3464,6340	Granular gruesa	3	4,6621	3	0,2148
	<b>4</b>	53,6212	13,6038	4	3604,6850	Granular gruesa	3	12,0652	2	0,1982
Área <b>8</b>	<b>1</b>	49,5061	16,7189	4	3278,5427	Granular fina	2	16,3174	1	0,1211
	<b>2</b>	55,9371	10,2129	4	3700,2373	Bloque	4	22,6273	1	0,2115
	<b>3</b>	53,3924	10,1826	4	3394,4201	Granular fina	2	4,5817	3	0,1780
	<b>4</b>	57,7663	18,3837	4	4398,9053	Granular fina	2	12,9012	1	0,1892
	<b>5</b>	52,3369	11,3131	4	3331,2445	Granular fina	2	19,7336	1	0,1242

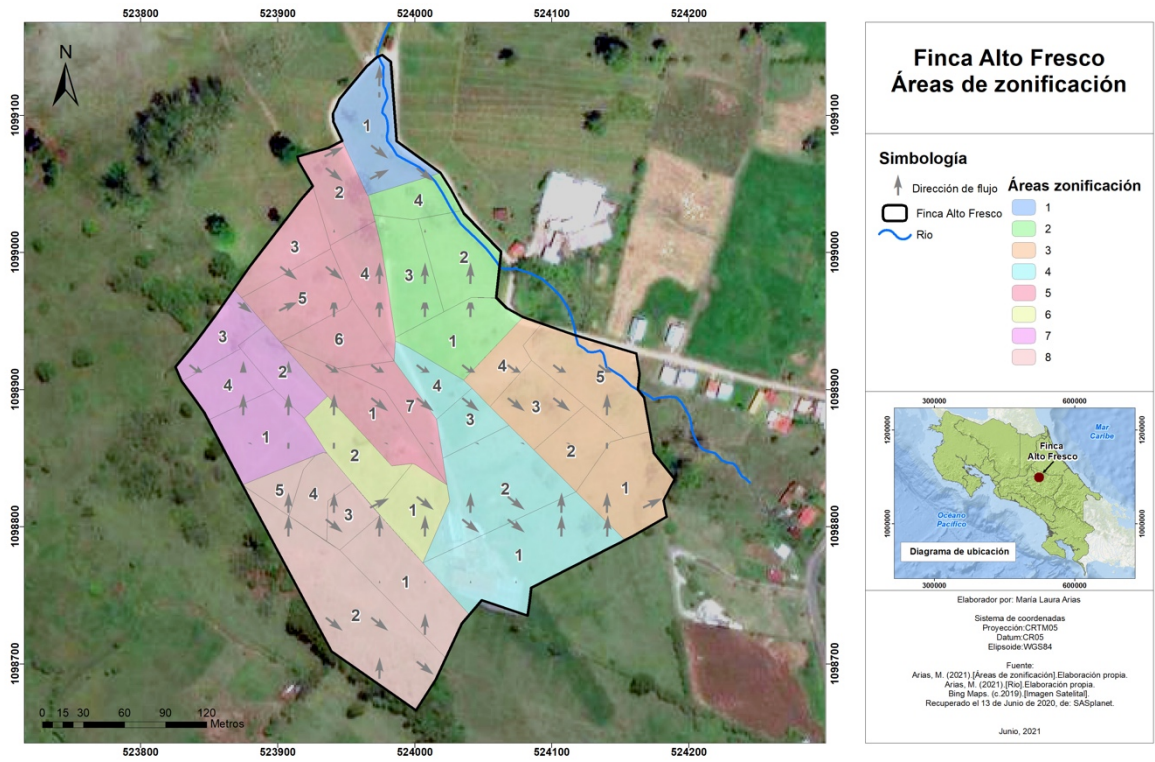
Anexo 46. Pendiente de la finca Alto Fresco en porcentaje.



Anexo 47. Pendiente de la finca Alto Fresco en grados.



**Anexo 48.** Dirección de flujo según áreas de zonificación de la finca Alto Fresco.



**Anexo 49.** Parámetros  $t^*$  y  $Re^*$  que indican estabilidad de la ladera en las zonas de estudio de la finca Alto Fresco.

Área	Zona	$t^*$	$Re^*$
1	A1-Z1	131,170546	3,99
2	A2-Z1	94,1572012	5,66
	A2-Z2	65,6674901	8,21
	A2-Z3	119,768381	3,82
	A2-Z4	70,6655006	7,79
3	A3-Z1	68,1346576	6,43
	A3-Z2	101,075241	5,15
	A3-Z3	87,7967217	6,06
	A3-Z4	89,9818021	6,06
	A3-Z5	59,5158364	3,05
4	A4-Z1	79,3565296	5,94
	A4-Z2	97,0516851	5,30
	A4-Z3	87,1845492	7,70
	A4-Z4	66,2800327	7,73
5	A5-Z1	85,6538311	7,87
	A5-Z2	67,8016658	6,65
	A5-Z3	46,3968351	4,65
	A5-Z4	46,8046743	3,73
	A5-Z5	86,4694397	6,27
	A5-Z6	87,8595458	6,32
	A5-Z7	95,5815029	6,99
6	A6-Z1	41,2740427	4,54
	A6-Z2	201,066903	0,92
7	A7-Z1	81,0138287	5,82
	A7-Z2	90,5455656	4,95
	A7-Z3	88,0956952	6,03
	A7-Z4	83,2305126	5,86
8	A8-Z1	49,5341134	4,16
	A8-Z2	93,392291	5,67
	A8-Z3	60,0869527	3,57
	A8-Z4	52,3833979	8,43
	A8-Z5	96,3140837	4,56

**Anexo 50.** Cálculo de parámetros de corte y relleno completos.

<b>Zonas</b>	<b>Pendiente ponderada</b>	<b>Área en m2</b>	<b><math>\Delta H</math></b>	<b>Área de corte m2</b>	<b>Volumen de corte m3</b>	<b>#Árboles y de terrazas</b>	<b>Área de corte total</b>	<b>Volumen de corte total</b>
<b>A1-Z1</b>	0,470	3756,41	0,235	0,059	0,059	120,414	7,076	7,076
<b>A2-Z1</b>	0,476	2911,62	0,238	0,059	0,059	93,334	5,548	5,548
<b>A2-Z2</b>	0,479	2900,97	0,240	0,060	0,060	92,992	5,568	5,568
<b>A2-Z3</b>	0,429	2722,94	0,215	0,054	0,054	87,285	4,684	4,684
<b>A2-Z4</b>	0,486	1497,45	0,243	0,061	0,061	48,002	2,916	2,916
<b>A4-Z1</b>	0,438	6284,17	0,219	0,055	0,055	201,443	11,031	11,031
<b>A4-Z2</b>	0,465	5226,14	0,232	0,058	0,058	167,527	9,729	9,729
<b>A4-Z3</b>	0,555	1395	0,277	0,069	0,069	44,718	3,101	3,101
<b>A4-Z4</b>	0,463	1409,89	0,232	0,058	0,058	45,195	2,616	2,616