

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ESTIMACIÓN DE EROSIÓN MEDIANTE DOS METODOLOGÍAS POR CAMBIOS  
DE SUPERFICIE DE CAMINOS DESCUBIERTOS EN CULTIVOS DE CAFÉ,  
CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA, COSTA RICA.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de  
Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, para optar al grado y título  
de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis  
en suelos.

DIEGO IVÁN PACHECO QUIJANO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

## DEDICATORIA

Agradezco principalmente al ser supremo, por la fortaleza física y espiritual en mis pasos.

A mis adorables padres, Samuel Elías Pacheco y Jesús Mariely Quijano por sus palabras de ánimo, amor, equilibrio y cercanía en todo momento.

A mi querido hermano Jorge Luis por sus palabras de motivación.

A mi adorada novia Alba Hernández por su apoyo en mi proyecto académico y de vida, por su lealtad y sacrificio cada día en el proceso.

A mi querida familia quienes estuvieron al tanto en cada momento.

Agradezco a mi primo Lic. Alexis Clavel Quijano por su apoyo, palabras de ánimo, fuerza espiritual y lealtad en todo momento.

A mi tío Ing. Agr. MAE Juan María Quijano, mi amigo Ing. Agr. M.Sc Rubén Eberto Solórzano (q.e.p.d) y mi amiga Julia M. Dunsmore, B.S. por el apoyo sincero en todo momento.

Agradezco a mis apreciados amigos y amigas de El Salvador, Costa Rica y del mundo, por brindarme palabras de motivación.

*“La familia campesina de mi país que, sobre sus espaldas, explotación, masacres y sueños negados, siguen siendo la fuente principal de la alimentación básica del pueblo salvadoreño”*

*Salvador Arias Peñate*

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad de Costa Rica UCR, a la comisión del posgrado, por la oportunidad que me brindaron de ser parte de una institución del pueblo.

Al equipo de Laboratorio de Recursos Naturales, CIA, por el apoyo en la investigación.

Gracias, al gobierno de Alemania y al personal del DAAD-CR por el financiamiento del proceso académico.

Al profesor, Dr. Mario Villatoro Sánchez, quien me brindó la oportunidad de desarrollar una de sus líneas de investigación. Por dedicar su tiempo, amabilidad y comprensión en todo el proceso, por haber sido tutor de proyecto y mostrarme el rigor en la investigación.

Al maestro Rafael Mata Chinchilla, quien ha brindado sabios consejos académicos y de vida, por su apoyo como lector.

También le doy las gracias profesora Karolina Villagra Mendoza del TEC (Cartago), por su apoyo como lectora de tesis, sus consejos, por su amabilidad y compromiso profesional.

A las instituciones, CADETI por su apoyo financiero para la investigación del proyecto y CIGEFI por el apoyo con los datos meteorológicos.

A Don José Jiménez (q. e. p. d) quien brindó su apertura y amabilidad para desarrollar la investigación en la finca de su familia.

Gracias al profesor Bryan Alemán por su apoyo, amabilidad, disposición en el procesamiento de datos.

También, al profesor Sergio Valverde por su apoyo, tiempo y sugerencias en el proceso.

A los profesores de cursos: M.Sc. Rafael Mata, Dra. Lidieth Uribe, Dr. Javier Monge, M.Sc. Álvaro Segura, M.Sc. Gloria Meléndez, Dr. Jorge Leiva, Dr. Luis Barboza, M.Sc. Eloy Molina, M.Sc. Jorge Wagner y Dr. Manuel Spínola.

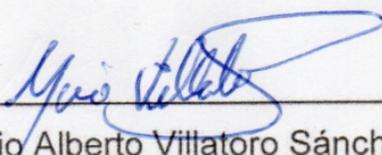
A mis amigos y compañeros, Silvia Marín, Ronald Chávez, Edgar Vindas, Pamela Zúñiga, Luis Álvarez, Virgilio Ulloa, Víctor Valembois, Oldemar Granados, Sisgo Chinchilla, Pedro Silva, Yordanys Ramos y Marisol Canales.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en suelos.



---

Dr. Carlos Henríquez Henríquez  
**Representante del Decano  
Sistema de Estudios de Posgrado**



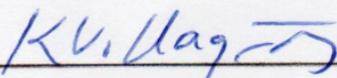
---

Dr. Mario Alberto Villatoro Sánchez  
**Director de Tesis**



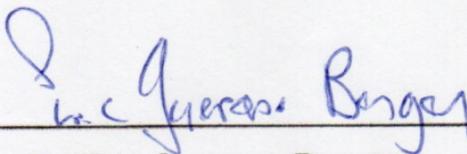
---

M.Sc. Rafael Mata Chinchilla  
**Asesor**



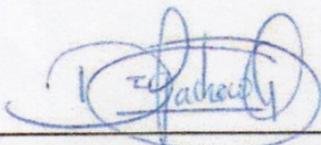
---

M.Sc. Karolina Villagra Mendoza  
**Asesora**



---

Dr. Eric Guevara Berger  
**Director de Programa de  
Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales**



---

Diego Iván Pacheco Quijano  
**Sustentante**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	iii
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	v
<b>INDICE DE CUADROS</b> .....	x
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xiii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 La erosión de los suelos a nivel global y regional .....	1
1.2 La erosión como una causa de la degradación del suelo .....	1
<b>2. Objetivo general:</b> .....	2
2.1 Objetivos específicos: .....	2
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	2
3.1 Problemática de cuencas en el mundo .....	2
3.2 Erosión a nivel de cuencas hidrográficas.....	3
3.3 Cuenca del río Jesús María .....	3
3.4 Tasas tolerables de erosión .....	4
3.5 Erosión a nivel de parcelas experimentales.....	5
3.6 Erosión en caminos .....	6
<b>4. Métodos para cuantificar la pérdida de suelo</b> .....	8
4.1 Medición de la superficie del suelo con diferentes instrumentos topográficos9	
4.1.2 Modelos de elevación digital de puntos geográficos e imágenes aéreas11	
4.2. Método de fotogrametría.....	14
4.2.1 Modelos de elevación digital de imágenes aéreas .....	15
4.3 Métodos prácticos de medición de pérdida de sedimentos .....	18
4.4 Método de trampa para sedimentos con geotextil .....	19
4.5 Método de estimación por modelo: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).....	19
<b>5. Metodología</b> .....	21
5.1 Sitio de estudio .....	21

5.2 Método de interpolación y el uso de estación total .....	24
5.2.1 Selección de secciones del camino .....	24
5.2.2 Establecimiento de puntos de control en caminos .....	24
5.2.3 Procesamiento de puntos de control y creación de MED con IDW .....	25
5.2.3.1 Resolución asignada a los MED .....	26
5.2.4 Huella de camino .....	26
5.2.5 Análisis estadístico .....	26
5.3. Método de fotogrametría .....	28
5.3.1 Plan de vuelo en caminos .....	28
5.3.2 Procesamiento de imágenes aéreas en software .....	29
5.3.2.1 Georreferenciación de puntos con imágenes aéreas .....	29
5.3.2.2 Creación de nube densa de puntos .....	30
5.3.2.3 Creación de Ortomosaico .....	30
5.3.2.4 Creación y resolución de MED .....	30
5.3.2.5 Recorte de MED por polígono .....	31
5.3.3 Análisis estadístico .....	31
5.4 Comparación entre metodologías .....	31
5.5 Medición de las precipitaciones .....	32
5.6 Guía del procesamiento de interpolación e imágenes aéreas .....	33
<b>6. Resultados</b> .....	<b>33</b>
6.1 Estimación de erosión de suelo con el uso de interpolación .....	33
6.1.1 Pérdida de suelo promedio por MED de huella de camino .....	33
6.1.1.1 Estimación cambios del suelo y variación vertical en los MED .....	34
6.3 Estimación de erosión de suelo con uso de imágenes aéreas .....	40
6.3.1 Promedios del movimiento de suelo por MED de huella por parcela ....	41
6.3.2 Pérdida de suelo estimada y cambios de superficie por cada MED .....	41
6.5 Resultados de las dos metodologías .....	48
6.6 Época y características de lluvia asociadas a los cambios del suelo .....	48
<b>7. Discusión</b> .....	<b>51</b>
7.1 Interpolación IDW .....	51
7.1.1 Movimiento del sedimento por parcelas con estación total .....	51
7.1.3 Variación espacial de los MED con estación total .....	54

7.2 Imágenes aéreas .....	54
7.2.1 Pérdida de sedimento promedio por parcelas con fotogrametría .....	55
7.2.3 Variación de píxeles de MED derivados de fotogrametría .....	57
<b>7.3 Comparación entre resultados de las dos metodologías .....</b>	<b>58</b>
7.4 Análisis del comportamiento del suelo y época de lluvia .....	58
7.4.1 Relación entre sedimento y características lluvia (estación total) .....	59
7.4.2 Relación entre sedimento y precipitaciones (imágenes aéreas).....	60
<b>7.5 Limitaciones del estudio .....</b>	<b>62</b>
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>62</b>
<b>9. Recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
<b>10. Literatura consultada: .....</b>	<b>65</b>
<b>11. Anexo I.....</b>	<b>73</b>
<b>12. Anexo II .....</b>	<b>74</b>
<b>13. Anexo III .....</b>	<b>75</b>
<b>14. Anexo IV .....</b>	<b>82</b>
<b>15. Anexo V .....</b>	<b>88</b>

## RESUMEN

La erosión es un problema que aumenta por el uso intensivo de los recursos naturales y las acciones desequilibradas del ser humano en el uso del suelo para fines agrícolas, comerciales y urbanísticos. El deterioro de los suelos es constante, el cambio por el uso y manejo inadecuado de cuencas para uso agrícola, forestal y ganadero, implica la creación de caminos agrícolas.

El estudio se realizó en la cuenca alta del río Jesús María, Alajuela. El objetivo principal de esta investigación fue estimar en caminos descubiertos que conducen por plantaciones de café, la pérdida de suelo mediante el uso de un Modelo de Elevación Digital (MED) aplicado a segmentos de caminos con pendientes de 13, 10 y 15% (parcelas 1, 2 y 3 respectivamente). Se utilizaron dos métodos: 1) Interpolación (Distancia Inversa Ponderada-IDW) a partir del levantamiento de coordenadas x, y, z de una cuadrícula de puntos mediante el uso de una estación total. Los modelos de elevación digital fueron creados y delimitados con polígono en forma de huella de camino en el área evaluada; 2) Fotogrametría con el uso de imágenes aéreas tomadas con un dron marca DJI modelo Mavic Pro Fly, los vuelos fueron configurados a una altura de 20 m sobre la superficie y se hizo levantamiento de modelos de elevación digital mediante fotogrametría. Los modelos de elevación digital obtenidos por interpolación de puntos fijos en el campo presentaron un total de pérdida de suelo de 19,79 g/m<sup>2</sup> y 8,8 g/m<sup>2</sup> en las parcelas 1 y 2 respectivamente, mientras que en la parcela-3 hubo acumulación de suelo total de 18,17 g/m<sup>2</sup>. En los resultados de estimación de superficie del suelo con interpolación, las variables sedimento con intensidad media por mes e intensidad máxima de lluvia correlacionaron positivamente con coeficientes de correlación de 0,2, y 0,3. En la parcela 1 la pérdida de suelo se incrementó de 6,13 g/m<sup>2</sup> a 11,27 g/m<sup>2</sup> presentando un 58,9% de pérdida de sedimento posiblemente a causa de un bajo crecimiento de arvenses y una mayor pendiente del suelo. A medida que los niveles de precipitación incrementaron en los meses de evaluación, los valores de acumulación de suelo en la parcela 2 (parte media del camino) y parcela 3 (parte baja del camino) también aumentaron. En los resultados obtenidos de modelos de elevación digital de imágenes aéreas, en la parcela 1 hubo una pérdida de suelo total de 22,01 g/m<sup>2</sup>, mientras que para las parcelas 2 y 3 hubo valores promedio de acumulación de suelo 83,38 g/m<sup>2</sup> y 81,28 g/m<sup>2</sup> respectivamente. Los valores de parcela 1 para modelo de elevación digital de imágenes aéreas mostraron una correlación positiva entre las variables sedimento con lámina de lluvia, intensidad media por mes e intensidad máxima de lluvia de 0,6, 0,7 y 0,4 respectivamente. Las variables de intensidad media e intensidad máxima son los que explican parcialmente el efecto de la pérdida de suelo, dando como resultado con los valores sobreestimados y más altos el método de fotogrametría comparado con estación total.

Palabras claves: erosión, suelo, sedimento, caminos, fotogrametría, interpolación.

## ABSTRACT

Soil erosion increases under intensive utilization of natural resources and destabilizing human activity in the use of soil for agriculture, commerce and urbanization. The deterioration of soils occurs when changes in land use are not done right and inadequate management of watersheds for agriculture, forestry and cattle raising result in the creation of agricultural roads.

This study was conducted in the upper watershed of the Jesus Maria River in Alajuela. The primary objective of the research was to estimate soil loss on dirt roads running through coffee plantations, using the Digital Elevation Model (DEM), applied to road segments with slopes of 13%, 10% and 15%. Two methods were applied: 1) Interpolation (Inverse Distance Weighted -IDW), by plotting x, y and z coordinates on a grid, where a topographic total station was used. The digital elevation models were created, and the evaluation areas were the roadways. 2) Aerial images took by a DJI Mavic Pro drone at 20 meters above the surface, and digital elevation models were created through photogrammetry. The digital elevation models obtained through interpolation of the fixed points on the ground estimated a total soil loss of 19,79 g/m<sup>2</sup> and 8,8 g/m<sup>2</sup> on plots 1 and 2 respectively, while plot 3 had an estimated total soil accumulation of 18,17 g/m<sup>2</sup>. Estimation results of soil surface by interpolation (sediment) versus median monthly intensity and maximum rainfall intensity had correlation coefficients of 0,2 and 0,3. In Plot 1 soil loss increased from 6,13 g/m<sup>2</sup> to 11,27 g/m<sup>2</sup>, presenting a 58,9% sediment loss due possibly to the low vegetation growth and to higher slope. As the levels of precipitation increased throughout the months of this evaluation, the values of soil accumulation in plot 2 (middle part of the dirt road), and plot 3 (low part of the dirt road) also increased. Results obtained from digital elevation models of aerial images showed a total soil loss in plot 1 of 22,01 g/m<sup>2</sup>, while plots 2 and 3 presented soil accumulation values averaging 83,38 g/m<sup>2</sup> and 81,28 g/m<sup>2</sup> respectively. The values of plot 1 on the digital elevation model of aerial images showed a positive correlation between the variables of sediment against rainwater quantity, median monthly intensity and maximum rainfall intensity of 0,6, 0,7 and 0,4 respectively.

The variables of median and maximum intensity partially explain the effect of the soil loss, which could be an overestimation and higher estimation were gotten with photogrammetry method compared with the interpolation from total station surface measures.

Key words: erosion, soil, sediment, roads, photogrammetry, interpolation

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variación de la estimación de pérdida y acumulación de suelo en g/m <sup>2</sup> por parcela en camino de cafetal mediante interpolación de levantamiento con estación total, en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.....	34
Cuadro 2. Comportamiento de la estimación de pérdida y acumulación de suelo en g/m <sup>2</sup> por parcela en camino de cafetal mediante fotogrametría, en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	41
Cuadro 3. Resultados de pérdida/ganancia de sedimentos mediante dos metodologías (estación total y fotogrametría), camino en cafetal, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	48
Cuadro 4. Variables de precipitaciones por mes en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	49
Cuadro 5. Correlación de variables sedimento y características de lluvia en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	50

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Superficie creada a partir de puntos con aplicación de IDW Tomado de: ESRI 2004.....	9
Figura 2. Cuenca del río Jesús María, sitio de estudio punto color amarillo, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	21
Figura 3. Distribución espacial de la huella de camino para la creación de superficie para los modelos de elevación digital para interpolación e imágenes aéreas, con la ubicación de parcela 1 (A), parcela 2 (B) y parcela 3 (C) Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	22
Figura 4. Creación de Modelos de Elevación Digital (MED) a partir de puntos de control e imágenes aéreas por cada mes de evaluación de caminos de cafetal en parcelas 1, 2 y 3, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ...	23
Figura 5. Medición con Estación Total (A), distanciamiento de puntos de control con cuerdas removibles (B) en caminos de cafetal, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.....	25
Figura 6. Estaciones meteorológicas Llano Brenes y San Ramón, Alajuela 2018. .	32
Figura 7. Variación espacial de la superficie de MED de huella de camino con interpolación IDW (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color amarillo acumulación de suelo, valor positivo) parcela-1 (MED de diferencias de alturas A, B y C) en caminos de acceso a cafetal en cuenca del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	35
Figura 8. Variación espacial de la superficie de MED de huella de camino con interpolación IDW (color rojo pérdida de suelo, valor negativo, y color amarillo acumulación de suelo, valor positivo) parcela-2 (MED de diferencias de alturas A, B y C) en caminos de acceso a cafetal en cuenca del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	37
Figura 9. Variación espacial de la superficie de MED de huella de camino con interpolación IDW (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color amarillo acumulación de suelo, valor positivo) parcela-3 (MED de diferencias de alturas A, B y C) en caminos de acceso a cafetal en cuenca del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	39

Figura 10. Vista aérea de ortomosaico, con plan de vuelo a 20 m y colocación de puntos de control en caminos. A la izquierda el drone modelo MavicPro, parcela 1 (A), parcela 2 (B) y parcela 3 (C), cuenca alta, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018. ....	40
Figura 11. Parcela-1 (MED de diferencias de alturas A, B y C) variación espacial de la superficie de MED de huella de camino de imágenes aéreas en (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color azul acumulación de suelo, valor positivo). Cuenca alta del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.....	43
Figura 12. Parcela-2 (MED de diferencias de alturas A, B y C) variación espacial de la superficie de MED de huella de camino de imágenes aéreas (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color azul acumulación de suelo, valor positivo). Cuenca alta del río Jesús María, San Ramón, Alajuela 2018. .	45
Figura 13. Parcela-3 (MED de diferencias de alturas A, B y C) variación espacial de la superficie de MED de huella de camino de imágenes aéreas, (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color azul acumulación de suelo, valor positivo). Cuenca alta del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

CADETI: Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras  
CIGEFI: Centro de Investigaciones Geofísicas  
CSV: Comma-Separated Values  
EUPS: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo  
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura  
GCP: Ground Control Point  
GPS: Global Positioning System  
IDW: Inverse Distance Weighting  
MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería  
MED: Modelo de Elevación Digital  
RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation  
SIG: Sistemas de Información Geográfica  
shp: Shapefile  
TLS: Terrestrial Laser Scanner  
TIN: Triangulated Irregular Network  
UAV: Unmanned Aerial Vehicle  
VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo Diego Iván Pacheco Quijano, con cédula de identidad Pasaporte B04102228, en mi condición de autor del TFG titulado Estimación de erosión mediante dos metodologías por cambios de superficie de caminos descubiertos en cultivos de café, cuenca alta río Jesús María, Costa Rica.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI  NO

\*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: \_\_\_\_\_ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Diego Iván Pacheco Quijano

Número de Carné: B-79445 Número de cédula: Pasaporte B04102228

Correo Electrónico: diego.pachecoquijano@ucr.ac.cr, f.quijano@yahoo.es

Fecha: 15 abril 2021 Número de teléfono: +50376625890

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Maño Alberto Villatoro Sánchez

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declara concuerda a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 314 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 La erosión de los suelos a nivel global y regional**

La erosión es pérdida del suelo causada por varios agentes (agua, viento o gravedad) aunado a factores como mal manejo de prácticas de cultivo, clima, relieve, manejo y densidad de siembra, grado de pendiente del suelo, tipo de suelo, cobertura vegetal, y escasez de obras de conservación entre otros (Morgan 1997, 2005). Además, hay tres procesos importantes en la erosión de los suelos: desprendimiento, transporte, y deposición los cuales ocurren por el golpeo de la gota de lluvia en la superficie y posterior transporte que remueve el suelo de manera uniforme o se concentra en cauces (Morgan 1997) o por el viento.

El suelo juega un papel importante en la vida, para la producción y abastecimiento de alimento, sin embargo, este recurso está en límites críticos lo que incrementará la pobreza de millones de personas (FAO 2015).

La erosión del suelo es un problema mundial que continúa su incremento por las prácticas actuales del hombre, fenómenos naturales y la presión por la tasa creciente de una población que alimentar. La erosión es un riesgo asociado principalmente a zonas tropicales y semiáridas, erosionando millones de toneladas por año en el mundo, lo cual traerá graves dificultades a largo plazo para la agricultura (Morgan 2005, Lal 2014).

La erosión es un tema de mucha importancia debido a que Costa Rica es un país fuertemente agrícola con 450,000 ha en producción con dominancia de cultivos agroindustriales y fruta frescas, como café, caña de azúcar, el banano y la piña con un total el 70% de tierra agrícola total (Informe Estado de la Nación 2018). Además, que sufre el impacto de los factores climáticos, que incrementan la vulnerabilidad de los productores en diferentes zonas del país.

### **1.2 La erosión como una causa de la degradación del suelo**

La erosión causa la degradación de los suelos lo cual limita la producción de cultivos, por pérdida de los nutrientes, la materia orgánica y reduciendo así su fertilidad (Hudson 1997). Todo lo anterior junto conlleva a la degradación que es el

deterioro de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, causada por erosión hídrica o eólica (MAG 1998). Cada país a nivel mundial experimenta diferentes formas de degradación y pérdida nutricional del suelo, la degradación incrementa cuando el cambio de uso del suelo es ocupado por un cultivo por primera vez (FAO 2015). Los principales problemas de la degradación por erosión es la pérdida de biodiversidad, materia orgánica, salinización, acidificación y anegamiento (FAO 2015).

## **2. Objetivo general:**

Estimar la pérdida de suelo en caminos descubiertos mediante interpolación de mediciones en cambios de superficie mediante mediciones con estación total y mediante técnica de fotogrametría.

### **2.1 Objetivos específicos:**

- Determinar la pérdida de suelo en caminos descubiertos mediante la interpolación de mediciones periódicas con uso de estación total y técnica de fotogrametría.
- Determinar la época y características de lluvia asociadas a mayor pérdida de suelo en caminos descubiertos.

## **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **3.1 Problemática de cuencas en el mundo**

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial con terrenos variables con cimas divisorias de agua, estas drenan en un mismo sitio, ocurren procesos naturales, biológicos, económicos y sociales (CADETI 2004), las aguas desembocan en un río principal, pantano, lago, embalse, marisma o en el mar (MAG 1998). Por otro lado, Hubp (2011) menciona otro concepto desde el punto de vista geomorfológico: cuenca es una depresión dimensional micro a global: hidrográfica, estructural, marina, sedimentaria, oceánica, tectónica y erosiva.

El incremento de prácticas antrópicas, y la búsqueda de condiciones socio-económicas en las cuencas han incrementado problemas como la escorrentía, la cual hace vulnerables a las cuencas, generando cárcavas y crecidas de ríos, en

partes altas y, medias de la cuenca (Rebollo y Molina 1998). Existen varias causas de afectación en las cuencas, las actividades agrícolas y pastoreo, el incremento residencial, núcleos urbanos, remoción de cubiertas vegetales, cambios de la pendiente por el arado de los terrenos (Rebollo y Molina 1998).

### **3.2 Erosión a nivel de cuencas hidrográficas**

Solano *et al.* (2010) realizaron un estudio en la cuenca del río Pirrís la cual está ocupada por bosques con 86% del área, cultivo de café y pastos. Ellos, utilizaron el modelo USLE reportando una tasa estimada de pérdida de suelo máxima de 152 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y un valor promedio de 11,6 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, estos autores concluyeron en que el método sobrestima con un 40% los valores obtenidos en comparación a parcelas experimentales establecidas en la misma cuenca. De igual manera, Palacios y Alfaro (1993) utilizaron el modelo USLE ajustando los datos necesarios para ajustar los parámetros del modelo. Este fue desarrollado en la microcuenca El Quebrada El Pital de Puriscal. Sus resultados de erosión en t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> sobrestimaron la cantidad de suelo reportado, lo cual no corresponde lo que se observó en campo. El 33% del área evaluada reportó de 400 a 800 t dominada por cultivo de café, 21% del área 200 a 400 t y 13% de área de 50 a 100 t estos autores afirman que los datos no son confiables, y que los datos mostrados son altos.

### **3.3 Cuenca del río Jesús María**

Esta cuenca es una de las cuencas del país que presenta más riesgos de pérdida de sus recursos en especial el suelo. En la vertiente del Pacífico es una de las cuencas más degradadas por el uso intensivo tanto de cultivos como de ganadería (CADETI 2004).

La cuenca presenta un potencial agrícola importante a nivel nacional con cultivos de café, árboles forestales, pastos y ganadería. En la parte alta de la cuenca del río Jesús María hay un sobre uso severo de la tierra de 35% del área y presenta un 16% de sobre uso de la tierra en toda la cuenca (CADETI 2004). El uso intensivo de agricultura convencional tiene un alto efecto ambiental y humano, por el uso excesivo de plaguicidas, generando contaminación a través de la erosión y degradación de los suelos, acumulación de residuos contaminantes y la pérdida de

diversidad biológica (Morera 2000). Además, uno de los principales problemas es la fuerte erosión de la parte alta, acumulando sedimento y causando muerte de manera descendente en áreas de manglar en la zona protectora de Tivives (CADETI 2004).

Conociendo parte de los factores que impactan directamente la cuenca, es importante mencionar que es una de las cuencas con el puntaje más alto en accesibilidad por carreteras y caminos vecinales de acuerdo a la metodología de Hojas Cartográficas a una escala de 1: 50.000 donde determinaron los puntajes altos para las cuencas (CADETI 2004).

### 3.4 Tasas tolerables de erosión

Según la FAO (1980) con el uso del mapa mundial de suelos utilizado para la creación de una metodología provisional para determinar las clases de degradación del suelo, el cual fue enfocado en las regiones de África, el norte del Ecuador y cercano al Medio Oriente a una escala de 1:5 000 000, determinaron una lista de clases de degradación de los suelos, dentro de esta lista se muestra la clase de erosión hídrica definiendo las siguientes tasas tolerables de pérdida de suelo:

Erosión hídrica	Pérdida de suelo	
	t/ha/año o mm/año	
Ninguna a ligera	<10	< 0,6
Moderada	10-50	0,6- 3,3
Alta	50-200	3,3- 13,3
Muy alta	>200	> 13,3

Fuente: (FAO 1980).

Morgan (2005) menciona que la tasa máxima de erosión tolerable que se acepta es de 11 t.ha<sup>-1</sup> para 20-25 años como media anual para mantener la fertilidad del suelo. En Europa la tasa tolerable de erosión de acuerdo a Verheijen *et al.* (2009) varía entre 0,3 a 1,4 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. Las estimaciones de erosión para su monitoreo se deben tomar en cuenta todos los tipos de erosión debido a cosecha de cultivos, labranza, nivelación de tierras o taludes (Verheijen *et al.* 2009).

En la cuenca de La Plata en Argentina, Irurtia y Maccarini (1994) utilizaron criterios para medir tasas tolerables de erosión hídrica encontrando tasas en; clase A – nula o ligera de 0 a 30 t.ha<sup>-1</sup>, con producción agrícola sin ganadería, clase B-baja 31 a 60 t.ha<sup>-1</sup>, con sistemas agrícolas específicos, clase C moderada de 61 a 120 t.ha<sup>-1</sup>, se necesita prácticas de conservación, clase D alta 121 a 360 t.ha<sup>-1</sup>, requiere rotación de cultivos y pastos, y clase E- muy alta mayor a 360 t.ha<sup>-1</sup>: susceptible a la erosión hídrica.

En Costa Rica, de acuerdo con CADETI (2004) un 58% de los suelos no estaban en riesgo de erosión, pero sí un 24% estaban establecidos de ligera a moderada erosión, mientras que un 14% estaban erosionados de manera severa, y un 3% ya no estaban para su uso por el grado de erosión presentado. La Vertiente del Pacífico es la que presenta el 53% de erosión más grave, con 30% extremadamente erosionada y 30% de ligero a moderadamente erosionado (CADETI 2004).

Las tasas tolerables erosión para Costa Rica son establecidas de acuerdo al mapa de susceptibilidad de erosión hídrica (Jeffery 1984 «citado por» Cubero 1994; Núñez 2001).

### Clases de erosión

---

Tolerable (clase 1): los índices de erosión abarcan valores de 0-10 t h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

Moderada (clase 2): Los valores erosivos se sitúan entre 10-50 t h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

Severa (clase 3): Los índices erosivos están en un ámbito de 51-200 t h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Muy severa (clase 4): los valores erosivos exceden 200 t h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

---

### 3.5 Erosión a nivel de parcelas experimentales

En estudios de erosión, pero no enfocados en caminos, se puede tener una referencia para comparar tasas bajo condiciones agrícolas las cuales por lo general estarán asociadas a caminos de movilización en la finca. Vahrson (1991) reportó tasas de erosión en dos parcelas de 2,4 y 3,2 t. ha<sup>-1</sup>. Cubero (1994) menciona que en la zona norte de Cartago los suelos son mal manejados y desprotegidos por prácticas inadecuadas, en un solo día se erosionaron 108 t. ha<sup>-1</sup> de suelo, siendo una tasa muy elevada debido a la intensidad de la lluvia y la topografía. Mehuys *et al* (2009) en labranza estimaron hasta 250 t. ha<sup>-1</sup>.pasada<sup>-1</sup> en dirección de la pendiente en parcelas en las faldas del Volcán Irazú. Molina (2015) reportó que en

microparcelas con el método de geotextil a diferentes pendientes en cultivos de café, realizado en la cuenca río Jesús María. Las áreas de muestreo las cuales fueron: Café Moderadamente Sombreado (CMS-60+A) y Café Ligeramente Sombreado (CLS-60+A), obtuvieron las tasas más altas de erosión laminar de 6,7 y 2,8 t. ha<sup>-1</sup> con una pendiente del 60% y, en los muestreos Café Ligeramente Sombreado CLS-30+AG, Café Sin Sombra CSS-30+AG, Café Sin Sombra CSS-60+AG con pendientes del 30% obtuvo una erosión laminar de 0,5 , 1 y 1,5 t. ha<sup>-1</sup>; y en la parte media de la finca evaluando surcos y cárcavas estimó 23 t. ha<sup>-1</sup>. Villatoro-Sánchez (2015) reportó a nivel de parcelas en cultivos de café en cuenca una pérdida de suelo promedio anual de 1,69, 0,91 y 0,58 t. ha<sup>-1</sup> en los años 2011 a 2013 respectivamente. En la cuenca del río Reventazón, Gómez-Delgado (2010) reportó una pérdida de suelo de 1 t. ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> en parcelas con café donde el 16% del sedimento fue a causa de las lluvias registradas.

### **3.6 Erosión en caminos**

Los caminos son una fuente de erosión importante en cuencas (Varhson 1991, Ziegler *et al.* 2004), estos pueden encontrarse desnudos o con materiales incorporados en la superficie para evitar el lavado superficial y mejorar la tracción de los vehículos sobre este. La pérdida de suelo también ocurre en caminos agrícolas y en otros componentes naturales tales como vías de paso utilizadas por personas (Hartshorn *et al.* 1982; Grigal 2000). Algunas investigaciones realizadas (Burroughs 1989;; Lang 2000; Rijdsdijk *et al.* 2007) han encontrado problemas a nivel de caminos forestales y agrícolas por efecto de la erosión. Por otro lado, en carreteras de acceso a bosque en EE.UU, en segmentos de carretera de 13 pies de ancho (3,9 m) y el tratamiento con grava tuvo 64,3 lb (29 kg) de sedimentos perdidos, mientras que el segmento sin grava reportó 312,1 lb (141,86 kg) donde el paso continuo de camiones acelera el desprendimiento de sedimentos (Burroughs y G. King. 1989). Los procesos mencionados han sido relacionados a nivel de caminos forestales y con la necesidad de profundizar en investigaciones en caminos de acceso a cultivos de café, debido a que la información es escasa (Verbist *et al* 2010; Gómez-Delgado *et al.* 2010, 2011; d'Oleire-Oltmanns *et al.* 2012; Villatoro-Sánchez 2015).

Jeffery (1989) y Bertsch (2006) mencionan que el segundo factor que impacta sobre el suelo es la inadecuada creación de caminos y carreteras. Jansson (2002) menciona que los caminos son una fuente importante de erosión en áreas de cultivos con café, caña de azúcar y pastos. Por otro lado, Varhson (1991) menciona que los caminos agrícolas juegan un papel importante en la erosión y sugiere el manejo adecuado de caminos dentro de las fincas. López (1992) infiere en su estudio en subcuenca en Guatemala, que los caminos por ser cortes y áreas expuestas son los que aportan mayor cantidad de sedimento en comparación con sus resultados en áreas bajo cultivos. Lang (2000) realizó un estudio en caminos de acceso a bosques en cuenca del río Riyito de Osa, Costa Rica, y reportó  $540 \text{ t.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  esto sin evaluar otras partes como de rutas secundarias y rutas que en años anteriores que habían sido probadas en construcción. En Honduras, se midió la pérdida de suelo en segmentos de caminos forestales incorporando materiales de protección (gravas), al evaluar los segmentos de caminos sin tratamiento dio como resultado  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  por año, y en la evaluación de caminos con tratamiento hubo una pérdida de suelo de  $2,25 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-1}$  por año (Rivera *et al.* 2009). En Tailandia, estudios en caminos y carreteras reportaron pérdida de sedimento equivalente a  $120 \text{ t.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , donde determinaron que las carreteras no cuentan con pavimento, así como el paso vehicular aceleran este proceso (Ziegler *et al.* 2004).

Los caminos a nivel de cuenca son fuente importante de la pérdida de suelo y arrastre de sedimentos (Huendo *et al.* 1996). Las cuencas hidrográficas según Ouédraogo *et al.* (2014) que son de uso agrícola intensivo modifican continuamente la superficie del suelo. De acuerdo con Gómez-Delgado *et al.* (2011) la escorrentía en caminos y zanjas deben controlarse por los sedimentos y sustancias que arrastran y que se depositan en ríos y zonas bajas de la cuenca. Gómez-Delgado (2010) menciona que se están mejorando los modelos para balances de sedimentos tomando en cuenta el aporte de erosión que ocurre en caminos. El determinar cuánto es el aporte real de sedimentos en cuenca que proviene de caminos rurales se ha vuelto una necesidad por asociarlos a una posible fuente de sedimentos a la cuenca, pero no medido en diversos estudios de erosión (Verbist *et al.* 2010, Villatoro-Sánchez 2015). También, Orndorff (2017) menciona que en cuencas hidrográficas la creación de carreteras es responsable de erosión, por muy pequeña

que sea el área, esto dependerá si es reciente o es un camino de varios años. En Jalisco, México en un estudio en caminos forestales de la cuenca El Arroyo, estimaron el volumen de sedimento con método de nivel, realizando levantamientos en un área de 762,7 ha, esta área fue la que tuvo mayor influencia hacia los caminos evaluados, que fueron 54,5 km en total. Esto mostró que en 5 años se perdieron 300 m<sup>3</sup> de suelo (Huendo *et al.* 1996). Todos los sedimentos transportados por vías de acceso a zonas de cultivo, tienen un impacto ambiental negativo en las aguas superficiales, y en la salud humana. Las vías son fundamentales para mejorar la conexión entre poblaciones. Sin embargo, se requiere de manejo adecuado de escorrentía superficial, pendiente de caminos, peraltes y cobertura de lo contrario aumenta el riesgo de erosión.

#### **4. Métodos para cuantificar la pérdida de suelo**

La pérdida superficial del suelo se puede medir en forma directa mediante la recolección de sedimentos *in situ* o de forma indirecta que es estimando su pérdida (Bannister *et al.* 1994, Balaguer 2015). Esta última se puede realizar mediante la medición del cambio en volumen de la superficie del suelo en un período determinado correspondiendo a la pérdida de suelo superficial. Hay nuevas tecnologías que han permitido detectar zonas críticas a nivel mundial mediante técnicas indirectas de medición de erosión y con esto se ha mejorado la exactitud de la información (Balaguer 2015), mediante el uso de cartografía digital, imágenes satelitales e imágenes aéreas.

En la actualidad existen técnicas muy utilizadas con sensores incorporados que permiten la adquisición de información espacial y superficial. Las técnicas se basan en imágenes aéreas con el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados o VANT, el manejo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con levantamientos en campo y los diferentes métodos de interpolación más conocidos IDW, Kriging, Spline, TIN, entre otros. Estos métodos pueden ser utilizados de manera rápida en sistemas computacionales, permitiendo visualizar en forma estimada los objetos en tres dimensiones en el espacio (Figura 1). Los métodos de imágenes aéreas y levantamientos con instrumentos de medición como estación total (topográfica)

permiten estimar el volumen mediante el cambio de las alturas de las superficies (Balaguer 2015).

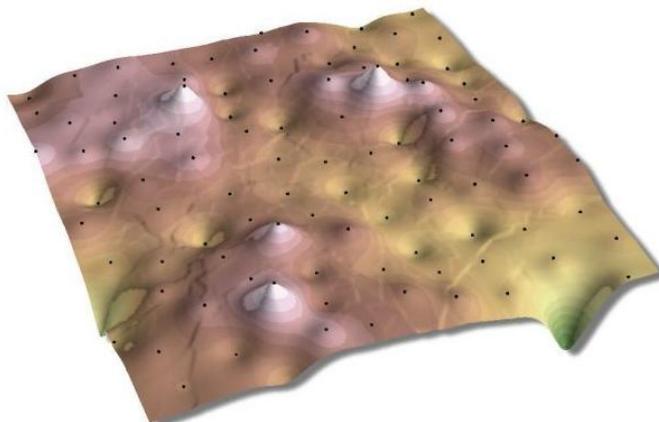


Figura 1. Superficie creada a partir de puntos con aplicación de IDW Tomado de: ESRI 2004.

#### **4.1 Medición de la superficie del suelo con diferentes instrumentos topográficos**

Las estaciones totales utilizadas en topografía son una herramienta de alta precisión útiles para lograr hacer levantamientos altimétricos. Wolf y Ghilani (2009) mencionan que la estación total ha sustituido a aparatos como el tránsito y el teodolito, esta herramienta puede medir con exactitud y rapidez las distancias y las alturas y lograr calcular y tener datos en tiempo real. Además, la estación total tiene un rango de trabajo de hasta aproximadamente 3 km de alcance (bajo condiciones óptimas) con el apoyo de un bastón con un prisma el cual refleja la señal del infrarrojo emitido por la estación (Wolf y Ghilani 2009).

Hay otros métodos sofisticados de levantamiento de superficies mejorando la precisión y la exactitud. El uso de puntos de control en tierra conocido en inglés como GCP (Ground Control Point) en superficie para imágenes aéreas, facilitan la creación de modelos de elevación más confiables a estimar el cambio de la superficie del suelo por medio de capas raster de píxeles. Los puntos de control en superficie, son de importancia para levantamientos porque brinda valores de control de z en cualquier posición de la superficie (ESRI 2004; Balaguer 2015). Sin embargo, un resultado confiable dependerá de la cantidad de información

recolectada y un procesamiento preciso en la georreferenciación. Los puntos de control (GCP) de acuerdo con Harwin *et al.* (2015) sugieren utilizar mayor cantidad de puntos, para facilitar la corrección en las imágenes aéreas. Los levantamientos pueden ser creados con paquetes de software tales como ArcGIS, QGIS, Agisoft Metashape y Agisoft Photo Scan Profesional (Balaguer 2015). En el caso de ArcGIS este ofrece análisis geoestadístico y espacial (ESRI 2004). No así, Agisoft que es un software muy utilizado, pero enfocado por su eficiencia en procesamientos fotogramétricos (Balaguer 2015).

Chekole (2014) en Suecia realizó un estudio comparativo de tres métodos que utilizaron puntos de referencia mediante una estación total modelo Leica 1201 con red de referencia de 14 puntos, sistema de posicionamiento global de alta precisión conocido por sus siglas en inglés (Global Positioning System, GPS-RTK), escáner laser terrestre conocido en inglés como TLS (Terrestrial Laser Scanner). La medición con instrumento de estación total Leica 1201 obtuvo una precisión de 1 mm de desviación estándar en sus coordenadas horizontales y verticales en sus 14 puntos georreferenciados. Mientras que las GPS-RTK obtuvieron precisión de 9 mm en horizontal y 1,5 cm en coordenada vertical, y TLS obtuvo valores de 2 mm para coordenadas horizontales y verticales. Sin embargo, hace referencia al error asociado al instrumento, centrado y satelital que ocasionó pasar de errores en mm a cm. Por último, el estudio se enfocó en medir también el tiempo de medición de los tres métodos, donde la estación total obtuvo el mayor tiempo de medición con 82 min en comparación a RTK y TLS.

Rahman *et al.* (2015) en China utilizaron métodos de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para la creación de un Mapa de Peligro de Erosión que sirvió para planificación ambiental y conservación de suelo. Este estudio se realizó en áreas potencialmente erosionables con alturas de 160 a 1610 msnm. El 68% del área se encontró entre los 150 y 450 msnm, y el 61% estaba considerado entre pendientes moderadas. Clasificaron cuatro niveles de riesgo de erosión: promedio, bajo, alto y muy alto. Ellos afirman que la cobertura vegetal contribuye a reducir la erosión por la correlación negativa presentada contra vegetación. Concluyen en que varios son los factores que influyen en la erosión como lo es el clima, la pendiente, cobertura y el uso de los suelos.

#### **4.1.2 Modelos de elevación digital de puntos geográficos e imágenes aéreas**

Para el levantamiento de MED se hace uso de interpoladores matemáticos que permiten levantar información espacial a partir de datos topográficos de puntos dispersos conocidos. Los MED sirven para representar una superficie topográfica en un momento dado de tiempo y luego poder ser comparado con otro levantamiento espacial que tuvo influencia de algún agente erosivo como la lluvia, de este modo la diferencia en superficie en 2 momentos de tiempo resulta en una estimación del cambio laminar superficial del suelo (Balaguer 2015).

Con el uso de imágenes aéreas para el procesamiento de tipo mosaico se ajustan con los puntos de control en tierra que proporcionan coordenadas geográficas precisas permitiendo la creación de capas de superficies del suelo o modelos de elevación digital corregidos tanto en medidas horizontales como verticales mejorando la exactitud de la ubicación espacial de los píxeles. Para estimar los puntos desconocidos en las imágenes, se usa interpolación. Hay dos categorías de métodos de interpolación: determinísticos y geoestadísticos. Los determinísticos pueden crear superficies a partir de los puntos utilizados, y en forma más compleja, los geoestadísticos cuantifican a partir de los puntos autocorrelación espacial (Balaguer 2015).

Hay diversos trabajos de campo en donde se han realizado levantamientos con DEM y combinaciones de diferentes interpoladores. A continuación, se mencionan algunos de estos trabajos y sus principales resultados.

Balaguer (2015) en España, evaluó la erosión hídrica en condiciones de laboratorio tras diferentes procesos de simulación de lluvia con pequeña bandeja de simulación a 1 m de altura de 68 x 75 cm la cual contenía el suelo, a una pendiente del 10%. Utilizó fotogrametría derivando Modelos Digitales de Elevación (MDE) para evaluar el sedimento por escorrentía mediante 5 evaluaciones. Estos MDE permitieron la estimación de la erosión a partir de las diferencias de elevación entre MDE obteniendo el volumen de suelo. Los resultados mostraron una sobreestimación de erosión del 18%, con la diferencia evidente entre lo recolectado en la parte baja de la bandeja y lo cuantificado con los MDE, también, mostró que los MDE estimaron erosión y deposición de sedimento, estimando un valor neto de pérdida de suelo de 720 cm<sup>3</sup>.

Por otro lado, en Bélgica Ouédraogo *et al.* (2014) investigaron en parcelas de una cuenca hidrográfica mediante dos equipos: un Leica GPS1200 con RTK y un escáner láser. En el primero obtuvieron 1098 puntos de control con un distanciamiento de 10 m entre punto en la cuadrícula. Para escaneo laser terrestre el distanciamiento entre punto fue de 20 cm. Se utilizó un avión modelo Gatewing x100 para la obtención de 790 imágenes aéreas. Los MED fueron procesados con ArcGIS para la creación de los puntos, Agisoft PhotoScan, MicMac para procesamiento de imágenes, y Trimble Gx para MED de escaneo laser terrestre a una resolución de 1 x 1 cm, y se aplicó un modelo de interpolación Kriging Ordinario a los modelos de puntos. Los MED obtenidos de escaneo laser terrestre con puntos de control obtuvieron un resultado más preciso con un error cuadrático medio bajo de 4,5 cm comparado con los otros MED que se evaluaron con imágenes aéreas obtuvieron valores con MicMac y Agisoft con 9 y 13,9 cm respectivamente. El error cuadrático medio aumentó al no colocar los puntos de control correctamente en las imágenes aéreas (Valverde *et al.* 2017).

Pavlova (2017) en Rusia utilizó modelos de elevación digital o capas raster mediante de puntos de referencia con el software ArcGIS 10. Usó varios modelos de interpolación entre ellos IDW (Inverse distance weighting), Kriging Ordinario, el Kriging Exponencial, el TIN (Triangulated irregular network) y Spline). De esos métodos el IDW es el más sencillo, donde se promedian con las coordenadas de Z conociendo los coeficientes de peso ponderado de acuerdo a los puntos cercanos. En sus resultados mostraron que las áreas planas tuvieron mejor precisión en comparación con áreas de mayor pendiente. Estos modelos de elevación al interpolar con IDW proporcionaron errores mínimos, donde los errores medios, errores cuadráticos y desviaciones estándar fueron menores de 0,03 m en áreas planas y 0,04 m áreas de pendiente.

Xía *et al.* (2018) en China incorporaron un factor flexible para aumentar la precisión de IDW, donde hace referencia que la precisión del interpolador dependerá de la frecuencia del muestreo debido a que es un método de interpolación que utiliza conjuntos de puntos cercanos. Los puntos no conocidos dependerán de la distancia entre los puntos conocidos brindando así un peso a los

valores. Los puntos interpolados obtienen mayor peso mientras más cerca este por su similitud.

La ecuación se representa de la siguiente manera:

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad \begin{array}{l} d_i \neq 0 \\ d_i = 0 \end{array} \quad (1)$$

donde

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2)$$

y

$$\lambda_i = d_i^{-\rho} \quad (3)$$

De este modo,  $Z(x, y)$  son los puntos desconocidos,  $(x, y)$  representa la coordenada del punto,  $(x_i, y_i)$  representa el valor del atributo del punto de muestra  $i$ -ésima cuya coordenada es  $(x_i, y_i)$ .  $d_i$  es la distancia entre el punto  $(x, y)$  y el punto  $(x_i, y_i)$ .  $\lambda_i$  es el peso del punto  $(x_i, y_i)$  que afecta al punto  $(x, y)$ .  $n$  es el número de puntos conocidos. El valor de  $\rho$  es el número de potencia del interpolador y siempre es un número positivo. Mientras mayor sea la potencia mayor será el peso de los valores de los puntos cercanos (Ibitoye 2017).

Para el uso de mapas de propiedades del suelo, Kravchenko (2003) evaluó tres métodos de interpolación IDW, Kriging Ordinario y Krigin Lognormal para ver cuál de estos era más adecuado para el mapeo de las propiedades del suelo como materia orgánica, textura de suelo, y el muestreo de Nitrógeno (N) y Potasio (K). Esto se realizó en campos agrícolas y se aplicó potencias a IDW 1, 2, 3 y 4. Los tres métodos mejoraron significativamente la precisión por los valores de exponentes elegidos. En sus resultados menciona que el interpolador con potencia de 4 obtiene mayor precisión, el IDW funcionó mejor con potencia de 1 cuando el coeficiente de variación fue alto lo cual significa que el uso de promedio es casi igual de efectivo.

El estudio de Setianto y Triandini (2015) realizado en Japón, compararon ventajas y desventajas de análisis de lineamiento de los métodos de interpolación con IDW y Kriging para la creación de modelos de elevación digital para el mapeo de zonas de alta erosión. Para los MED utilizaron un tamaño de pixel de 30 m<sup>2</sup> (5,5 x 5,5 m aprox). En sus resultados menciona que ambos métodos son muy similares, donde IDW posee un procedimiento mucho más simple que Kriging. Los dos métodos son útiles, pero dependerá de la variación espacial en que se utilicen y el tipo de muestreo.

#### **4.2. Método de fotogrametría**

La fotogrametría se define “como la ciencia, el arte y la tecnología para obtener información confiable a partir de fotografías” (Wolf y Ghilani 2009) y funciona como el método de determinar el tamaño, forma y posición de los objetos (Bannister *et al.* 1994). Es utilizada para levantamientos de superficies como terrenos y caminos (Wolf y Brinker 2000, Neugirg *et al.* 2016). Permite llegar a un análisis completo y detallado de elementos territoriales con medidas de precisión de imágenes, la cual se traduce en rapidez, ahorro de tiempo y bajo costo (Balaguer 2015) con la posibilidad de corregir errores sin regresar al terreno (Peña-Benjamín, 2010).

En los últimos años, se han desarrollado herramientas tecnológicas innovadoras enfocadas en la cuantificación de pérdida de suelo, una de estas es la fotogrametría (Ouédraogo *et al.* 2014; Balaguer 2015,) que permite generar modelos de elevación digital predictivos o estimaciones sobre la erosión de suelos en el mundo.

La aplicación de fotogrametría en las últimas dos décadas ha presentado un desarrollo acelerado por la facilidad de manejo de programas de computación modernos (Fawcett *et al.* 2019) generando datos de una manera eficiente (Aguilar *et al.* 2009). Además, el uso de vehículos aéreos no tripulados -VANT- (conocido en inglés como UAV, unmanned aerial vehicle) que generan información eficiente para estimar en forma temporal la pérdida de suelo mediante fotogrametría (d'Oleire-Oltmanns *et al.* 2012; Neugirg *et al.* 2016; Moreno *et al.* 2017). El VANT toma mayor fuerza por los expertos en suelos, como una herramienta que sirve para determinar los cambios de la superficie del suelo, el cual crea los MED que permiten mayor calidad de los datos para cuantificar el volumen de suelo perdido (Eltner *et al.* 2015).

#### 4.2.1 Modelos de elevación digital de imágenes aéreas

El implementar un MED en imágenes aéreas para tener resultados confiables dependerá del muestreo, el control geodésico, el método de procesamiento, la precisión de levantamiento de los puntos, la resolución de las imágenes aéreas y la interpolación aplicada (Williams 2012).

El uso de MED a partir de imágenes aéreas fue usado por Zhang *et al.* (2019) en China donde evaluaron el comportamiento de erosión vial en dos pequeñas cuencas hidrográficas en caminos sin pavimentar. Para ellos utilizó imágenes aéreas para evaluar factores geomorfológicos que afectan la erosión. Se registraron fuertes tormentas en el año 2017 de hasta 212 mm en un día. Los caminos sin pavimentar tuvieron valores altos de densidad aparente de  $1,4 \text{ g/cm}^3$ . Ellos utilizaron MED con una resolución de pixel de 5 m ( $25 \text{ m}^2$ ) para generar mapas topográficos, y uso de imágenes aéreas para crear MED a una resolución de 0,19 m y así evaluar la erosión en caminos secundarios de la cuenca. En sus resultados con el uso de MED estimaron una pérdida de suelo promedio de  $471,78 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  en caminos secundarios sin pavimentar.

Gillan *et al.* (2017) en Estados Unidos utilizaron modelos de elevación de terreno en tierras comparados con telémetro laser incorporado a una “viga metálica suspendida aproximadamente a 1,5 m sobre el suelo usando trípodes a cada lado como soporte”, y a eso le llaman “puente de erosión” método tradicional que mide superficie del suelo, para evaluar los cambios de la superficie del suelo, se usó clavos permanentes en el suelo como base de los soportes laterales. También, se utilizó estación total modelo Leica TS02 para obtención de los puntos en área plana de desierto. Además, utilizaron 20 imágenes aéreas por punto con altura de vuelo de 152 m para 47 parcelas en los años 2014 y 2015. Los modelos de elevación contaron con una resolución de 5 cm ( $25 \text{ cm}^2/\text{pixel}$ ). Evaluaron la precisión comparando los datos de elevación de modelos de elevación de terreno y con el puente de erosión (viga suspendida) en 30 segmentos de 6,1 m. El resultado en la precisión de los modelos de elevación de terreno comparado con el método de puente de erosión mostró que el error cuadrático medio fue alto (2,9 cm y 3,2 cm en los años 2014 y 2015) con el uso del puente de erosión. El modelo de elevación de terreno obtuvo un error cuadrático medio en precisión vertical de 2,8 cm.

Concluyeron que el uso de imágenes aéreas facilitó la visión sinóptica del movimiento del suelo de procesos de erosión y deposición, esto permitió que sea mejor que el método de puente de erosión.

Neugirg *et al.* (2016) utilizaron MED de imágenes aéreas para cuantificar erosión en cuenca mediante MED con puntos georreferenciados, en un área de 125,000 m<sup>2</sup>, en sus resultados presentaron valores de erosión de 7500 m<sup>3</sup> y deposición de suelo de 2500 m<sup>3</sup> en un año con suelos expuestos, los MED estimaron resultados de erosión en un área de 17,900 m<sup>2</sup> y deposición de sedimento en un área de 4,400 m<sup>2</sup>.

En España, Eltner *et al.* (2016) midieron los cambios del suelo mediante MED en paisaje de margas de 20 x 30 m, utilizando un vehículo aéreo no tripulado modelo Asctec Falcon 8 y escaneo laser terrestre modelo Riegl LMSZ420i, para ello utilizaron un total de 160 imágenes aéreas, a una altura de vuelo de entre 8 y 12 m, datos que fueron procesados mediante el software Pix4D especial para fotografías, los MED finales fueron filtrados a 1 cm/pixel. Sus resultados mostraron que la fusión desarrollada entre mediciones de vehículos aéreos y escáner terrestre permite la estimación de puntos con datos confiables por cada conjunto de datos. Los MED sirven para detectar errores sistemáticos de escaneo laser y la rugosidad de superficie como parámetro principal para la confiabilidad de puntos de escaneo laser. Este estudio reveló que el escaneo laser es difícil de aplicar a estudios a parcelas de campo. Los autores sugieren que se hagan otras investigaciones enfocándose en mejorar el filtrado de vegetación y mejorar la confiabilidad de los errores.

Peter *et al.* (2014) evaluaron la pérdida de suelo con MED de VANT a una resolución de 1,5 cm/pixel en cauces y quebradas en cuenca hidrográfica en un área de 869 m<sup>2</sup> donde hubo una pérdida de sedimento con un valor de 48,6 g/m<sup>2</sup> en tierras con influencia de nivelación, y mediante datos de MED en un solo evento de lluvia provocó una pérdida de suelo de 720 m<sup>3</sup> lo equivalente a 0,10 g/m<sup>2</sup>. Cuando la influencia de nivelación del suelo fue baja, sus valores pérdida de suelo fueron más bajos entre 9,5 g/m<sup>2</sup> y 23,7 g/m<sup>2</sup>.

En Alemania, Rock *et al.* (2012) evaluaron el potencial de los modelos de elevación digital mediante vehículos aéreos no tripulados (Avión MAVinci Sirius I) y

puntos de control por herramientas topográficas (estación total), GPS y Light Detection and Ranging (LIDAR) esta última herramienta inició ensayos altimétricos en la década de los años 60, pero para los años 80 con estudios volumétricos, y atmosféricos (Albacete 2011). Este estudio implementó el método de imágenes aéreas utilizando 1042 puntos de control en superficie usando tres conjuntos de datos en un campo para prueba que contenía zonas planas, zonas con escombros y zonas empinadas. Los puntos de control fueron diseñados para que estos se visualizaran a través de las fotografías y fueron medidos por estación total modelo Topcon GPT9000a. Para determinar la precisión de los MED, compararon las alturas de los tres conjuntos de datos, los pixeles y los puntos de control o referencia, los residuos de los MED se calculó la desviación estándar y el error cuadrático medio. Los resultados determinaron que a menor altura de los vuelos y más puntos de control mejoró la precisión del sensor utilizado. La precisión de los MED se tuvo mayor influencia asociada a errores por la altura de los vuelos, esto determinado por el parámetro utilizado (altura de vuelo)  $Z_{s1}$  en el diagrama de desviación y error cuadrático. Además, concluyeron que se debe tener modelos de elevación de alta resolución, mejorar las condiciones del sitio de estudio y tomar en cuenta la susceptibilidad de variables como las sombras en el sitio de estudio.

En Marruecos d'Oleire-Oltmanns *et al.* (2012) realizaron un mapeo de evaluación de la erosión de suelo en un barranco, una cuenca y bajo uso específico de tierra, mediante imágenes aéreas con el drone Sirius I MAVinci con cámara de 12 MP y vuelos a 85 m sobre el área, y establecieron 80 puntos de control en tierra tomados mediante estación total. Sus resultados muestran que las fotografías aéreas y puntos de control obtuvieron valores precisos de manera horizontal con error cuadrático medio de 0,009 a 0,027 m y vertical con un error de 0,007 m. Además, el segundo conjunto de imágenes aéreas se realizó a una altura de vuelo de 400 m, con una baja resolución de imagen inferior de 10 cm de acuerdo a la altura utilizada, y no utilizó puntos de control debido a que el área era muy grande, el resultado de utilizar solo imágenes aéreas generó errores de 0,09 a 0,3 m de forma vertical y de valores horizontales de 0,3 a 0,8 m.

### 4.3 Métodos prácticos de medición de pérdida de sedimentos

Los métodos prácticos de medición de pérdidas de sedimentos consisten en hacer estimaciones de campo en forma rápida y práctica. Huendo *et al.* (1996) midieron el volumen de pérdida de suelo mediante el uso de un odómetro de rueda con el cual midieron el largo (longitud), ancho y altura de zanja en camino, afirmando que los caminos son fuentes de erosión. Otro método es medir el grosor del horizonte A y de este se calcula la cantidad de suelo perdido en  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ , multiplicando la densidad aparente del suelo por el grosor del suelo perdido y área total (Núñez 2001). Otro método utilizado es el uso de colectores que atrapan la escorrentía superficial y el sedimento al final de las parcelas bajo diferentes usos de suelo. Además, menciona el método de varillas graduadas las cuales se entierran y se mide la distancia desde el extremo superior de la varilla con respecto al nivel del suelo (Núñez 2001) este método registra el nivel de la superficie del suelo mediante la exposición superficial de la varilla, la cual puede ser de madera, hierro u otros materiales resistentes al clima (Hudson 1997).

Las parcelas experimentales son un instrumento fundamental que proporciona el espacio para la escorrentía superficial y el desplazamiento del sedimento en una superficie en campo de dimensiones conocidas, permitiendo conocer características topográficas, edáficas y morfológicas (De Alba *et al.* 2002). Existen diferentes diseños para implementar y evaluar el comportamiento del suelo y la escorrentía a nivel de parcelas. Los métodos más conocidos son bordes que limitan la entrada y salida de escorrentía en las parcelas y el sedimento es recolectado en depósitos al extremo de las mismas, y en ocasiones se complementan con simuladores de lluvia cuando son diseños pequeños (Hudson 1997). De acuerdo con De Alba *et al.* (2002) estas parcelas pueden brindar el volumen de sedimentos de la superficie y el volumen de suelo perdido puede ser expresado por unidad de área y tiempo abreviando con  $kg.m^2.año^{-1}$ .

Peranich (2005) en Estados Unidos evaluó 4 segmentos de caminos rurales sin pavimentar, construidos con capas de gravas en la cuenca de Stillwater Creek. Utilizó estación de recolección o atrape de sedimentos al final de cada segmento de camino. Luego el sedimento fue pesado y secado a  $105^{\circ}C$  durante 72 horas. Los

resultados que mostró que la erosión total acumulada en el período de evaluación en los segmentos fue de 5340, 5900, 6880, 14250 kg/ha.

Ziegler *et al* (2004) en Tailandia, evaluaron caminos y carreteras no pavimentados en cuenca Pang Khum de 93,7 ha, los caminos tuvieron distancias de 50 m. Midieron características físicas del suelo; conductividad hidráulica, densidad aparente, resistencia a la penetración, sedimento suspendido en salida de cuenca, el registro de tránsito de vehículos, dimensiones de surcos, quebradas, profundidad de sedimento, y colocación de 6 estaciones meteorológicas. En los resultados en valores acumulativos mostraron una pérdida de sedimento de 120 t. ha<sup>-1</sup>.

#### **4.4 Método de trampa para sedimentos con geotextil**

Los geotextiles son tejidos de fibras naturales o materiales sintéticos que tienen una permeabilidad variable de acuerdo al tipo. Estos contribuyen en el control de salida de sedimentos por su instalación en pendientes sin cobertura aunado al efecto de la lluvia, viento y escorrentía superficial (Rickson 2006). En un estudio realizado por Álvarez-Mozos *et al.* (2014) evaluaron el uso de diferentes tipos de geotextiles (manta de fibra de coco, malla de yute y geomalla sintética), donde la geomalla tuvo el mejor comportamiento en la reducción de la pérdida de suelo con una efectividad de 76% con pendientes de 45° y 60°.

#### **4.5 Método de estimación por modelo: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) o USLE (en inglés -Universal Soil Loss Equation) es uno de los modelos más utilizados y conocidos a nivel mundial. Ha sido calibrada principalmente para zonas del Oeste de los Estados Unidos (Wischmeier 1976, Núñez 2001). La ecuación UEPS (versión original) tiene como función principal estimar la pérdida de suelo anual, no así los sedimentos que han sido erosionados y depositados en otras áreas (Núñez 2001). Puede ser utilizada para estimar anualmente la pérdida de suelo en cuencas y laderas. La ecuación es principalmente utilizada para pérdidas de suelo promedio a lo largo de

un año y puede utilizarse en zonas que no tengan cultivo como lo proponen Wischmeier y Smith (1978) y FAO (1980):

Su fórmula es:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (4)$$

Donde A es pérdida de suelo calculado por unidad de área o superficie en ( $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ), R= factor de erosividad de lluvia ( $MJ \cdot mm / ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ), K= factor de erodabilidad del suelo ( $t \cdot ha \cdot MJ \cdot mm / ha$ ), L= longitud de la pendiente e inclinación y corresponde a 22,1 m de largo, S= factor inclinación de la pendiente estándar del 9% , C= factor de cobertura y manejo, P= factor de soporte de obras de conservación de suelo. Las precisiones del modelo varían cuando los datos de lluvias son tomados a corto plazo de manera específica, no así para los promedios a largo plazo, que tiende a ser más preciso (Wischmeier y Smith 1978). Ambos métodos han sido diseñados para calcular y predecir la pérdida de suelo promedio por año (Renard *et al.* 1997).

Los métodos más conocidos en el mundo han sido el USLE y RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), pero estos han experimentado cambios en el tiempo para mejorar sus estimaciones en la cuantificación de la pérdida de suelo a datos diarios como es el caso de la RUSLE. Según Calvo-Alvarado *et al.* (2014) los modelos USLE y RUSLE necesitan datos de lluvias muy detallados para calcular factores de estos métodos. Foster *et al.* (2003) menciona que RUSLE2 es la versión mejorada de RUSLE1 esta versión estima la distribución de sedimentos y tamaños de partículas en áreas bajas donde se depositan, mejorando así las limitaciones de las otras versiones del modelo. Esta versión es moderna y con mayor potencia de predicción de erosión (Foster *et al.* 2003).

## 5. Metodología

### 5.1 Sitio de estudio

El estudio se realizó en la finca de Don José Jiménez (q. e. p. d.), esta finca presenta altas pendientes de más del 20% en las parcelas y caminos de hasta 15%, con clima tropical lluvioso, dominancia de cultivo de café principalmente y en asocio con árboles frutales. Él ofreció además gran apertura a colaborar, lo cual no fue lo común en la mayoría de las fincas visitadas. Otra ventaja del sitio es que contaba con estación meteorológica utilizada en otra investigación y los datos fueron compartidos.

La cuenca alta del Río Jesús María está ubicada en las coordenadas geográficas 10,004937 N y 84,468833 O en la provincia de Alajuela con una extensión de 352,8 km<sup>2</sup>, colindante con las cuencas del Río Barranca y Río Tárcoles expandiéndose entre Puntarenas y Alajuela (CADETI 2004). Este estudio se realizó en la parte alta de la cuenca (punto amarillo) a 1259 msnm utilizando 3 segmentos de caminos en acceso a finca con cultivo de café (Figura 2).

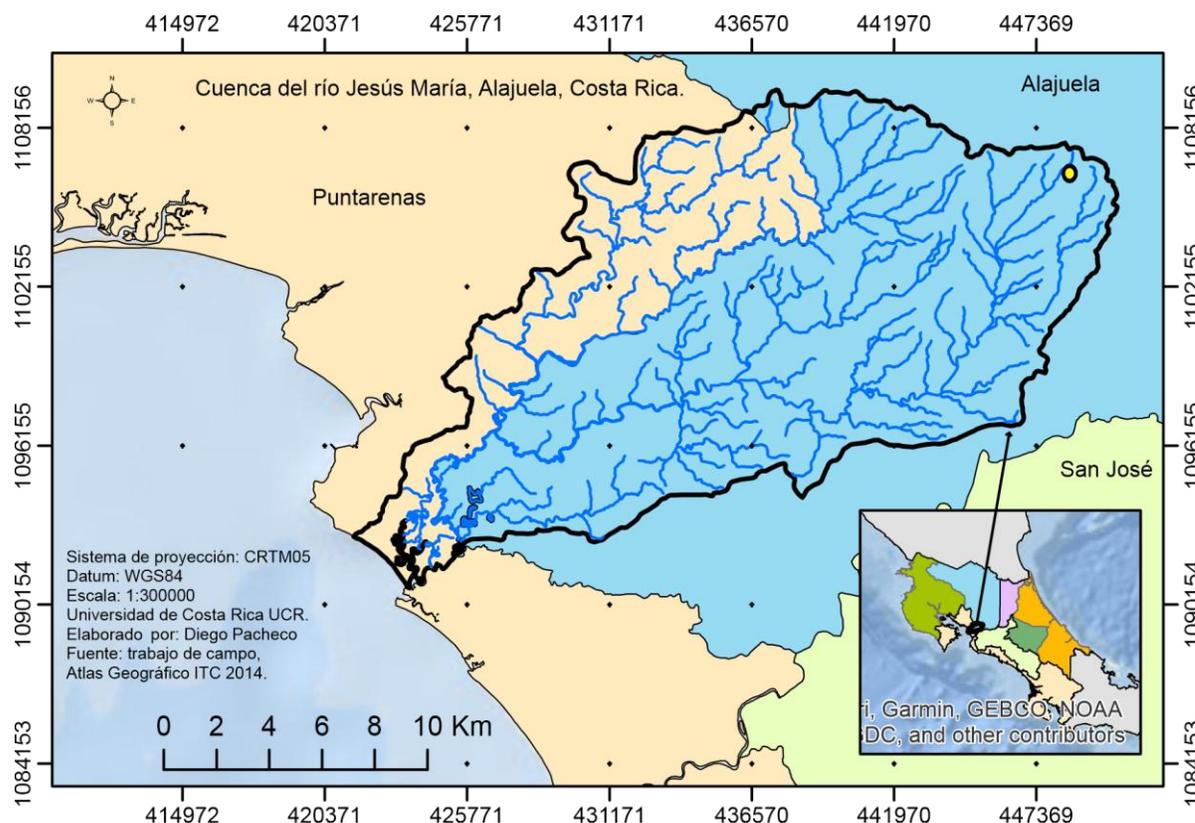


Figura 2. Cuenca del río Jesús María, sitio de estudio punto color amarillo, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

El camino fue delimitado en tres diferentes áreas, para parcela 1 contó con un área de 6 m de largo, parcela 2 y 3 un área de 12 m de largo respectivamente. Se ubicaron con orientación hacia la pendiente, parcela 1 parte alta y con una pendiente del 13%, parcela 2 parte media del camino, y parcela 3 parte baja del camino con 15% de pendiente (Figura 3).

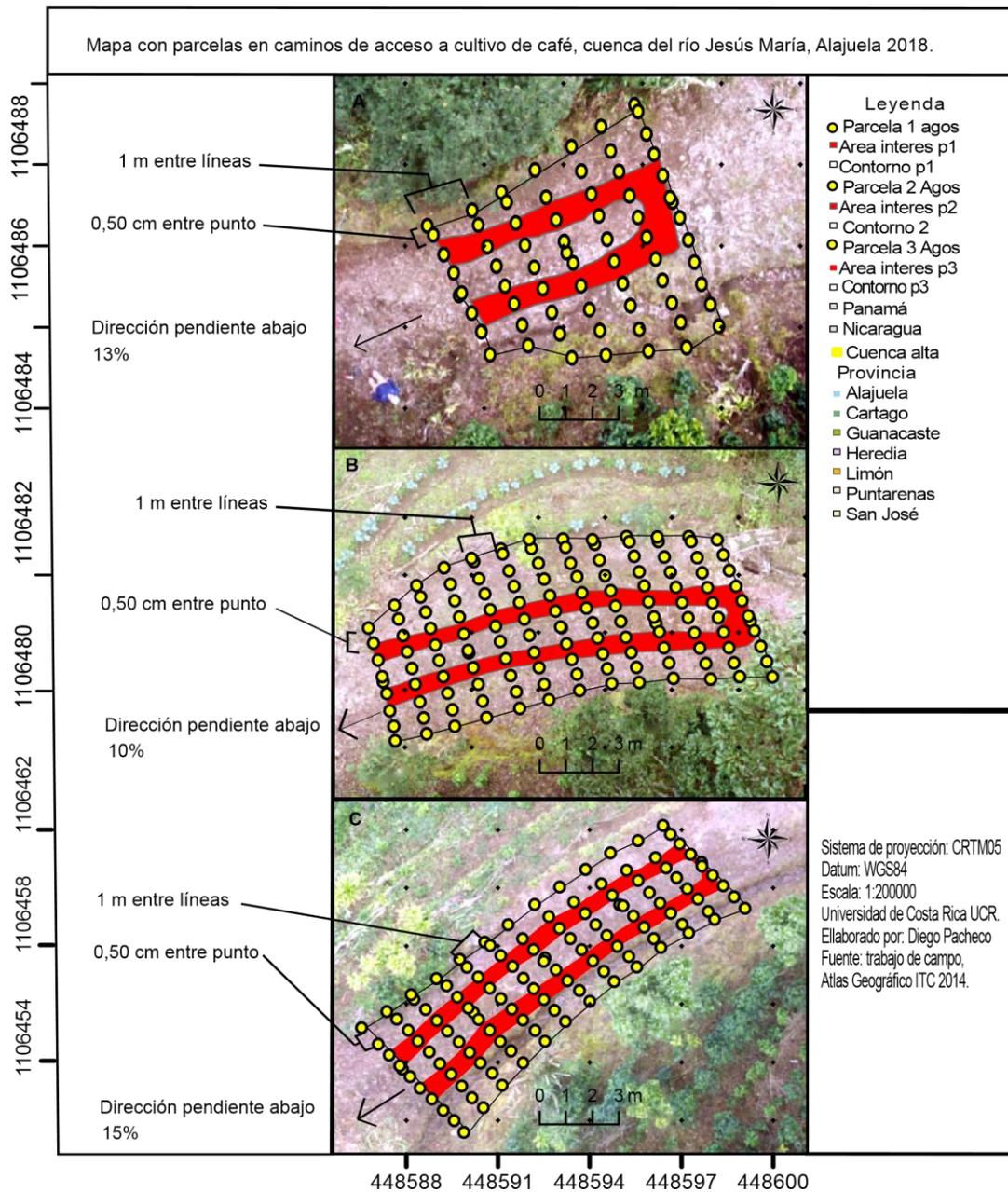


Figura 3. Distribución espacial de la huella de camino para la creación de superficie para los modelos de elevación digital para interpolación e imágenes aéreas, con la ubicación de parcela 1 (A), parcela 2 (B) y parcela 3 (C) Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

La creación de los modelos de elevación digital fue a partir de la información espacial de puntos de control en superficie con estación total e imágenes aéreas de dron. De los dos conjuntos de datos se crearon 4 MED por parcela (1, 2 y 3), obteniendo un total de 12 MED para estación total y 12 MED para fotogrametría por los 4 meses de evaluación de agosto a noviembre del año 2018 (Figura 4).

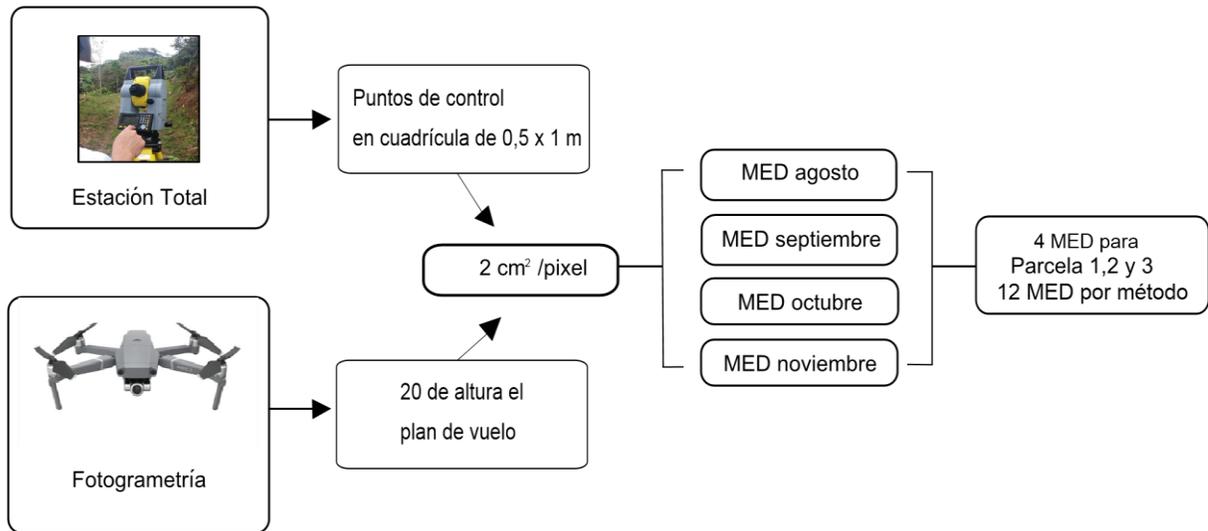


Figura 4. Creación de Modelos de Elevación Digital (MED) a partir de puntos de control e imágenes aéreas por cada mes de evaluación de caminos de cafetal en parcelas 1, 2 y 3, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

## **5.2 Método de interpolación y el uso de estación total**

Se utilizó una estación total modelo GeoMax Zipp 10R Pro con la cual se obtuvo mediciones de las coordenadas X (longitud), Y (latitud) y Z (altitud) (Figura 5A), con amarre a un mismo punto de referencia (marcado en el terreno) en cada una de las evaluaciones mensuales y se establecieron los puntos específicos mediante una cuadrícula (con cuerda) para la parcela 1 (6 m de largo y 100 cm x 0,50 cm) y para las parcelas 2 y 3 (12 m de largo y 100 cm x 0,50 cm). La cuerda removible sirvió para no obstruir el paso vehicular durante los meses de evaluación en los caminos, lo cual fue una condición del dueño, que se pudiera transitar. Los puntos entre la cuadrícula (específicamente en los vértices de medición son los puntos color amarillo por cruce de cuerdas) se utilizó el bastón con prisma receptor de láser para la toma de datos de ubicación espacial en los 3 ejes (X, Y, Z) (Figura 5B).

### **5.2.1 Selección de secciones del camino**

Los segmentos en caminos fueron seleccionados y medidos con cinta métrica en posición horizontal, y se colocaron varillas metálicas de 40 cm de altura (incrustadas en el suelo dejando expuesto aproximadamente 10 cm) como punto de referencia para cada metro de distancia lateral a ambos lados del camino. Estas permanecieron durante toda la evaluación de agosto a noviembre con marca color naranja y una bandera (Figura 5B). Estas varillas se colocaron a los bordes de los caminos seleccionados para evitar pérdida de la referencia. También, sirvieron como punto de anclaje para la cuerda removible cuando se tomó lectura de datos.

### **5.2.2 Establecimiento de puntos de control en caminos**

La toma de puntos por cada parcela para los meses de agosto a noviembre tardó un tiempo de 1 hora 30 min aproximadamente. Estos puntos se repitieron cada mes con el apoyo de varillas y cuerda removible, distribuyéndose hacia la pendiente 1 m entre líneas y 50 cm entre punto. Además, en el registro de datos digitales para prevenir las variaciones por los errores sistemáticos del equipo al estimar las coordenadas X y Y, solo se actualizaron los valores de Z en cada medición mensual, respetando las mismas coordenadas de X y Y (tomadas desde la primera vez) para todos los demás meses. En la parcela-1 se midieron 70 puntos debido a que hubo

pérdida de puntos en imágenes aéreas por presencia de rama de un árbol y un desfase ligero del vuelo. En la parcela 2 se midieron 120 puntos y en la parcela 3 se midió 119 puntos. Se usaron como punto de referencia los puntos del primer muestreo que fue en agosto 2018 para las 3 parcelas manteniendo la misma cantidad de puntos con sus respectivas coordenadas en el mismo lugar.

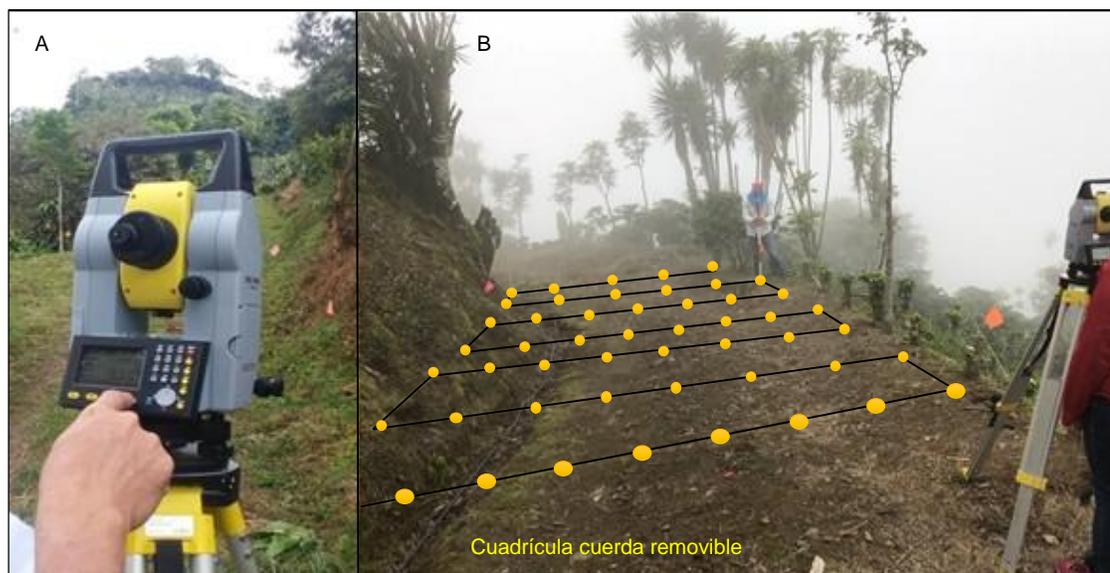


Figura 5. Medición con Estación Total (A), distanciamiento de puntos de control con cuerdas removibles (B) en caminos de cafetal, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

### 5.2.3 Procesamiento de puntos de control y creación de MED con IDW

Los puntos de control fueron procesados mediante el software ArcGIS 10.7. Los puntos de control se guardaron en formato “txt” y luego en formato “csv” (comma-separated values) cargados en excel y luego pasados a formato “shapefile”. Una vez convertido en formato shapefile, se utilizó la caja de herramienta del programa ArcGIS, utilizando el interpolador IDW y sus diferentes opciones de editar. Los modelos de elevación digital se obtuvieron a través de puntos muestreados (Setianto y Triandini 2015). Los MED -Modelo Elevación Digital- fueron restados mes contra mes anterior (septiembre-agosto, octubre-septiembre, noviembre-octubre, utilizando el MED final y el MED inicial (Balaguer 2015; Neugirg *et al.* 2016), con el uso de la herramienta “raster calculator” en el software estimando la erosión mensual (en volumen) por diferencia de altura (d’Oleire-Oltmanns *et al.* 2012; Ayeni

y Samuel 2014), estimando los valores positivos (acumulación de suelo) y negativos (pérdida de suelo) mediante los MED (Balaguer 2015) (ver anexo I).

### **5.2.3.1 Resolución asignada a los MED**

Los modelos de elevación digital fueron procesados con la interpolación y posteriormente creados con una resolución de pixel de 2 cm/pixel (4 cm<sup>2</sup> cada pixel) para todos los MED. Esto permitió tener información muy detallada del cambio volumétrico (Williams 2012) de cada celda de la superficie evaluada en el periodo de agosto a noviembre. Cada pixel tiene información tridimensional (superficie y altura), se determinó el cambio del valor de Z, el cual se usó para interpolar la información de las alturas (Ayeni y Samuel 2014) de la superficie del suelo en todos los MED.

### **5.2.4 Huella de camino**

El área seleccionada fue el recorte con polígono a mano alzada con ArcGIS 10.7 a las parcelas 1, 2, y 3, cuya área fue siempre la misma en las evaluaciones. Se delimitó solo el área de huella donde marca las ruedas por el paso de vehículos. Esto permitió tener un área donde la maleza tenía muy bajo o nulo crecimiento, lo cual ayudó a minimizar cualquier error por superficies de camino erróneas al ser una hoja.

### **5.2.5 Análisis estadístico**

Las mediciones de puntos de control en caminos fueron interpoladas mediante métodos espaciales utilizando algoritmos integrados en el software ArcGIS 10.7 como lo es IDW (Inversal Distance Weighting) y el Kriging. La interpolación de IDW es uno de los métodos más populares y utilizados (Bhargava *et al.* 2018), al igual que Kriging, utilizados en estudios para evaluación del suelo (Xia *et al.* 2018). El interpolador IDW trabaja a partir de puntos conocidos, y el peso generado a los puntos dependerá de la distancia entre los puntos (Balaguer 2015; Xia *et al.* 2018). El interpolador IDW permite conocer alturas de puntos desconocidos generando un promedio ponderado a través de los puntos cercanos (Bhargava *et al.* 2018).

Las fórmulas utilizadas a partir del procesamiento y resta de los modelos de elevación digital (Bannister *et al.* 1998 «citado por» Williams 2012; Balaguer 2015) fueron las siguientes:

$$\text{“MED final”} - \text{“MED inicial”} = \text{MED de Diferencias} \quad (5)$$

Una vez que se obtuvo el MED de diferencias de restas, se aplicó el método de “zonal statistic” en ArcGIS obteniéndose valores estadísticos de mínimos, máximos, sumatoria de píxeles que cubren el área, desviación estándar, y la media para cada MED. Al obtener el valor de sumatoria de píxeles que cubrieron el área, se convierte en volumen por la comparación (suma o resta) de dos superficies (Balaguer 2015; Neugirg *et al.* 2016). Se usó la siguiente fórmula para determinar el volumen de suelo:

$$\frac{\text{MED}}{100} * 4 = V \quad (6)$$

MED es el modelo de elevación resultado de la resta de Ecu 5, con valores de pérdida o ganancia de altura de píxeles, 100 es el factor para asegurar el resultado en centímetros, 4 cm<sup>2</sup> es el valor del píxel asignado en este trabajo, V se obtuvo de la suma total de volumen de suelo por píxeles. También, puede expresarse MED\*0,0004 cm/píxel. Posteriormente se utilizó la densidad de suelo de los caminos evaluados.

Para determinar la masa de suelo a partir de información de MED se calculó con la densidad aparente del suelo, muestras obtenidas físicamente por parcela, y la sumatoria de volumen de todos los píxeles (Balaguer 2015), en el área estimada (huella) mediante la siguiente fórmula:

$$M = \rho * V \quad (7)$$

Donde  $M$  es el valor de masa en g,  $\rho$  es la densidad aparente del suelo en g-cm<sup>-3</sup> y  $V$  el volumen de suelo en cm<sup>3</sup>.

Para la obtención de los datos de pérdida y acumulación de suelo en las parcelas, en cada uno de los meses, la precipitación Lámina (mm), Total tiempo lluvia min, Intensidad media mensual (mm), Intensidad media 30 min, Intensidad máxima (mm/h) se correlacionó entre ambas variables, comparando precipitaciones contra el cambio del volumen de suelo en el tiempo de evaluación.

### **5.3. Método de fotogrametría**

El proceso fotogramétrico según Balaguer (2015) consiste en tres etapas importantes: adquisición de imágenes aéreas, interpretación, medición y reconstrucción del objeto. Adquisición de imágenes dependerá de la calidad luminosidad, sensor y procesamiento. En interpretación identifica brillo y color de los objetos. Las mediciones están basadas en la reconstrucción tridimensional.

En fotogrametría se utilizaron imágenes aéreas tomadas por el Vehículos Aéreos no Tripulados -VANT- y con esta información se hicieron modelos de elevación digital en las áreas de los caminos estudiados de acceso a cafetal. La construcción de los MED se hizo mediante el agrupamiento de todas las imágenes aéreas formando un mosaico con puntos georreferenciados para el amarre de las imágenes y así posteriormente obtener una superficie en 3 dimensiones -3D.

#### **5.3.1 Plan de vuelo en caminos**

Los vuelos se realizaron a baja altura con un VANT (DJ Mavic Pro Fly) el cual tiene integrada una cámara de 4K y estabilizador de imagen de 3 ejes, con un sensor CMOS de  $\frac{1}{2}$  y, captura imágenes de 12.1 megapíxeles. El plan de vuelo fue creado mediante el programa "Drone Deploy". El plan de vuelo fue programado para repetirlo cada mes (agosto a noviembre), la altura del vuelo se definió a 20 m porque era un área pequeña para tener mayor detalle de la superficie, en caso de ser un área más grande el vuelo debió ser a mayor altura (d'Oleire-Oltmanns *et al.* 2012).

#### **5.3.2 Toma de imágenes aéreas en caminos**

Se obtuvieron imágenes en ordenamiento tipo mosaico de los caminos evaluados, que posteriormente fueron analizadas por el software Agisoft Metashape 1.5, el cual permite obtener Modelos de Elevación Digital (MED). La información que

proporcionan las imágenes es necesaria para la estimación de la superficie del suelo, el cual permite tener datos precisos de elevación por cada uno de los píxeles (Eltner *et al.* 2015).

Para las parcelas 1 y 2 se realizó un solo vuelo donde se obtuvo una total de 38 imágenes aéreas por vuelo. En la parcela 3 se obtuvo un total de 30 imágenes aéreas en cada mes de evaluación.

El levantamiento de imágenes aéreas se realizó aproximadamente cada 30 días en época de lluvia (agosto-noviembre). Además, se utilizaron cuadros de colores (dianas) para colocarlos en las varillas metálicas para identificar mejor los puntos de corrección para la georreferenciación de las imágenes aéreas. Se respetó el cuadro de referencia (diana) en el mismo lugar o punto para todos los meses de evaluación.

### **5.3.2 Procesamiento de imágenes aéreas en software**

Los MED fueron utilizados para determinar la pérdida de suelo restando las capas raster obtenidas tal y como lo hicieron (Neugirg *et al.* 2016) en cada una de las evaluaciones. Es importante mencionar que cada uno de los píxeles que conforman los raster tienen la información de altitud (Balaguer 2015) en cada una de las evaluaciones, de esa manera se podrán realizar las comparaciones temporales (Eltner y Schneider 2015) en cambios en altura de superficie.

#### **5.3.2.1 Georreferenciación de puntos con imágenes aéreas**

Las imágenes fueron georreferenciadas entre 10 a 15 puntos de control según el área de la parcela con coordenadas geográficas (Bannister *et al.* 1994) X, Y, y Z establecidas desde un principio y usadas por la misma estación total para el amarre inicial. Se utilizaron los mismos puntos para cada parcela (Balaguer 2015), cada imagen aérea mostró todos los puntos asignados para todos los meses de evaluación, esto sirvió para tener los MED bien referenciados (Rock *et al.* 2012), que deben encajar con la ubicación de las coordenadas terrestres. Eso se realizó para todos los modelos de elevación digital resultantes de todos los conjuntos de imágenes aéreas tomadas en los caminos.

Los principales procesos son orientación y georreferenciación de imágenes, nube de puntos, malla, ortomosaico, MED; el proceso que mayor tiempo tarda en el procesamiento fue la nube de puntos que es el punto de partida para los demás procesos.

#### **5.3.2.2 Creación de nube densa de puntos**

Se creó la nube de puntos densa que tomó entre 2 y 3 horas de procesamiento en el computador. Este proceso permitió mejorar la calidad de los MED. La nube de puntos es la que brindó la salida de los demás procesos como son: modelos de elevación digital y ortomosaicos. En el procesamiento se eliminaron imágenes aéreas que tenían baja resolución debido al movimiento ejercido en el vuelo del drone. Además, en el proceso de creación de la nube se definió en calidad alta, debido a que no fue necesario colocar resolución extra alta en el flujo de trabajo del software.

#### **5.3.2.3 Creación de Ortomosaico**

La creación del ortomosaico sirvió para observar los límites y con buen detalle las marcas de cuadrículas en superficie. Este modelo se exportó en formato TIFF el cual puede ser visualizado por varios programas cartográficos como ArcGIS, QGIS y Agisoft, con el fin de tener un producto de referencia para la búsqueda de dianas en la superficie.

#### **5.3.2.4 Creación y resolución de MED**

Los MED se crearon a una resolución al igual que interpolación esto con el objetivo de brindar mejor precisión al MED, resolución que brinda mayor detalle de superficies y la creación de MED a diferentes resoluciones (Marzoff y Poesen 2009; Eltner 2015; Stöcker *et al.* 2015). Este tamaño fue el mismo para todos los MED exportados a través del Agisoft y al mismo tiempo comparables con el proceso de uso de estación total. Los MED se exportaron en blanco y negro. El MED se exportó en formato TIFF con preferencia de exportar con formato de altura -Z, y se convierte en una capa raster (Rock *et al.* 2012), por su forma de pixeles verticales y

horizontales, una vez creados son exportados para ser procesado por el software ArcGIS (ver anexo II).

### **5.3.2.5 Recorte de MED por polígono**

Los MED obtenidos en los meses de evaluación con Agisoft, fueron delimitados con polígonos el mismo utilizado en interpolación, correspondientes al área de huella de camino de esta forma ser comparables con más facilidad. Esto se realizó para las tres parcelas. El software ArcGIS lee el formato TIFF de los MED de Agisoft lo cual facilitó el manejo de la información, debido a que en Agisoft no tiene algunas funciones de editar (resta entre capas, creación de polígonos, manejo de color) como las tiene ArcGIS. Estos MED fueron restados mes contra mes, septiembre-agosto, octubre-septiembre y noviembre-octubre (ver anexo II).

### **5.3.3 Análisis estadístico**

A todos los MED se les aplicó la herramienta “Zonal Statistic” para determinar los valores de área, desviación estándar, promedios, mínimos y máximos de cada MED (Balaguer 2015), (ver anexo II). A los MED de imágenes aéreas se les aplicó las mismas ecuaciones 5, 6 y 7 mencionadas en el apartado 5.2.5 del método de interpolación. Además, se determinó la correlación entre características mensuales (intensidad máxima, intensidad promedio, lámina acumulada y duración acumulada de lluvia) de los eventos de lluvia y la erosión estimada por las dos metodologías utilizadas.

## **5.4 Comparación entre metodologías**

Para ello se aplicó el coeficiente de correlación de *Pearson* el cual mide el grado de asociación o relación que se encuentra entre dos variables aleatorias, su objetivo es medir el grado o fuerza entre las dos variables cuantitativas (Betancur y González 2007). La correlación se realizó a los valores resultantes de las dos metodologías estación total y fotogrametría creando la suma total de los valores que corresponden a pérdida y ganancia de suelo por cada parcela del periodo de evaluación de agosto a noviembre de 2018.

## 5.5 Medición de las precipitaciones

Las lluvias fueron medidas con una estación meteorológica Modelo Vantage Pro2 (Equipo de la Universidad de Costa Rica) instalada al costado este de la parcela 3 aproximadamente 10 m, el registro de grabado fue cada 20 min. Los registros de lluvia acumulada se resumieron por mes, así mismo se obtuvieron los valores máximos para agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2018.

Se utilizaron datos de precipitaciones de la estación pluviométrica instalada en sede de Universidad de Costa Rica, en San Ramón (Figura 6). Esto para comparar y rellenar datos faltantes en estación de Llano Brenes. El método utilizado para rellenar los datos de precipitaciones faltantes fue el ajuste de curva de doble masa, este método consistió en estimar la homogeneidad de los valores para evitar variaciones en los lapsos de registros de lluvia (Carrera-Villacr es *et al.* 2016). Para esto se utilizaron los ejes de las abscisas valores totales de una estaci3n y el eje ordenadas de una estaci3n como patr3n de consistencia (UNESCO 1982). Por lo tanto, si los puntos en la línea de tendencia no muestran variaci3n de los valores significa que la estaci3n base es consistente (UNESCO 1982). Por lo tanto, solo se utilizaron dos estaciones por la limitante presentada de no contar con otras fuentes de informaci3n. En los valores presentados se logr3 una curva homogénea y consistente entre los valores de precipitaciones de las dos estaciones utilizadas.

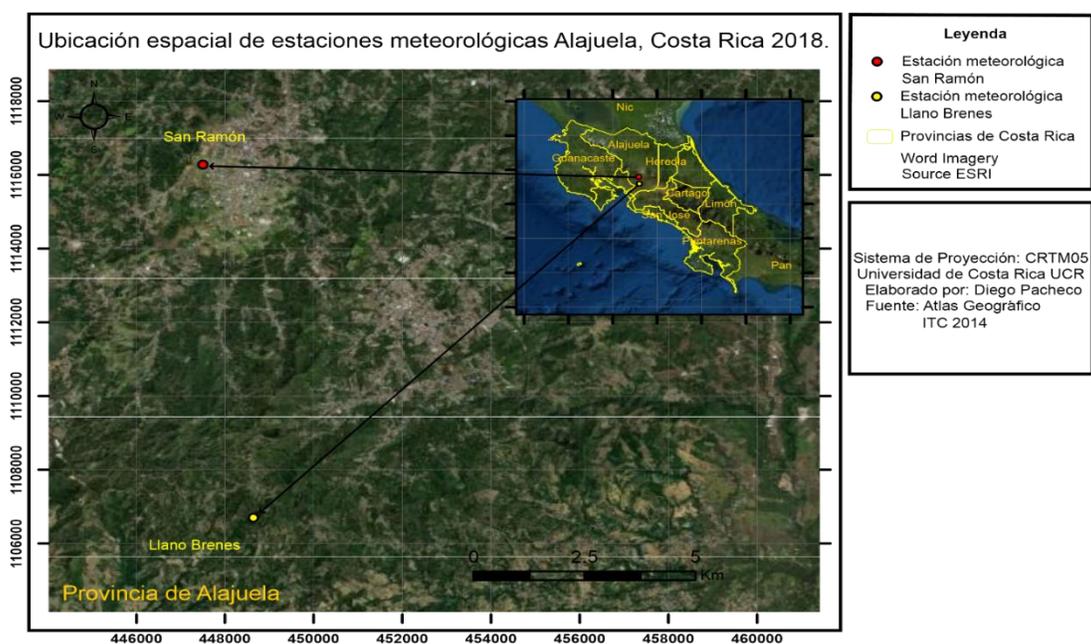


Figura 6. Estaciones meteorol3gicas Llano Brenes y San Ram3n, Alajuela 2018.

## **5.6 Guía del procesamiento de interpolación e imágenes aéreas**

El flujo de trabajo fue una guía importante de los pasos que se siguieron durante el estudio en el proceso computacional. El flujo permitió visualizar los pasos más importantes que fueron repetidos para cada mes de evaluación. Esto garantizó que los procesos fueran iguales para observar el comportamiento del suelo a través de los modelos de elevación digital y aplicación estadística como los pasos finales del flujo de trabajo (ver anexo III y IV).

## **6. Resultados**

### **6.1 Estimación de erosión de suelo con el uso de interpolación**

La creación de superficies de caminos basado en modelos de elevación digital interpolados a una resolución de pixel de (2 cm<sup>2</sup>/pixel o 4 cm), permitió obtener resultados a través de estos MED, estos indicaron cambios en la superficie de los caminos descubiertos con valores tanto positivos (acumulación de suelo) como negativos (pérdida de suelo) (Williams 2012; Balaguer 2015).

Los levantamientos de las superficies de las parcelas permitieron realizar varios análisis. En primer lugar, los promedios de pérdida y ganancia de suelo por huella de paso en cada una de las parcelas. Además, se logró determinar la relación de características de la lluvia mensual con respecto a la pérdida o ganancia de suelo en cada una de las dos estimaciones de pérdida de suelo. Los cambios numéricos estimados de valores de pérdida y acumulación de sedimento se observan en el Cuadro 1.

#### **6.1.1 Pérdida de suelo promedio por MED de huella de camino**

En el MED de la huella de camino de la parcela-1 hubo un promedio de pérdida de suelo 6,60 g/m<sup>2</sup>, en la parcela-2 se midió un promedio de pérdida de suelo de -2,73 g/m<sup>2</sup>, y en la huella de camino de la parcela-3 hubo un promedio de acumulación de suelo 6,06 g/m<sup>2</sup> (Cuadro 1). Los promedios son el resultado de los tres modelos de elevación digital (cada mes) de huella de camino de cada parcela evaluada. Además, se presentan la suma de valores de pérdida y ganancia de suelo por parcela total y sus respectivos promedios en el periodo de evaluación de agosto a noviembre (Cuadro 1). Las estimaciones de cambios de superficie de suelo son

dadas por volumen de suelo, el ajuste a masa de suelo pérdida se realizó con una corrección de la densidad aparente del suelo (1,12, 1,33 y 1,26 g/cm<sup>3</sup> para parcelas 1, 2 y 3 respectivamente).

Cuadro 1. Variación de la estimación de pérdida y acumulación de suelo en g/m<sup>2</sup> por parcela en camino de cafetal mediante interpolación de levantamiento con estación total, en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

Parcela	Promedio (g/m <sup>2</sup> )	Desviación estándar	Total en g/m <sup>2</sup>
1	-6,60	1,53	-19,79
2	-2,73	0,42	-8,18
3	6,06	1,96	18,17
Promedio	-1,09	1,30	-3,27

valor negativo: pérdida de suelo

valor positivo: acumulación

total en g/m<sup>2</sup> por parcela

#### 6.1.1.1 Estimación cambios del suelo y variación vertical en los MED

Las parcelas-1 y 2 presentaron erosión en todos los MED de huellas de camino mientras que la parcela-3 obtuvo más bien valor de acumulación de sedimentos.

Para el MED de huella de camino de la parcela-1 se presentó un valor de pérdida de suelo para todos los meses, en agosto-septiembre 6,13 g/m<sup>2</sup>, septiembre-octubre hubo 2,39 g/m<sup>2</sup>, octubre-noviembre 11,27 g/m<sup>2</sup> (Figura 7, A, B, C).

El movimiento de la pérdida de suelo se muestra con el color rojo en huella de camino y color amarillo denota la acumulación de suelo para los tres MED (Figuras 6,7 y 8). En el MED de huella de camino para parcela-1, el color rojo tiene un valor mínimo de pérdida de suelo de 8,91 g/m<sup>2</sup> y color amarillo muestra acumulación de suelo de 1,18 g/m<sup>2</sup> (Figura 7).

La variación de los MED de huella de camino en la parcela-1 para agosto-septiembre presentó en sus pixeles dominancia por la pérdida de suelo, en la parte superior central es donde denota los pixeles más fuertes en color rojo, es la zona donde evidenció fuertemente pérdida de suelo. En el caso de septiembre-octubre hubo más pixeles de pérdida de suelo en la parte media superior derecho. El color amarillo se presentó en pequeños círculos en los 3 MEDs y en la parte superior derecha cercano a la pendiente (octubre-noviembre) se registró mayor contenido de pixeles de acumulación de suelo (Figura 7).

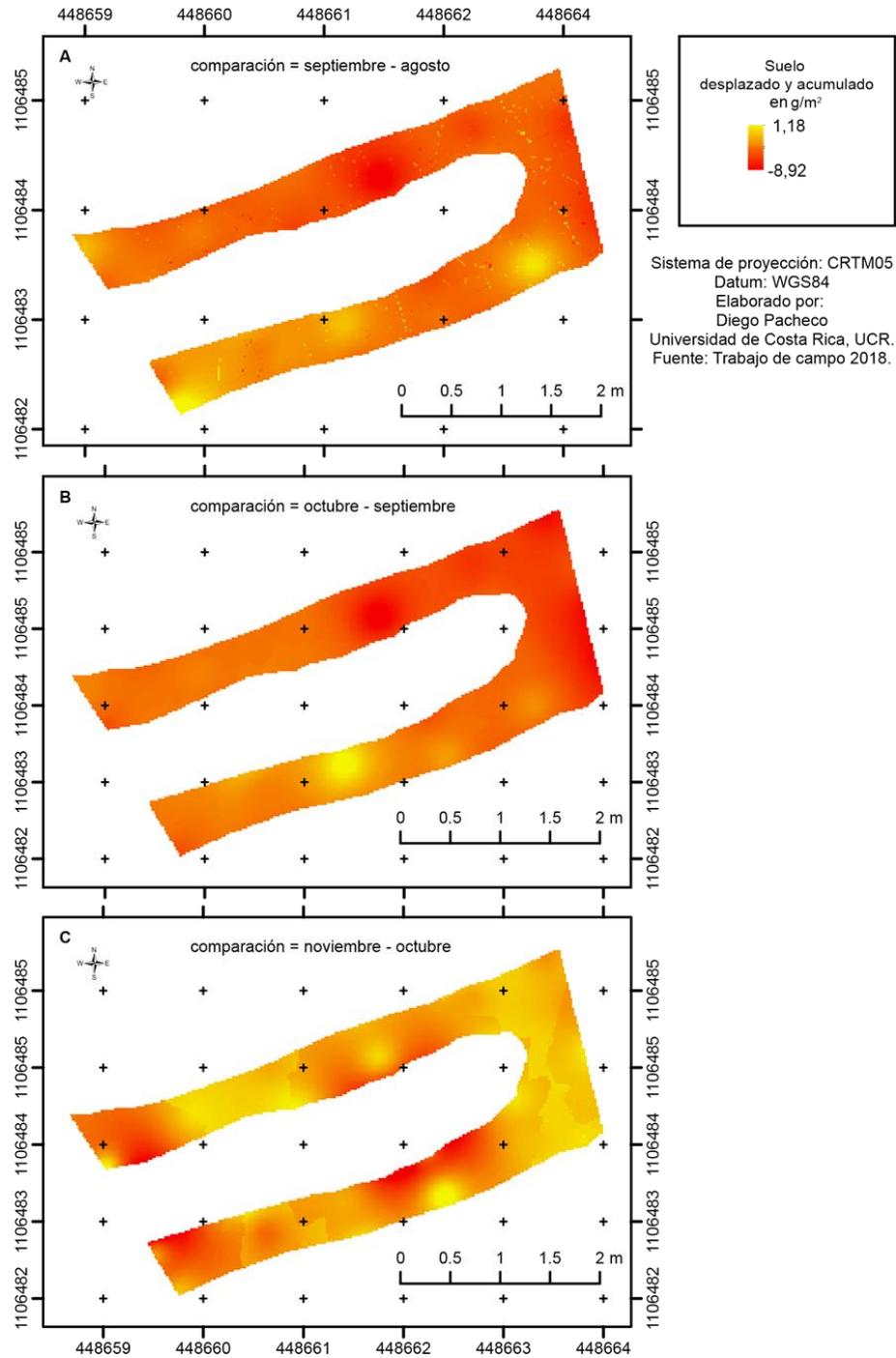


Figura 7. Variación espacial de la superficie de MED de huella de camino con interpolación IDW (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color amarillo acumulación de suelo, valor positivo) parcela-1 (MED de diferencias de alturas A, B y C) en caminos de acceso a cafetal en cuenca del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

El MED de huella de caminos para parcela-2 presentó pérdida de suelo en el período de agosto-septiembre con un valor de  $5,8 \text{ g/m}^2$ , octubre-septiembre hubo pérdida de suelo en de  $1,29 \text{ g/m}^2$ , en el período de noviembre-octubre presentó pérdida de suelo de  $-1,13 \text{ g/m}^2$  (Figura 8, A, B, C).

La parcela-2 mostró un comportamiento del movimiento del suelo en color rojo un valor mínimo de pérdida de suelo de  $2,91 \text{ g/m}^2$  y color amarillo una acumulación de suelo máximo de  $2,20 \text{ g/m}^2$  (Figura 8).

El comportamiento de los MED de huella de camino para parcela-2 agosto-septiembre la mayoría de los pixeles hubo una pérdida de suelo, en la parte inferior izquierda (zona baja) presentó mínima cantidad de pixeles de acumulación de suelo. El MED de septiembre-octubre tendió a incrementar la cantidad de pixeles de acumulación de suelo en la parte superior. El MED octubre-noviembre con un círculo en la parte superior derecha muestra pixeles de acumulación en menor cantidad en comparación a agosto-septiembre (Figura 8).

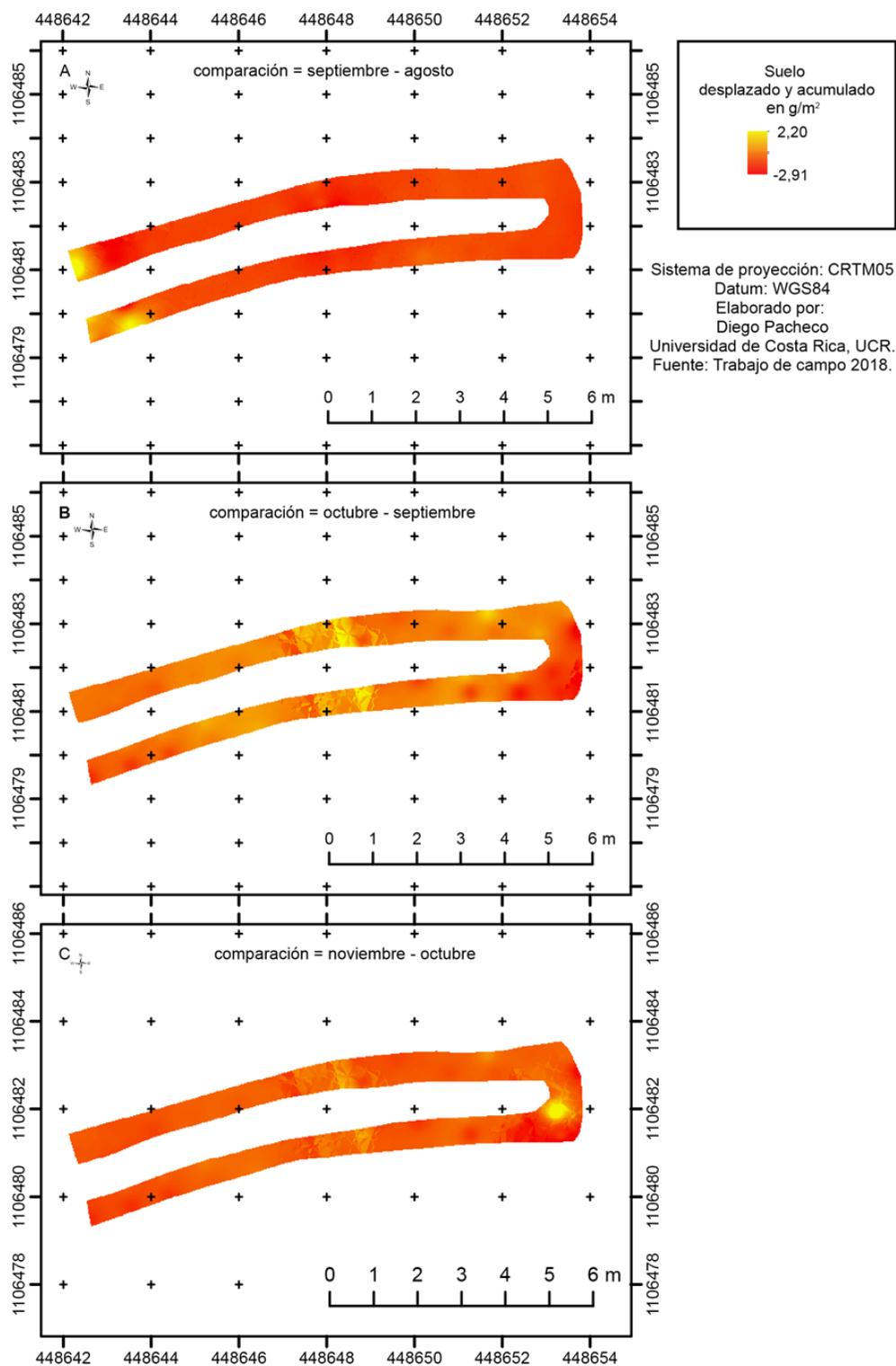


Figura 8. Variación espacial de la superficie de MED de huella de camino con interpolación IDW (color rojo pérdida de suelo, valor negativo, y color amarillo acumulación de suelo, valor positivo) parcela-2 (MED de diferencias de alturas A, B y C) en caminos de acceso a cafetal en cuenca del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

La parcela-3 para agosto-septiembre presentó una pérdida estimada de suelo de  $2,13 \text{ g/m}^2$ , no así para, el período de septiembre-octubre donde hubo acumulación de suelo de  $2,88 \text{ g/m}^2$ , y noviembre-octubre  $17,42 \text{ g/m}^2$  (Figura 9, A, B, C).

En la parcela-3 se determinó una pérdida de suelo mínima con  $6,89 \text{ g/m}^2$  y valor máximo de deposición con  $10,42 \text{ g/m}^2$  (Figura 9).

En el MED de huella de camino de parcela-3 septiembre-agosto presentó en la parte superior segmentos cortos de píxeles rojos, y en la huella presentó mayor cantidad de píxeles que muestran acumulación de suelo. El MED de septiembre-octubre en la parte superior presentó mayor cantidad de píxeles que representan pérdida de manera descendente hacia la parte inferior. El MED de noviembre-octubre es el que evidenció mayor contenido de píxeles color amarillo, muestra más acumulación de suelo y muy poca pérdida de suelo (Figura 9).

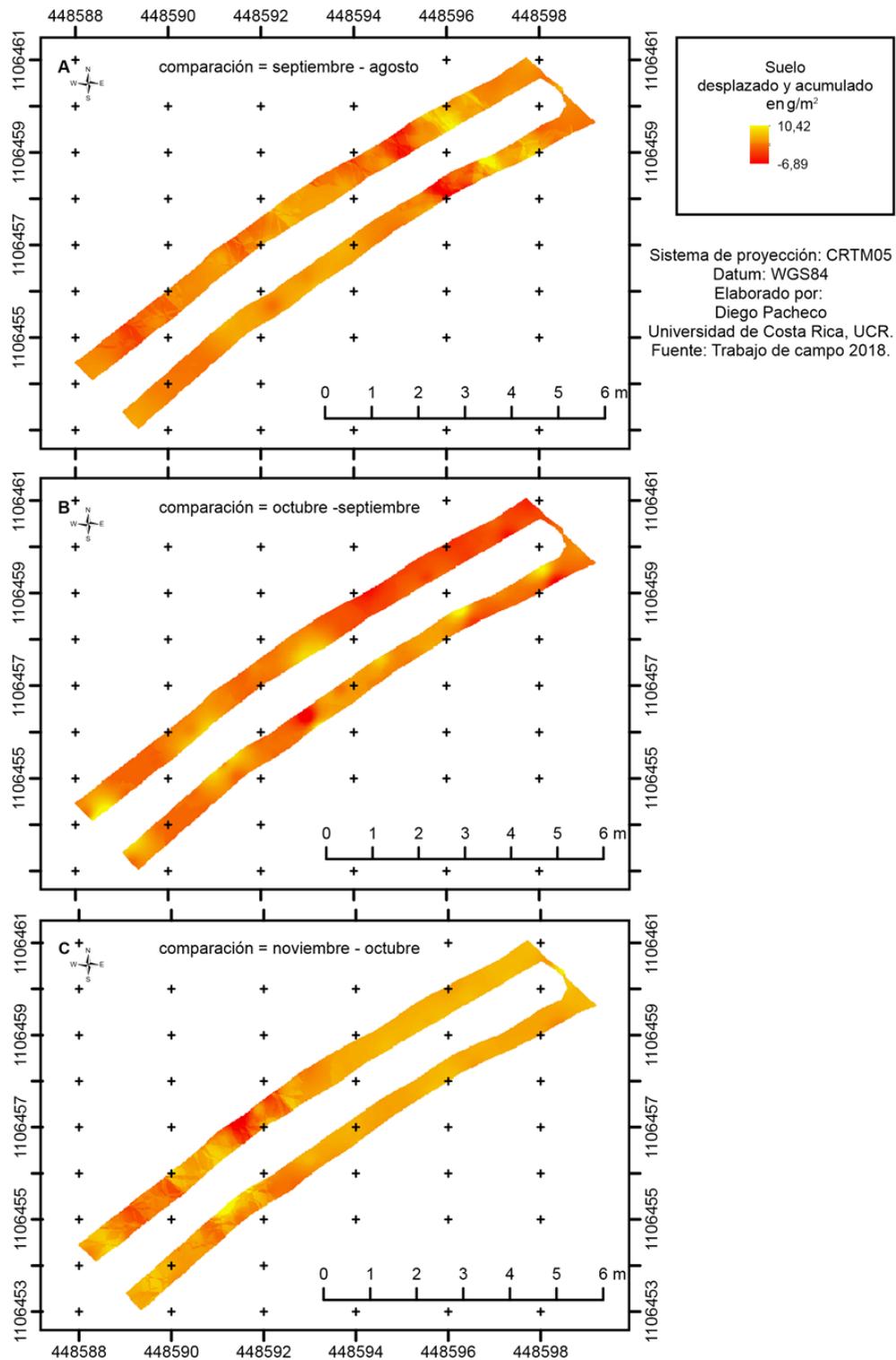


Figura 9. Variación espacial de la superficie de MED de huella de camino con interpolación IDW (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color amarillo acumulación de suelo, valor positivo) parcela-3 (MED de diferencias de alturas A, B y C) en caminos de acceso a cafetal en cuenca del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

### 6.3 Estimación de erosión de suelo con uso de imágenes aéreas

Los resultados se presentan en primer lugar visualizando los ortomosaicos obtenidos el cual brindó una vista en 3D. En segundo lugar, se presentan los promedios de pérdida y ganancia de suelo por cada parcela evaluada en caminos. En tercer lugar, se muestran los valores por cada modelo de elevación digital con las diferencias de cada mes evaluado. Por último, se muestran las características de lluvia asociada a pérdida y acumulación de suelo.

Con el uso de imágenes aéreas en los caminos descubiertos, se obtuvieron algunos productos fotogramétricos. Uno de ellos fue el ortomosaico el cual es la unión final de todas las imágenes traslapadas en diferentes ángulos tomados por el dron (Fig.10 muestra la secuencia desde toma de imágenes en el campo). Además, se presentan las tres parcelas 1, 2 y 3 (A, B y C) con imágenes aéreas y puntos de control en superficie. El otro producto fue el Modelo de Elevación Digital el cual brindó las diferencias de pérdida y ganancia de suelo, en el área de huella de camino evaluados.



Figura 10. Vista aérea de ortomosaico, con plan de vuelo a 20 m y colocación de puntos de control en caminos. A la izquierda el dron modelo MavicPro, parcela 1 (A), parcela 2 (B) y parcela 3 (C), cuenca alta, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

### 6.3.1 Promedios del movimiento de suelo por MED de huella por parcela

Los resultados promedios de MED de huellas de camino por parcela, para parcela-1 presentó un promedio de pérdida de suelo de 7,34 g/m<sup>2</sup>, para huella de camino de parcela-2 hubo un promedio de acumulación de suelo de 27 g/m<sup>2</sup>, y para huella de camino de parcela-3 presentó un promedio de acumulación de suelo de 27,09 g/m<sup>2</sup> (Cuadro 2). El comportamiento de los MED por parcela, se observa que parcela-1 es la que presentó pérdida de suelo, no así para parcela-2 y 3 que presentaron acumulación de suelo. También, se presenta una columna con la sumatoria de pérdida y ganancia de suelo por parcela, y promedios de los meses de evaluación de agosto a noviembre (Cuadro 2). Al igual que en los datos de ajuste realizados en volumen de suelo a estación total se utilizaron los valores de densidad aparente (1,12, 1,33 y 1,26 g/cm<sup>3</sup> para parcelas 1, 2 y 3 respectivamente).

Cuadro 2. Comportamiento de la estimación de pérdida y acumulación de suelo en g/m<sup>2</sup> por parcela en camino de cafetal mediante fotogrametría, en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

Parcela	Promedio en (g/m <sup>2</sup> )	Desviación estándar	Total en g/m <sup>2</sup>
1	-7,34	2,21	-22,01
2	27,79	15,18	83,38
3	27,09	6,96	81,28
Promedio	15,85	8,12	47,55

valor negativo: pérdida de suelo  
valor positivo: acumulación  
total, en g/m<sup>2</sup> por parcela

### 6.3.2 Pérdida de suelo estimada y cambios de superficie por cada MED

La primera evaluación de agosto-septiembre en los MED de huella de camino fue la que presentó pérdida de suelo por cada MED para todos los meses evaluados en las tres parcelas, y solo parcela-1 fue la que presentó erosión para todos los MED de huella de camino.

Para el MED de huella de camino de parcela-1 en el período de agosto-septiembre hubo una pérdida de suelo de 4,64 g/m<sup>2</sup>, en el período de septiembre-

octubre presentó pérdida de suelo con  $3,86 \text{ g/m}^2$ , y en el período de octubre-noviembre hubo una pérdida de suelo de  $13,51 \text{ g/m}^2$  (Figura 11, A, B, C).

El desplazamiento de la pérdida de suelo se presentó a través del color rojo en huella de camino y color azul muestra acumulación de suelo para los tres MED de huella de camino por cada parcela. En la escala espacial en el MED de huella de camino, para parcela-1 el color rojo tiene un valor mínimo de pérdida de suelo de  $-9,93 \text{ g/m}^2$  y color azul se muestra acumulación de suelo de  $3,88 \text{ g/m}^2$  (Figura 11).

El MED de huella para parcela-1, presentó en el período agosto-septiembre más visible los pixeles rojos con mayor tonalidad, reflejando pérdida de suelo más concentrada en la parte superior izquierda del MED, mientras que en la zona inferior hubo más contenido de pixeles que corresponde a acumulación de suelo. Septiembre-octubre hubo mayor contenido de pixeles color rojo, presentó mayor desplazamiento de suelo a los dos lados de la huella. Octubre-noviembre presentó mayor tendencia del desplazamiento del suelo en la parte inferior del MED justo al lado de cuneta del camino.

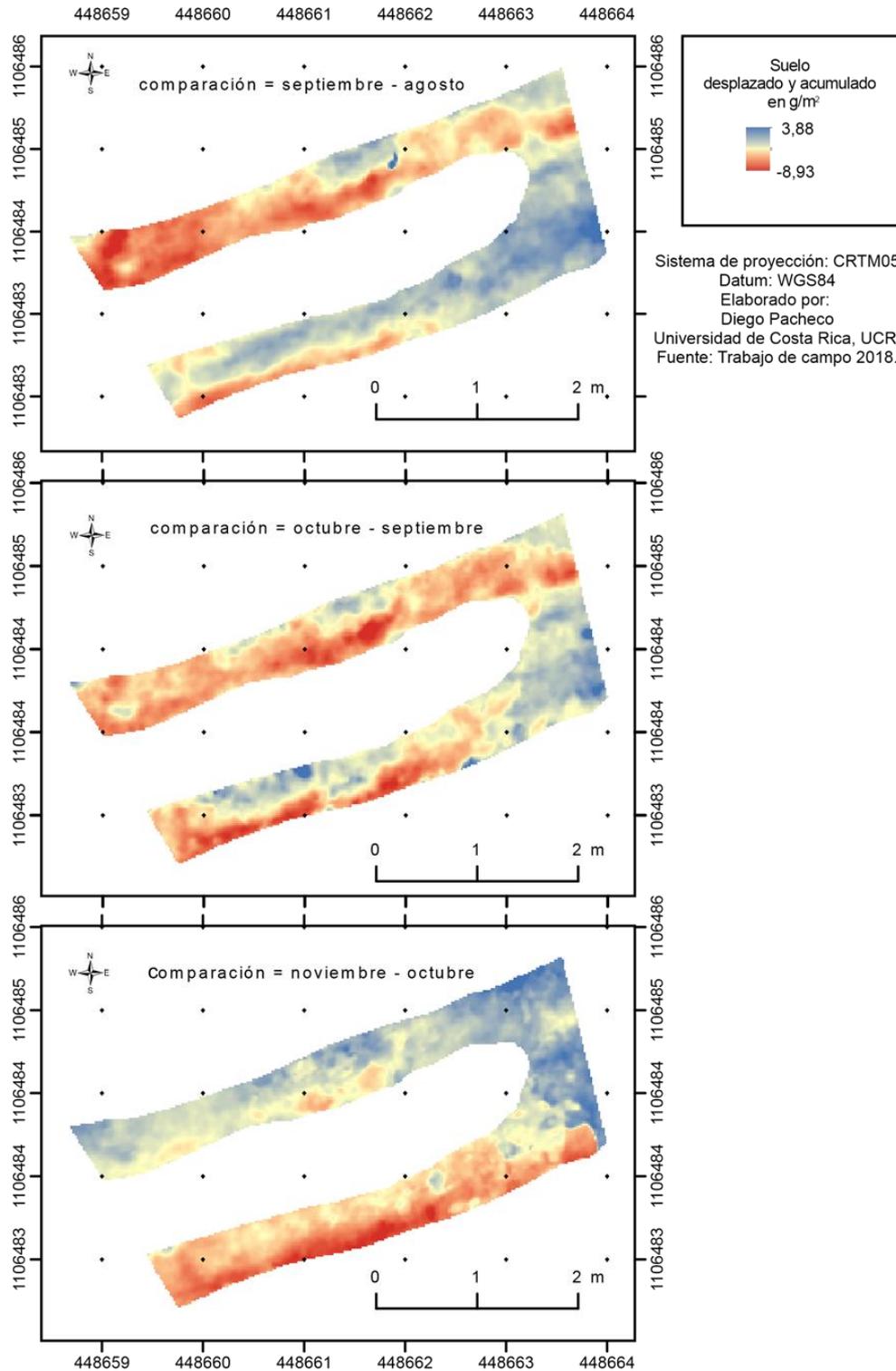


Figura 11. Parcela-1 (MED de diferencias de alturas A, B y C) variación espacial de la superficie de MED de huella de camino de imágenes aéreas en (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color azul acumulación de suelo, valor positivo). Cuenca alta del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

El MED de huella de camino en la parcela-2 presentó para el período de agosto-septiembre una pérdida de suelo de  $12,98 \text{ g/m}^2$ , para el período de septiembre-octubre hubo una acumulación de suelo con  $109,85 \text{ g/m}^2$ , y para el período de octubre-noviembre hubo una pérdida de suelo de  $13,50 \text{ g/m}^2$  (Figura 12 A, B, C).

En la parcela-2 presentó en color rojo un valor mínimo de pérdida de suelo de  $-28,16 \text{ g/m}^2$  y color azul una acumulación de suelo máximo de  $92,49 \text{ g/m}^2$  (Figura 12).

Para el MED de huella de camino parcela-2 en agosto-septiembre presentó mayor pérdida de sedimento en la zona inferior, y la zona superior mostró acumulación de sedimento. Septiembre-octubre presentó más píxeles de color rojo en el MED con mayor influencia de pérdida en la parte superior derecha y parte inferior izquierda. El mes de octubre-noviembre hubo acumulación de suelo en color azul en la parte superior izquierda hasta la parte media del MED, en la parte superior derecha se visualiza pérdida de suelo.

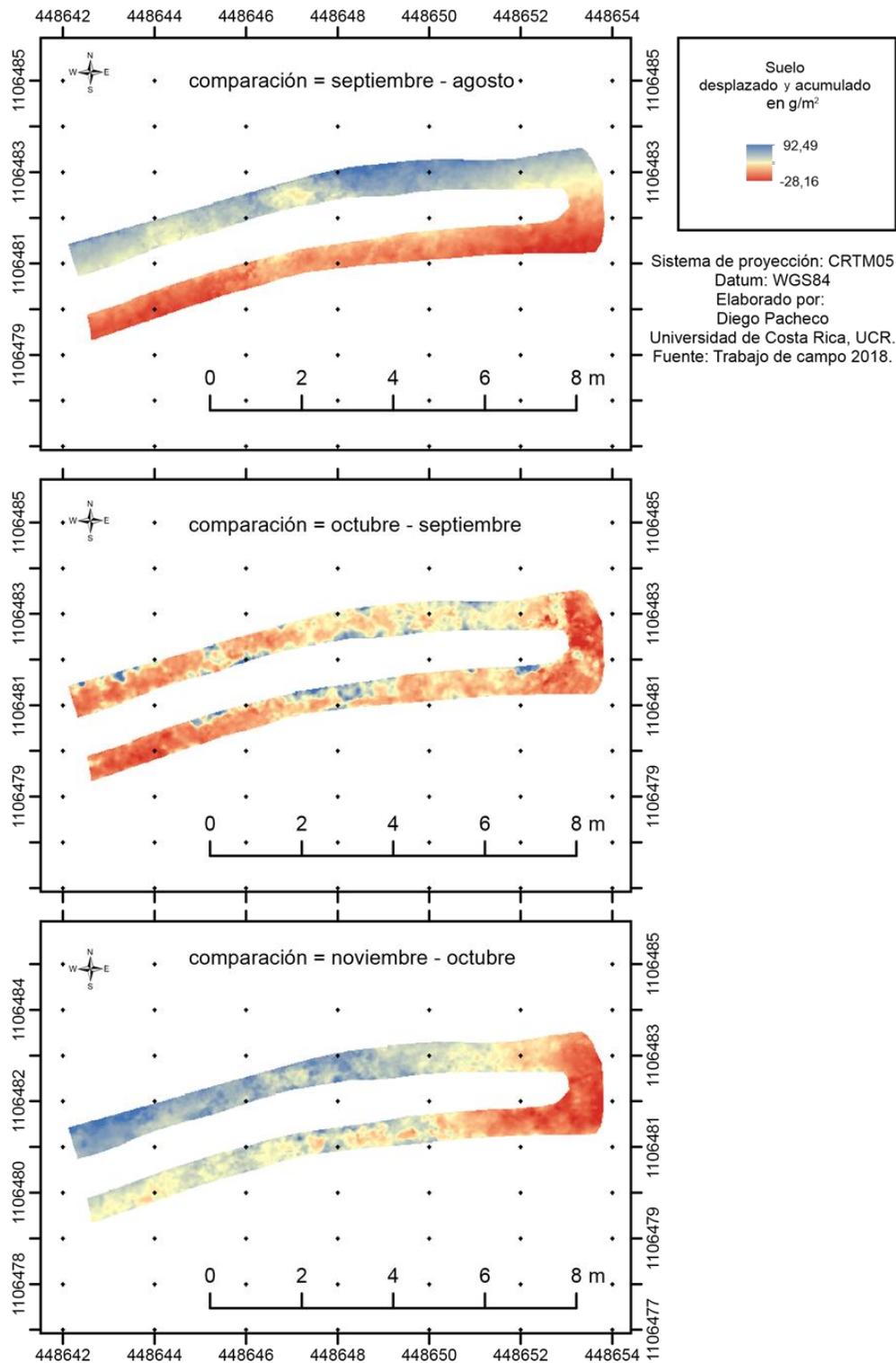


Figura 12. Parcela-2 (MED de diferencias de alturas A, B y C) variación espacial de la superficie de MED de huella de camino de imágenes aéreas (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color azul acumulación de suelo, valor positivo). Cuenca alta del río Jesús María, San Ramón, Alajuela 2018.

El MED de huella de camino para período de agosto-septiembre parcela-3 hubo una pérdida de suelo de  $2,30 \text{ g/m}^2$ , para el período de septiembre-octubre se presentó acumulación de suelo de  $60,75 \text{ g/m}^2$ , y para el período de octubre-noviembre hubo un valor fuerte de pérdida de suelo con  $-22,83 \text{ g/m}^2$  (Figura 13, A, B, C).

Asimismo, el levantamiento de parcela-3 presentó el valor mínimo de pérdida de suelo con  $-3,37 \text{ g/m}^2$  y de deposición con  $26,31 \text{ g/m}^2$  (Figura 13).

El tercer MED de parcela-3, para agosto-septiembre en la parte media presentó puntos específicos de pixeles donde hubo pérdida de suelo. El mes de septiembre-octubre presentó pérdida de suelo en la parte superior derecha y acumulación de suelo en la parte inferior izquierda. Para octubre-noviembre la acumulación es mínima, presentó más pérdida por dominancia de pixeles rojos en toda la huella de camino.

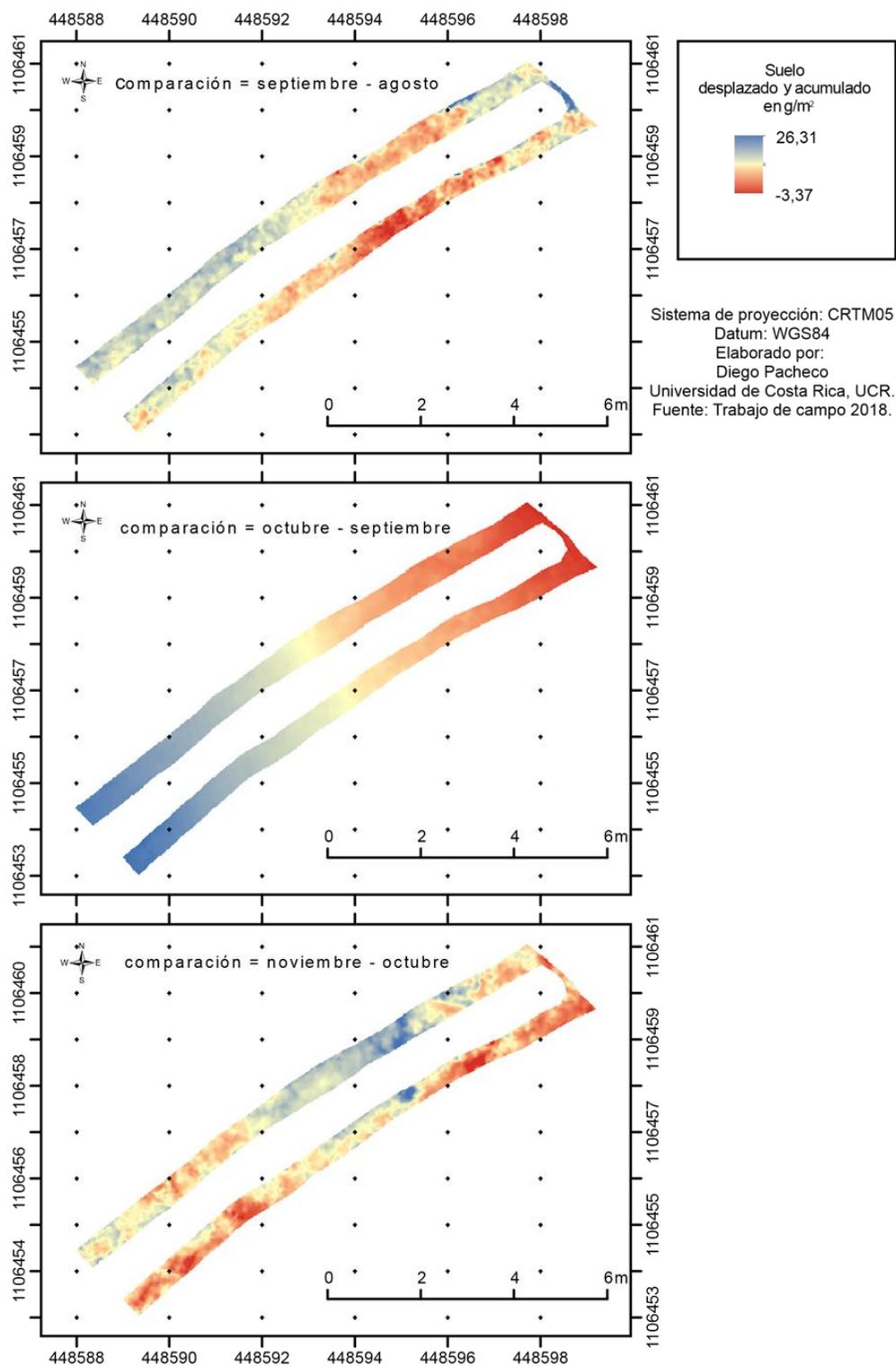


Figura 13. Parcela-3 (MED de diferencias de alturas A, B y C) variación espacial de la superficie de MED de huella de camino de imágenes aéreas, (color rojo pérdida de suelo, valor negativo y color azul acumulación de suelo, valor positivo). Cuenca alta del río Jesús María, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

## 6.5 Resultados de las dos metodologías

En el cuadro 3 se presentan los resultados totales de pérdida y ganancia de sedimento, la suma total en el periodo de evaluación de agosto a noviembre por parcela, y se comparó los resultados totales de cada método. La metodología por fotogrametría presentó valores altos principalmente con valores de acumulación y mayor variabilidad en comparación con los resultados de estación total en parcela 2 y 3.

Cuadro 3. Resultados de pérdida/ganancia de sedimentos mediante dos metodologías (estación

Parcela	Mes	Estación Total Sedimento (g/m <sup>2</sup> )	Fotogrametría Sedimento (g/m <sup>2</sup> )
1	agosto-noviembre	-19,79	-22,01
2	agosto-noviembre	-8,18	83,38
3	agosto-noviembre	18,17	81,28

total y fotogrametría), camino en cafetal, Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

## 6.6 Época y características de lluvia asociadas a los cambios del suelo

Las correlaciones entre variables dependientes e independientes, en este caso el sedimento fue la variable dependiente y las variables independientes fueron los valores mensuales de lámina total de lluvia (mm), total tiempo de lluvia en (min), intensidad media promedio de todas las lluvias del mes (mm/h), intensidad media mensual al dividir lámina total entre el tiempo total de lluvia (mm/h) e intensidad máxima de lluvia (mm). Se obtuvieron los diferentes resultados entre las correlaciones de cada método (estación total y fotogrametría) (ver anexo V).

Los datos de la lluvia acumulada registrada fueron de 210, 330, 110 mm principalmente para los meses de septiembre, octubre y noviembre respectivamente. Además, se obtuvieron las variables de lámina de lluvia, total de tiempo de lluvia, intensidad media mensual, intensidad media cada 30 min e intensidad máxima, en estas dos últimas se presentaron los diferentes eventos lluviosos principalmente en septiembre y octubre, siendo los meses de mayor precipitación (Cuadro 4).

Cuadro 4. Variables de precipitaciones por mes en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

<b>Mes</b>	<b>Lámina (mm)</b>	<b>Total tiempo lluvia min</b>	<b>Intensidad media mensual (mm)</b>	<b>Intensidad media 30 min</b>	<b>Intensidad máxima (mm/h)</b>
agosto	185,31	11610,00	0,02	7,96	58,42
septiembre	210,94	19380,00	0,01	13,46	19,62
octubre	330,18	8550,00	0,04	6,00	32,80
noviembre	110	43500,00	0,00	30,00	33,60

El primer grupo de análisis fue usando la relación de pérdida de sedimentos estimados con estación total (ver anexo V). El sedimento perdido o ganado contra lámina de lluvia, al igual que la relación con la intensidad media de lluvia por mes no tuvieron mayor correlación. Al igual que la variable total de lluvia, intensidad media cada 30 min e intensidad máxima no hubo mayor correlación (Cuadro 5).

En el comportamiento de resultados de fotogrametría, para la relación de sedimento contra total de lluvia tuvieron correlaciones de -0,5, al igual que la variable de intensidad media cada 30 min con un valor de -0,5., la variable de sedimento y lámina de lluvia correlacionaron con un valor de 0,6, de la misma manera sedimento y la intensidad de lluvia por mes correlacionaron con un valor de 0,7. Por último, la variable de intensidad máxima de lluvia no mostro mayor correlación (Cuadro 5).

Cuadro 5. Correlación de variables sedimento y características de lluvia en Llano Brenes, San Ramón, Alajuela 2018.

Estación total	Lámina de lluvia	Total lluvia	Intensidad media mes	Intensidad media	Intensidad máxima lluvia
Parcela 1-3	mm	min	mm/h	mm/h	mm/h
Sedimento	-0,1	0,2	0,0	0,2	0,3
lámina de lluvia	1	-1	1	-1	-0,1
Total lluvia		1	-0,9	1	0,3
Intensidad Media mes			1	-0,9	0,3
Intensidad Media 30 min				1	0,3
Intensidad máxima					1

Fotogrametría	Lámina de lluvia	Total lluvia	Intensidad media mes	Intensidad media	Intensidad máxima lluvia
Parcela 1-3	mm	min	mm/h	mm/h	mm/h
Sedimento	0,6	-0,5	0,7	-0,5	0,4
lámina de lluvia	1	-1	1	-1	-0,1
Total lluvia		1	-0,9	1	0,3
Intensidad media mes			1	-0,9	0,3
Intensidad media 30 min				1	0,3
Intensidad máxima					1

## 7. Discusión

La combinación de factores como la lluvia, el viento y la intervención constante del hombre, incrementan el desprendimiento de suelo de la superficie de los caminos.

El ingreso para el mantenimiento del cultivo de café genera un efecto mayor en el deterioro de los caminos, se pierden grandes cantidades de sedimento por derrumbes de pequeñas laderas del cultivo colindando con el camino, quedando en exposición el sistema radicular del cultivo de café.

De acuerdo a los resultados, los caminos descubiertos pierden suelo (Ziegler y Giambelluca 1997), con mayor fuerza cuando los caminos estuvieron sin ninguna cobertura en la superficie (Ramos 2010, Verbist *et al.* 2010), esto refuerza la hipótesis de que puede ocurrir una pérdida de suelo importante en magnitud sobre caminos expuestos en fincas agrícolas. Esto se reflejó en los MED de huellas de camino en las tres parcelas evaluadas bajo dos metodologías (Figura 7, 8, 9, 11, 12 y 13), el sedimento fue removido y transportado por el agua superficial de flujos preferentes, el cual causa problemas de erosión en los caminos de cuencas (Ziegler *et al.* 2004).

### 7.1 Interpolación IDW

#### 7.1.1 Movimiento del sedimento por parcelas con estación total

Los promedios estimados de pérdida de suelo fueron evidentes en los primeros meses de evaluación en las parcelas 1 y 2, y puede asociarse al efecto de acción de la lluvia (salpique) e intensidad, la nula cobertura en superficie de caminos pudo influir a que los caminos estuvieran vulnerables al desprendimiento y transporte de suelo por la escorrentía superficial, y el tránsito de vehículos de trabajo. En la parcela 3 se registró ganancia de sedimento, sin embargo, esto es una pérdida de suelo la cual está relacionado con el desplazamiento de sedimentos provenientes de parcelas arriba (o camino superior), más aún debido a la cercanía con la parcela-2 con dirección hacia la pendiente con 46 m aproximadamente de distancia entre ambas parcelas y la presencia de taludes aledaños a estas parcelas debido al camino, tal y como lo observaron también Ziegler *et al.* (2004). La acumulación de suelo que hubo en las parcelas 1, 2 y 3 presentó relación con los porcentajes de la

pendiente de 13, 10 y 15% respectivamente, tal como lo mencionan Rahman *et al.* (2015) en sus resultados que la erosión del suelo incrementó por la elevación de la pendiente y el efecto de la lluvia (Ziegler *et al.* 2004), y con pendientes mayores del 20% cercana a la de 15% en este estudio. A pesar de que en la parcela 3 hubo deposición de sedimentos principalmente, al estar en consecución de las dos anteriores, en este periodo de 3 meses lo que se observó fue parte del proceso de erosión en la etapa de deposición. Sin embargo, se puede asumir que esta parcela también tuvo pérdida de sedimentos, pero en mayor magnitud una acumulación de los mismos provenientes de camino arriba.

Los valores de desviación estándar en los resultados fueron altos sin embargo no son comparables con los que encontró Chekole (2014) donde muestra que la desviación estándar encontrada con el uso de estación total comparando con otros métodos de medición como GPS-RTK y TLS, sus valores son de 1 mm teniendo alta precisión en las coordenadas de puntos verticales y horizontales, mientras que en este estudio valores promedios por parcela como resultado de diferencias de superficies raster fueron de 1,6, 0,42 y 1,9 cm para las parcelas-1, 2 y 3 respectivamente (Cuadro 1). A pesar de que los resultados de este estudio están relativamente dispersos, los valores por cada MED no parecen estar sobreestimados, por considerarse que valores encontrados se deben por que el instrumento tiene estabilidad en la medición, aun no contando con literatura relacionada. Además, puede asociarse este resultado por el tamaño del área y el tiempo de investigación, y puede relacionarse a la coherencia espacial de la superficie (Williams 2012).

Los MED obtenidos por interpolación reflejaron variaciones de la superficie debido a factores como la lluvia, paso de personas e ingreso de vehículos que, si bien este último factor no se pudo monitorear en cuanto a frecuencia, se confirmó por parte del productor que él pasó en varias ocasiones por el camino, incluso la huella de llantas en camino lo confirmó. Los resultados contrastaron con estudios que han investigado el comportamiento de la erosión en caminos. En el caso de Ziegler *et al.* (2004) en caminos no pavimentados de 50 m de longitud, con el uso de simulador de lluvia y medición de sedimento al final de caminos, obtuvieron

pérdida de suelo equivalente a  $120 \text{ Mg/ha año}^{-1}$  ( $240 \text{ g/m}^2$ ) en un área de estudio similar a la utilizada en este estudio.

Los valores cuantificados por cada MED mostraron pérdida de suelo superficial en las parcelas 1 y 2 con valores más bajos que la de la parcela 3, donde el mayor tránsito de gente y vehículos se pudo haber dado en las 2 primeras parcelas. Por ejemplo, el estudio de Peranich (2005) evaluó la pérdida de suelo promedio en 4 segmentos de caminos rurales anchos con la recolección de sedimentos al final lateral de caminos, midió pérdidas de sedimentos de camino durante 6 meses de junio a noviembre 2004, estos caminos presentaban mayor uso de tránsito vehicular, hubo valores de 534, 590, 688 y  $1425 \text{ g/m}^2$ , valores que no son comparables con lo encontrado en las parcelas 1 y 2 correspondientes a promedios de pérdida de  $6,60$  y  $2,73 \text{ g/m}^2$  en término de 3 meses en este estudio. El valor general por unidad de área en los cuatro segmentos de caminos que mostró Peranich (2005) fue de  $54,56 \text{ g/m}^2$  un valor que es asociado por el ancho y largo de caminos, y la posible influencia de zanjas laterales de estos caminos.

La parcela-3 por otro lado presentó en dos evaluaciones valores de acumulación total de sedimento hasta de  $27,09 \text{ g/m}^2$  que corresponde a los 3 meses de evaluación, siendo el más alto de todos los resultados, por lo que se podría suponer que la estimación del método de interpolación IDW sobreestimó mayor volumen por cambios de altura, en los dos últimos meses de lluvia en el año. La cobertura incrementó en los caminos al avanzar la época lluviosa, sin embargo, se cortaron las arvenses que cubrían el camino a inicios del último mes de evaluación, lo que a su vez al parecer contribuyó a una mayor deposición de sedimentos sobre la superficie, lo cual ya fue observado por Rahman *et al* (2015) que observaron que en áreas con vegetación, ésta fue el principal factor para disminuir la erosión del suelo y que es una de las principales recomendaciones para proteger el suelo a la erosión (FAO 2015). Otra posible influencia fue el depósito de materia orgánica (hojas) por parte de especies de árboles en los alrededores de los caminos e incluso de la misma chapea de las arvenses en el camino.

### 7.1.3 Variación espacial de los MED con estación total

El área de huella de camino presentó variación por cada parcela, en cada una se delimitó un área específica de acuerdo a la huella que no estuviera influenciada por cobertura vegetal. Por otro lado, la parcela 1 presentó una pendiente promedio de 13% con exposición de rocas en superficie (Figura 7), la parcela 2 una pendiente del 10% y la más expuesta al cafetal (Figura 8), y la parcela 3 una pendiente del 15% pero con una ubicación más baja casi al final del camino (Figura 9). En los registros de cambio de superficie, se observó el fenómeno completo de erosión debido a que hubo no sólo pérdida de superficie sino también aumento de la misma por deposición. Esto demuestra aún con más claridad que el proceso de erosión es un fenómeno dinámico, no ocurre en forma total en un área determinada, sino más bien, la pérdida del suelo es paulatina ocurriendo las fases principales de erosión: desprendimiento de suelo, transporte y deposición.

En la parcela 1 (Figura 7, A, B) se observa una formación en la proyección de superficie llamada “Ojo de buey” en los modelos de elevación digital (Gotway *et al.* 1996; Ayeni y Samuel 2014), como lo mencionan Villatoro *et al.* (2008) en sus resultados de MED, ésta es una formación circular que aparece en los puntos y es propia de este tipo de interpolador (Gotway *et al.* 1996). Podría asociarse a que este segmento de camino presentó inconsistencia en superficie, por capa de rocas expuestas por erosión, generando variación anormal en la sobreestimación de altura mostrando valores no reales en los píxeles.

Las formaciones de píxeles para los tres modelos de elevación digital en la parcela 1, 2 y 3 presentaron características de las alturas de pixel muy realistas en las huellas de caminos mediante el reconocimiento visual en campo y en el sistema computacional de acuerdo a la forma de la superficie conocida. Sin embargo, se sabe de antemano que todos los datos tomados en campo conducirán a resultados muy diferentes en las investigaciones con interpolación (Setianto y Triandini 2015).

## 7.2 Imágenes aéreas

El procesamiento fotogramétrico permitió obtener diferentes productos para la estimación de la superficie con la ventaja de que cubre mucha más área de la huella (casi su totalidad a excepción de pequeñas áreas no cubiertas por las imágenes) al

trabajarse con un ortomosaico de las imágenes aéreas. Este producto generó alta resolución de superficie en vista de que requirió interpolación sólo en pequeñas áreas que quedaron como vacíos no cubiertos por las imágenes aéreas. Otra ventaja que presentó esta técnica es su practicidad de implementación, el drone cubre grandes áreas en poco tiempo y su cobertura es mucho mayor que el uso de la estación total, la cual se beneficia de una mayor precisión de levantamientos de puntos. Por último, el procesamiento de imágenes del drone si requieren más tiempo de procesamiento en ordenador y a su vez este debe tener alta capacidad de procesamiento lo cual aumenta el costo del equipo.

### **7.2.1 Pérdida de sedimento promedio por parcelas con fotogrametría**

La superficie de caminos experimentó cambios por cada parcela evaluada (Cuadro 2). Sin embargo, nuestro objetivo fue estimar pérdida o ganancia de suelo debido a salida o entrada de sedimentos. La ganancia de suelo en las parcelas 2 y parcela 3 podemos suponer que se debe a que el suelo se está moviendo desde la parte superior de las parcelas (camino) y costados de la huella de camino.

La parcela 1 presentó bajo porcentaje de maleza (arvenses) por la presencia de piedras expuestas en todos los meses de evaluación, por lo cual estuvo con mayor probabilidad de erosión como lo muestra el valor promedio de los tres meses evaluados, registrando una pérdida promedio mensual de suelo de  $7,24 \text{ g/m}^2$ . Los datos de acumulación para las parcelas 2 y 3 podrían asociarse a que los pixeles capturaron mayor información de objetos (arvenses, ramas, piedras) en el espacio superficial incrementando erróneamente la ganancia de sedimento. Ramos (2010) y Zhang *et al.* (2019) mencionan que la cobertura contribuye a disminuir la pérdida de suelo, sin embargo, para nuestros resultados puede ser una sobrestimación por errores en la georreferenciación y variación de las alturas en el relieve (Ouédraogo *et al.* 2014, Balaguer 2015; Eltner *et al.* 2016).

Para contrastar los resultados, se encontró por ejemplo el estudio de Zhang *et al.* (2019) que muestran en sus resultados mediante el uso de MED una pérdida de suelo promedio de  $478 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  en caminos secundarios sin pavimentar lo que equivale a  $47\,800 \text{ g/m}^2$  anualmente esto por fuertes eventos de precipitaciones que se registraron, sin embargo, no es posible comparar en este estudio los promedios

de pérdida de suelo que se estimó fue en un área de 5,6 m<sup>2</sup> fue de 7,34 g/m<sup>2</sup> para un segmento de camino en parcela 1 en el período de evaluación (Figura 11), sin embargo, es evidente la diferencia por la dimensión del pixel, área utilizada, metodología e incluso el tiempo de evaluación. Lo que si puede ser comparable es el efecto de caminos y la lluvia.

Los valores altos de estos estudios son proporcionales a la vulnerabilidad de la superficie en los sitios de investigación, en algunos casos son investigaciones con suelos frágiles y de poca vegetación (Ramos 2010), y de mayor dimensión espacial en sus investigaciones. Estos últimos estudios han tenido mucha relación con la resolución asignada en esta investigación, sin embargo, el tipo de pendiente y la evaluación de otras variables en campo hace que los valores a nivel de escala espacial sean completamente diferentes y la comparación muestra valores altos.

La parcela 1 presentó pérdida de suelo consistentemente, esto puede deberse a lo vulnerable que esta parcela se encontraba por su topografía y el uso constante de esta sección del camino para el ingreso a cafetal. Además, esta sección del camino recogía aguas arriba del mismo camino, y justo al terminar la parcela abajo había una depresión artificial del camino para desviar aguas superficiales lateralmente. Por otro lado, esta escorrentía no afectada o lo hacía en menor grado sobre la parcela 2. En las parcelas 2 y 3 para el mes de octubre se midió acumulación de sedimentos de 109,85 y 60,75 g/m<sup>2</sup> respectivamente. Estos valores a su vez fueron elevados comparados con los otros valores en los diferentes meses de las tres parcelas, y estos posiblemente están relacionados con una sobreestimación de alturas de superficie, parecido al resultado de Balaguer (2015) que encontró una sobreestimación del 18% de sedimento en bandejas con suelo en laboratorio, afirmando que es más alto el valor calculado que lo recogido, por lo que los valores en este estudio tienden a ser más altos. Esto se puede asociarse a que las imágenes capturaron información no deseada de las coberturas a pesar del cuidado de separar manualmente esa interferencia en la imagen. También, otra causa probable fue la baja calidad de las imágenes aéreas recolectadas de la parcela 2 y 3, debido a la poca resolución presentada en algunas de las imágenes tomadas, por efecto del viento en el desplazamiento del dron en pleno vuelo.

El estudio de Neugirg *et al.* (2016) presentó valores de erosión de  $0,11 \text{ g/m}^2$  y deposición de suelo de  $0,03 \text{ g/m}^2$  en un año con suelos expuestos, los MED estimaron erosión en un área de  $17,900 \text{ m}^2$  y deposición de sedimento en un área de  $4,400 \text{ m}^2$ , comportamiento parecido al comportamiento de los resultados en parcela 1, 2 y 3 (Figura 11, 12 y 13) en caminos donde hubo dos datos de ganancia de suelo con valores de  $27,79$  y  $27,09 \text{ g/m}^2$  (Cuadro 2). Peter *et al.* (2014) obtuvieron una pérdida de sedimento con un valor de  $48,6 \text{ g/m}^2$  en tierras con influencia de nivelación, y mediante datos de MED en un área de  $3,53 \text{ ha}$  estimaron una pérdida de suelo equivalente a  $0,10 \text{ g/m}^2$ , sin embargo, cuando la intervención en nivelación del suelo fue menor hubo valores bajos con  $9,5 \text{ g/m}^2$  a  $23,7 \text{ g/m}^2$ , estos resultados son muy parecidos a este estudio y es uno de los estudios con un valor de celda ( $2 \times 2 \text{ cm}$ ) igual al valor de resolución utilizado en este trabajo.

### **7.2.3 Variación de píxeles de MED derivados de fotogrametría**

En la parcela 1 hubo un comportamiento esperado reflejado en los píxeles con pérdida de suelo en color rojo y ganancia de suelo en color azul (Figura 11). Los píxeles de color rojo representan una relación visualmente acorde con la superficie de la parcela, debido a la pendiente que fue de  $13\%$ , la parte de color azul correspondió a las zonas de mayor contenido de roca expuesta, lo cual se refleja como sedimento acumulado.

En la parcela 2 para las evaluaciones de septiembre-agosto y noviembre-octubre hubo un comportamiento visual muy parecido, debido a que la parte superior en color azul, es que la superficie es más alta que la parte inferior que es la que muestra pérdida en color rojo, con una pendiente del  $12\%$ , este comportamiento es bastante real con relación a la superficie del camino. La evaluación octubre-septiembre hubo un dominio de más pérdida homogénea de suelo en toda la huella de camino, esto podría estar relacionado con que octubre hubo mayor variación de lluvia con eventos fuertes de precipitación de hasta lámina de  $194 \text{ mm}$ , siendo el mes más lluvioso del año 2018 (Figura 12).

En la parcela 3 con pendiente del  $15\%$  (Figura 13), los píxeles al principio de las tres evaluaciones en la parte superior derecha empiezan de color rojo, y en la parte inferior izquierda hacia la pendiente presentó más contenido de píxeles azules, lo

que está reflejando la influencia de la pendiente (Ramos 2010), y la distribución de suelo acumulado en la huella del camino.

### **7.3 Comparación entre resultados de las dos metodologías**

Los métodos fueron calibrados y ajustados en campo. En esta investigación se comparó los resultados encontrados en una correlación entre los valores totales tanto pérdida y ganancia de sedimento por parcela durante la evaluación.

La correlación fue positiva entre los métodos, lo que indica es que ambos métodos estiman en la misma dirección general. Sin embargo el método que tuvo mayor variabilidad en los resultados fue el método de fotogrametría, debido a diferentes inconsistencias en el manejo del procesamiento y el corto tiempo de evaluación como también lo comenta Neugirg *et al.* (2016) en un estudio similar. Esto se asocia a la variación de las alturas y distanciamiento específicos en el traslape de los MED, considerando que el parámetro de referencia fue estación total.

La estación total fue el método que presentó valores más bajos de cambio de superficie del suelo, esto asociado a la precisión y traslape de MED, y menor variación en los datos. Por ejemplo, otro método más avanzado que estación total, fue el que utilizó Neugirg *et al.* (2016) el TLS para el análisis de superficies verticales, donde menciona que es más preciso. Aunque este método de estación total resulta de menor costo en el procesamiento, este aumenta el tiempo en la medición. En cambio, fotogrametría, aunque incrementó el tiempo de procesamiento en el computador para la medición de información espacial, este tardó menos tiempo en la medición y se ajusta mejor para medición de tasas de erosión en áreas más extensas como cuencas (Neugirg *et al.* 2016).

### **7.4 Análisis del comportamiento del suelo y época de lluvia**

La precipitación es un factor importante, pero en ocasiones no tiene relación directa con la erosión del suelo, es decir a mayor precipitación no significa mayor erosión de suelo (Xia *et al.* 2018), sin embargo, en esta investigación fue evidente que a mayor precipitación hubo valores de acumulación de sedimentos en la evaluación, siendo una de las fases del proceso de erosión.

En el estudio de Peranich (2005) menciona en sus resultados que 5 tormentas fuertes se registraron, obtuvieron un impacto de hasta el 83% de arrastre de sedimento en los caminos. En el trabajo de Villatoro *et al.* (2015) observaron cómo cerca de un 70% de la pérdida de sedimento anual ocurrió sólo en el mes de octubre bajo condiciones de trópico lluvioso. Ese resultado tiene relación con lo reportado con la pérdida de suelo del 53% en parcela 1 en ese mes de evaluación para el método de interpolación en este estudio. En el estudio de Peranich (2005) la extensión de los caminos hubo mayor dimensión de largo y ancho, además, se observó mayor uso y marcas de huellas de vehículos en los segmentos de caminos. Este resultado mostró el efecto que puede causar con el incremento de la lluvia, aprovecha la vulnerabilidad de los caminos cuando no tienen cobertura. El suelo cambia constantemente por la lluvia, a diferentes alturas de evaluación e inclinación de la pendiente y concuerda a los resultados de las investigaciones de los autores Ziegler *et al.* (2004), Peranich (2005) y Rahman *et al.* (2015).

En Costa Rica según Núñez (2001) el factor más importante es la lluvia, es el que impacta directamente sobre la erosión hídrica y los parámetros físicos relacionados son la duración, intensidad y frecuencia. En el trópico húmedo los eventos lluviosos mayor a 5 mm son erosivos (Núñez 2001). Hudson (1982) estimó que los eventos pluviales con una intensidad a partir de 25 mm de lluvia son erosivos, por lo tanto, en el cuadro 4 se observó que para el parámetro físico de intensidad máxima en agosto, octubre y noviembre supera los 25 mm, lo que podría explicar el efecto de los resultados con valores erosión y deposición de suelo en los caminos. El otro parámetro de intensidad media por mes se observó valores por encima de los 5 y 30 mm, siendo las dos variables de mayor relación a los cambios.

#### **7.4.1 Relación entre sedimento y características lluvia (estación total)**

Las precipitaciones tuvieron un efecto importante en los resultados obtenidos en el tiempo de evaluación en los caminos. Las correlaciones entre parcelas 1, 2 y 3 y las precipitaciones mensuales mostraron una baja relación con respecto a la pérdida de sedimento.

Las variables que obtuvieron muy baja correlación con la ganancia de suelo como la variable sedimento, fueron lámina de lluvia en mm con un valor de -0,1 e

intensidad media por mes en minutos con un valor de 0, valores menores a los resultados encontrados por Rahman *et al* (2015) donde mencionan que sedimento no correlacionó con la lluvia obteniendo un coeficiente de -0,5. Las posibles causas de estos resultados fue la variación de los diferentes eventos de lluvia en los meses de evaluación. Hubo aproximadamente 10 eventos por mes desde valores promedio de 25 mm por evento lluvioso, y un valor en un día de hasta 194 mm en 28 horas, similar a que lo mencionan Neugirg *et al.* (2016) en sus resultados donde hubo dos eventos fuertes de lluvia que ocasionaron el arrastre de sedimento acumulándose en superficies de pequeños canales.

Las variables totales de lluvia total mensual (mm), intensidad media cada 30 min e intensidad máxima (mm/h correlacionaron levemente con producción de sedimento (0,3, 0,2, y 0,3 respectivamente). Las correlaciones se deben a los eventos de lluvia presentados en el mes de septiembre y octubre. En septiembre se registró hasta 13 eventos con valores mínimos de 10 mm y máximos de 69 mm por hora y por día. En octubre registró aproximadamente entre 11 eventos con valor mínimo de 15 mm y valor máximo de 194 mm de lluvia, y noviembre hubo menos eventos con valores entre 10 y máximo 27 mm. Esto indica que las correlaciones entre sedimento, lluvia total e intensidad máxima podrían explicar parcialmente (debido a la baja correlación) el arrastre superficial del sedimento en los caminos. Estos valores concuerdan con los resultados presentados por Rahman *et al.* (2015) con el uso del mapa de índice de peligro de erosión, donde la erosión se correlacionó positivamente con el aumento de la variable (pendiente) y las precipitaciones con la variable de lámina acumulada de (lluvia mensual).

#### **7.4.2 Relación entre sedimento y precipitaciones (imágenes aéreas)**

Las variables que tuvieron una correlación negativa con respecto a ganancia de sedimentos fueron total de lluvia mensual con un valor de -0,5, intensidad media cada 30 min con un valor de -0,5. Lo anterior indica que, a mayor mm de lluvia, hay mayor acumulación de sedimentos en la huella del camino debido a menos pérdida de sedimentos. Sin embargo, estos resultados de fotogrametría presentaron valores de acumulación de sedimento más altos de 60,75 y 109 g/m<sup>2</sup> en la parcela 2 y la parcela 3 respectivamente, lo que explica que probablemente hubo sobreestimación

en alturas de la superficie con el uso de MED tal y como en forma similar lo observó Neugirg *et al.* (2016), la estimación del cambio en superficie parece confiable con relación a la acumulación, sin embargo, estos resultados están relacionados con inconsistencias en el procesamiento por el manejo de georreferenciación y de algunas imágenes aéreas que presentaron baja resolución.

Las correlaciones positivas relacionadas con el movimiento del sedimento, fueron lámina de lluvia con un valor de 0,6, intensidad de lluvia mensual con un valor de 0,7 e intensidad máxima hubo correlación con un valor de 0,4. Estas variables son las que estimaron pérdida de sedimento relacionado con las precipitaciones, los meses septiembre y octubre fueron los más lluviosos y en los que se presentó la mayor variación con una serie de eventos intensos incluso de más de 24 horas, de 2 a tres eventos por día. En este estudio se registraron eventos muy fuertes de hasta 194 mm en menos de 28 horas en un solo evento, parecido al resultado de Zhang *et al.* (2019) donde un sólo evento poco mayor a 200 mm de lluvia causó daños severos de hasta un 84% de erosión en caminos no pavimentados. Peter *et al.* (2014) evaluaron en barrancos y terrenos bajos en cuenca con diferentes alturas de vuelo, registrando en sus resultados que en un solo evento de precipitación en un día generó un valor de pérdida de suelo de 720 m<sup>3</sup> en áreas pequeñas de 0,5 ha con formación circular en la superficie.

Los MED que corresponden a la parcela 2 y la parcela 3 son los que presentaron mayor irregularidad en la información estadística con la comparación entre precipitación y movimiento del suelo. Debido a la dispersión de valores que estiman cantidades muy altas de hasta más de 1 kg por m<sup>2</sup>, esto por la variabilidad del método relacionado directamente con el procesamiento fotogramétrico.

Hubo conjuntos de imágenes aéreas afectadas por el desplazamiento del dron, por lo tanto, el plan de vuelo presentó mucha variación en el movimiento, hubo pixeles borrosos que se observaron en las imágenes causado por la velocidad del viento ejercida al obturador del dron (Bannister *et al.* 1994). La neblina causó efecto de sombra (Rock *et al.* 2012; Neugirg *et al.* 2016), lo cual se observó en los conjuntos de datos generando baja calidad en las imágenes aéreas.

## 7.5 Limitaciones del estudio

En este estudio se debió considerar un periodo corto de tiempo (4 meses) para visualizar cambios de la superficie con relación a la variación de las precipitaciones, lo que, si bien es un buen punto de partida, para otros estudios sería mejor por periodo de varios años.

Los principales desafíos al implementar métodos con imágenes aéreas será los factores metodológicos y ambientales, estos pueden limitar la calidad de la información (Valverde *et al.* 2014). Por ejemplo, la vegetación, pendiente, la variación de luminosidad para la calidad de las imágenes aéreas (Bannister *et al.* 1994; Stöcker *et al.* 2015), debido al efecto que ocasiona en los tonos, y contraste en los píxeles. La velocidad del viento, ya que en la cuenca se presentaron vientos fuertes lo que provocó el desplazamiento del dron, perdiendo imágenes aéreas del sitio de investigación.

El efecto de la lluvia y la neblina (Bannister *et al.* 1994; Neugirg *et al.* 2016), se presentaron eventos de lluvia antes del mediodía, y neblina en diferentes momentos de recolección de la información.

## 8. Conclusiones

Las tasas promedio de pérdida de sedimento en las huellas de caminos evaluadas fueron clasificadas como bajas ( $< 2 \text{ t ha}^{-1}$ ) con base en los parámetros dados en las categorías de tasas pérdida de suelo de la FAO, y en Costa Rica se clasifica tolerable por debajo de  $10 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  para condiciones de cultivos.

Los cambios en superficie por pérdida de sedimento fueron evidentes al inicio de la época lluviosa (agosto) y disminuyeron mensualmente hasta noviembre.

Los métodos con estación total y fotogrametría estimaron comportamientos de pérdida y ganancia de altura en superficie (coherencia espacial) mediante los píxeles de MED en caminos descubiertos.

El método de estación total fue el que obtuvo resultados más bajos y estables en promedio total de pérdida de suelo en parcela 1, 6,60 y parcela con 22,73  $\text{g/m}^2$ , mientras que en comparación a fotogrametría sobreestimó hasta un 30% el valor total de pérdida de suelo. La medición en campo con estación total requirió tiempos de hasta 50 minutos, lo contrario con imágenes aéreas que tardó un tiempo menor

a 5 minutos para la captura de información espacial. El método de mayor estabilidad y menor variación espacial fue interpolación

La época de mayor movimiento superficial de pérdida y acumulación de sedimento promedio fue en los meses de septiembre y octubre, siendo los más lluviosos y los que presentaron la mayor cantidad de eventos de lluvia de moderados a fuertes.

Las características de lluvia que correlacionaron más alto con los cambios de la superficie por erosión y deposición fueron: lámina de lluvia, intensidad media e intensidad máxima..

El mantener los caminos sin vegetación posiblemente causó mayor pérdida de sedimentos en todas las parcelas a pesar de que se registraron zonas de acumulación de sedimentos dentro de las áreas monitoreadas, fenómeno propio del proceso erosivo.

## **9. Recomendaciones**

El proceso de medición en cambio de superficie por pérdida de suelo podría ser monitoreado en forma más acelerada mediante el uso de simuladores de lluvia puestos en las mismas huellas del camino. Incluso, hacer seguimiento en caminos bajo otros sistemas de producción de caña, melón, sandía, piña entre otros.

Además, las áreas de estudio de seguimiento en cambio de superficie de camino pueden ser mucho mayores mediante el uso de fotogrametría para obtener mayor dimensión espacial. De esta forma obtener mediciones más amplias y por ende con un menor efecto de variabilidad espacial. Además, se debe encontrar fincas con las condiciones de caminos homogéneos en topografía

Estación total y fotogrametría son dos métodos que facilitan el tiempo y reducen los costos de medición. El método de fotogrametría se deberá mejorar el manejo de la georreferenciación de puntos de control e imágenes aéreas de alta calidad para disminuir la variabilidad de los datos.

Con relación al método con instrumento de estación total, el tener otras opciones como sistema RTK incorporados podría facilitar la recolección de información y con menos variación con los datos geográficos.

Si existe cobertura arbórea muy cercana, se deberá monitorear su crecimiento e invasión del espacio aéreas que requiere el VANT, de lo contrario, los vuelos pueden quedar incompletos o el VANT puede sufrir daños.

Para evitar sombras en las imágenes aéreas, es mejor hacer los vuelos en horas cercanas al medio día, idealmente después de las 11 am.

Se deberá obtener la mayor cantidad de imágenes aéreas posibles que capturen información del objeto en el espacio (Bannister *et al.* 1994) porque esto permitirá tener opciones en el manejo del procesamiento y poder descartar información errónea. Sin embargo, esto último es cuestión de configuración del vuelo.

En estudios futuros se podría descartar cobertura mediante procesamiento de imágenes o control físico de la misma en el campo y quizás se podría obtener resultados con mayor exactitud que contribuyan a reducir valores como los presentados en resultados de fotogrametría.

Finalmente, se deberán realizar obras de conservación de suelo en caminos (especialmente en alta pendiente) como desvío de aguas superficiales dirigidas a cursos de agua naturales y mantener cobertura de caminos.

## 10. Literatura consultada:

- Aguilar, MA; Aguilar, FJ; Negreiros, J. 2009. Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief. *Biosystems engineering* 103(4):504–517.
- Antonio San José Albacete. 2011. Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10. Tesis Magister. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid. 127 p.
- Álvarez-Mozos, J; Abad, E; Giménez, R; Campo, MA; Goñi, M; Arive, M; Casalí, J; Díez, J; Diego, I. 2014. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss (en línea). *CATENA* 118:168-178.
- Arana López, GA. 1992. Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 136 p.
- Ayeni, B; Samuel, KJ. 2014. An evaluation of digital elevation modeling in GIS and Cartography (en línea). *Geo-spatial Information Science* 17(2):139-144.
- Balaguer Puig, M. 2015. Análisis empírico de soluciones fotogramétricas en estudios de erosión hídrica en laboratorio. Universitat Politècnica de València, Valencia, España. 248 p.
- Bannister, A; Raymond, S; Hernández Navarro, A. 1994. Técnicas modernas en topografía. México, Alfaomega. 514 p.
- Bannister, A; Raymond, S; Baker, R. 1998. *Surveying*. 7th ed. Harlow, Essex, England, Addison Wesley Longman Ltd. 502 p.
- Bertsch, F. 2006. El recurso tierra en Costa Rica. *Agronomía costarricense* 30(1) 133-156.
- Betancur, LFR; González, J. 2007. De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 20(2):183-192.
- Bhargava, N; Bhargava, R; Tanwar, PS; Narooka, PC. 2018. Comparative study of inverse power of IDW interpolation method in inherent error analysis of aspect variable (en línea). In Mishra, DK; Nayak, MK; Joshi, A (eds.). Singapore, Springer Singapore, vol.10, (Lecture Notes in Networks and Systems). p. 521-529

- Burroughs, ER; G. King, Jr. J. 1989. Reduction of soil erosion on forest roads (en línea). Consultado 29 ago. 2017. Disponible en <http://digitalcommons.unl.edu/usdafsfacpub/121/>.
- CADETI. 2004. Programa de acción nacional de lucha contra la degradación de tierras. San José, C.R.: MINAE/CADETI. 119 p.
- Calvo-Alvarado, JC; Jiménez-Rodríguez, CD; Jiménez-Salazar, V. 2014. Determining rainfall erosivity in Costa Rica: A practical approach. *Mountain Research and Development* 34(1):48-56.
- Carrera-Villacrés, DV; Guevara-García, PV; Tamayo-Bacacela, LC; Balarezo-Aguilar, AL; Narváez-Rivera, CA; Morocho-López, DR. 2016. Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media (en línea). *Idesia (Arica)* 34(3):81-90.
- Chekole, SD. 2014. Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner: a comparative study. Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology (KTH). 55 p.
- Cubero Fernández, D; Bronzoni, G., Coghi, A., Cubero, D., Dandois, J., Dercksen, P., ... & Ugalde, M. (1994). Manual de manejo y conservación de suelos y aguas Ministerio de Agricultura y Ganadería (Costa Rica); Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1994. San José, Costa Rica. FAO, Italia.
- De Alba, S; Benito, G; Pérez-González, A. 2002. Parcelas experimentales para el estudio de la erosión hídrica: finca experimental la Higuera. Madrid. 13:45-53.
- d'Oleire-Oltmanns, S; Marzloff, I; Peter, K; Ries, J. 2012. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco (en línea). *Remote Sensing* 4(11):3390-3416.
- Eltner, A; Schneider, D. 2015. Analysis of Different Methods for 3D Reconstruction of Natural Surfaces from Parallel-Axes UAV Images (en línea). *The Photogrammetric Record* 30(151):279-299.
- Eltner, A; Schneider, D; Maas, H-G. 2016. Integrated processing of high resolution topographic data for soil erosion assessment considering data acquisition

- schemes and surface properties (en línea). ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B5:813-819.
- ESRI. 2004. Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst (en línea). vol. 3235, 4 pág. Consultado 5 abr. de 2020. Disponible en <https://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf>.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- FAO. 2015. Estado mundial del recurso suelo. organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura y grupo técnico inter gubernamental del suelo, Roma, Italia. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Fawcett, D; Blanco-Sacristán, J; Benaud, P. 2019. Two decades of digital photogrammetry: Revisiting Chandler's 1999 paper on "Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research" – a synthesis (en línea). *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 43(2):299-312.
- Foster, GR; Toy, TE; Renard, KG. 2003. Comparison of the USLE, RUSLE1. 06c, and RUSLE2 for application to highly disturbed lands. s.l., US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Washington, DC. p. 154-160
- Gillan, J; Karl, J; Elaksher, A; Duniway, M. 2017. Fine-Resolution Repeat Topographic Surveying of Dryland Landscapes Using UAS-Based Structure-from-Motion Photogrammetry: Assessing Accuracy and Precision against Traditional Ground-Based Erosion Measurements (en línea). *Remote Sensing* 9(5):437.
- Grigal, DF. 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management* 138(1):167–185.
- Gómez-Delgado, F; Roupsard, O; le Maire, G; Taugourdeau, S; Pérez, A; van Oijen, M; Vaast, P; Rapidel, B; Harmand, JM; Voltz, M; Bonnefond, JM; Imbach, P; Moussa, R. 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica (en línea). *Hydrology and Earth System Sciences* 15(1):369-392.

- Gómez-Delgado, F. 2010. Processus hydrologiques, écophysologiques et de transfert de sédiments dans un bassin agroforestier caféier combinant des approches expérimentales et de modélisation pour les besoins des services hydrologiques environnementaux. Tesis Ph. D. Francia, Montpellier, SupAgro. 311 p.
- Hartshorn, GH; Atmella, L; Gómez, A; Mata, L; Mata, A; Morales, L; Ocampo, R; Pool, R; Quesada, D; Solera, C. 1982. Costa Rica: perfil ambiental. Estudio de campo. s.l., Centro Científico Tropical, San José (Costa Rica).
- Harwin, S; Lucieer, A; Osborn, J. 2015. The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis (en línea). *Remote Sensing* 7(9):11933-11953.
- Huendo, LM; Huerta, YC; Neary, DG. 1996. Sedimentos derivados de los caminos en la cuenca del arroyo El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, México. s.l., DIANE Publishing. p. 189.
- Hudson, N. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Boletín de Suelos de la FAO* 68.
- Hubp, J.L. 2011. *Diccionario geomorfológico*.
- Ibitoye, M. 2017. Application of GPS and Total Station in the Determination of Gully attributes in some Nigerian Cities. *Confluence Journal of Environmental studies* 17(2):139-144.
- Informe Estado de la Nación. 2018. Estado de la nación en desarrollo humano sostenible. San José, C.R. 298 p Disponible en <https://estadonacion.or.cr/informes/>
- Jansson, MB. 2002. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica (en línea). *CATENA* 47(1):63-84.
- Jeffery, P. 1989. Apoyo al servicio nacional de conservación de suelos y aguas, Costa Rica. Informe final de la Misión para el estudio de la erosión de Costa Rica (1: 200.000). (en línea) consultado 13 abr. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/3/ar750s/ar750s.pdf>
- Jorge Núñez Solís. 2001. *Manejo y Conservación de Suelos*. 1ra edición. Editorial EUNED, San José, Costa Rica. 288 p.

- Kravchenko, AN. 2003. Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods (en línea). *Soil Science Society of America Journal* 67(5):1564-1571.
- Lal, R. 2014. Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research* 2(3):36-47.
- Lang, SB. 2000. Effects of logging roads on erosion in a wet tropical forest in the rio Riyito watershed, Península de Osa, Costa Rica. Colorado State University, Fort Collins, CO (EUA). 112 p.
- Mehuys, GR; Tiessen, KHD; Villatoro, M; Sancho, F; Lobb, DA. 2009. Erosión por labranza con arado de disco en suelos volcánicos de ladera en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 205-215
- Ministerio de Agricultura y Ganadería, (MAG). 1998. Ley 7779 uso, manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica.
- Molina, E. 2015. Determinación y cuantificación de la tasa de erosión laminar en cafetales ubicados en la cuenca del Río Jesús María. Licenciatura. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 125 p.
- Morera, J. A. 2000. Agricultura, recursos naturales, medio ambiente y desarrollo sostenible en Costa Rica. *Agronomía mesoamericana* 11(1):179-185.
- Morgan, RPC. 1997. Erosión y conservación del suelo. 2da ed. Madrid, España, Mundi-Prensa. 343 p.
- Morgan, RPC. 2005. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Malden, MA, Blackwell Pub. 304 p.
- Neugirg, F; Stark, M; Kaiser, A; Vlacilova, M; Della Seta, M; Vergari, F; Schmidt, J; Becht, M; Haas, F. 2016. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys (en línea). *Geomorphology* 269:8-22.
- Ouédraogo, MM; Degré, A; Debouche, C; Lisein, J. 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds (en línea). *Geomorphology* 214:339-355.
- Orndorff, Adam. 2017. Evaluating the Effects of Sedimentation from Forest Roads (en línea). s.l., University of Florida Soil and Water Science Department.

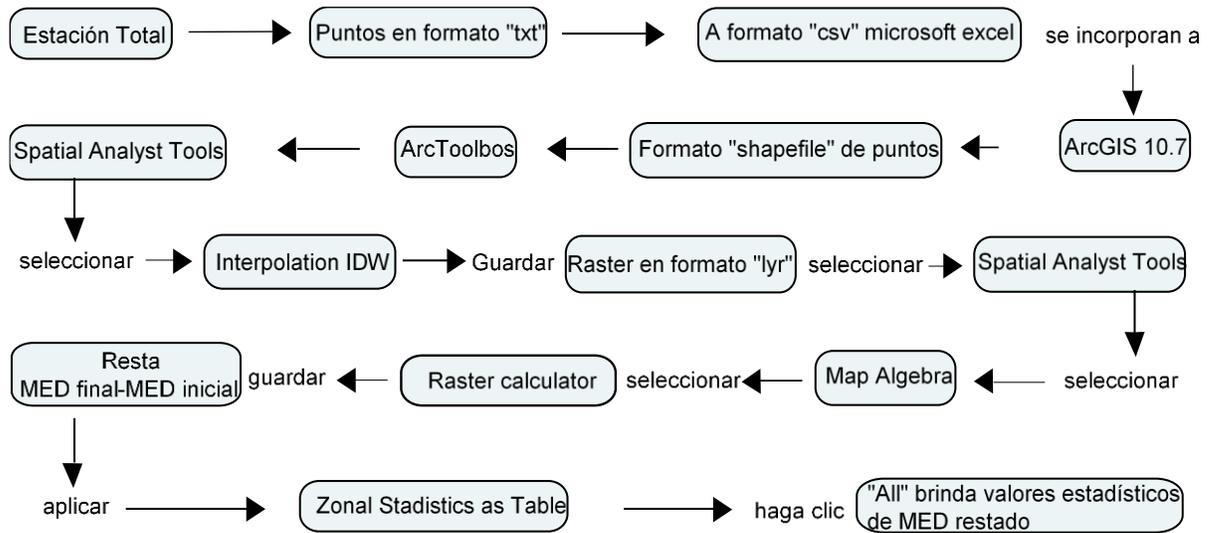
- Disponible en [https://soils.ifas.ufl.edu/media/soilsifasufledu/sws-main-site/pdf/technical-papers/Orndorff\\_Adam\\_Immediate\\_Release.pdf](https://soils.ifas.ufl.edu/media/soilsifasufledu/sws-main-site/pdf/technical-papers/Orndorff_Adam_Immediate_Release.pdf).
- Palacios, A; Alfaro, S. 1993. El modelo USLE en Costa Rica. In. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, CL). Erosión de suelos en América Latina (en línea). Chile. Consultado 13 abr. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S0h.htm>
- Pavlova, AI. 2017. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models (en línea). *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 53(2):171-177.
- Perea Moreno, AJ; Aguilera Ureña, MJ; Meroño De Larriva, JE; Manzano Agugliaro, F. 2017. Empleo de la fotogrametría digital para la evaluación del suelo con riesgo de erosión en olivare. (en línea). *dyna ingeniería e industria* 92(1):55-62.
- Peter, KD; d'Oleire-Oltmanns, S; Ries, JB; Marzloff, I; Ait Hssaine, A. 2014. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data (en línea). *CATENA* 113:24-40.
- Rahman, MdR; Shi, ZH; Chongfa, C; Dun, Z. 2015. Assessing soil erosion hazard - a raster based GIS approach with spatial principal component analysis (SPCA) (en línea). *Earth Science Informatics* 8(4):853-865.
- Ramos Scharrón, CE. 2010. Sediment production from unpaved roads in a subtropical dry setting — Southwestern Puerto Rico (en línea). *CATENA* 82(3):146-158.
- Rebollo, JFV; Molina, JAM. 1988. Impacto de los usos del suelo y erosión en cuencas vertientes del sur del País Valenciano. *Investigaciones Geográficas (Esp)* (6):7-31.
- Renard, KG; USA; USA. eds. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 404 p.
- Rickson, RJ. 2006. Controlling sediment at source: an evaluation of erosion control geotextiles (en línea). *Earth Surface Processes and Landforms* 31(5):550-560.

- Rijsdijk, A; Sampurno Bruijnzeel, LA; Sutoto, CK. 2007. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia (en línea). *Geomorphology* 87(1-2):28-37.
- Rock, G; Ries, JB; Udelhoven, T. 2012. Sensitivity analysis of UAV-Photogrammetry for creating digital elevation model (DEM) (en línea). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22:69-73*.
- Setianto, A; Triandini, T. 2015. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis (en línea). *Journal of Applied Geology* 5(1).
- Solano, S; Aguilar, Jose; Govare, Georges. 2010. Estimation of soil using USLE equation in rio pirrís watershed in Rio Costa Rica. (en línea). s.l., American Society of Agricultural and Biological Engineers. Disponible en <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=29420&t=2&redir=&redirType=>.
- UNESCO, (1982). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de américa del sur. Oficina Regional Ciencia y Tecnología, Unesco para América Latina y el Caribe (ROSTLAC).
- Vahrson, WG. 1991. Taller de erosión de suelos: resultados, comentarios y recomendaciones. Soil erosion workshop: results, comments and recommendations. *Agronomía Costarricense*. 15(1-2):197-203.
- Valverde, SA; Calderón, NG; Contreras, B; Bolaños, CV; Donadio, RR. 2017. Cuantificación de la erosión hídrica mediante fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV).
- Villatoro, M; Henríquez, C; Sancho, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32(1):12.
- Villatoro-Sánchez, M. 2015. Évaluation et modélisation de l'érosion du sol sous différentes pratiques de conservation sur les plantations de café ombragées sur les terres de pente (Ultisols). Tesis Ph. D. Francia, Délivré par Montpellier SupAgro. 164 p.
- Verbist, B; Poesen, J; van Noordwijk, M; Widiyanto; Suprayogo, D; Agus, F; Deckers, J. 2010. Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment

- scale in a tropical volcanic agroforestry landscape (en línea). *CATENA* 80(1):34-46.
- Verheijen, FGA; Jones, RJA; Rickson, RJ; Smith, CJ. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe (en línea). *Earth-Science Reviews* 94(1-4):23-38
- Williams, R. 2012. DEMs of difference. *Geomorphological Techniques* 2(3.2).
- Wischmeier, W. H., 1976. Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 31: 5-9.
- Wischmeier, WH; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. s.l., Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wolf, P; Brinker, R. 2000. Topografía. México, D.F, Alfaomega. 834 p.
- Wolf, PR; Ghilani, CD. 2009. Topografía. México, Alfaomega.
- Xia, Q; Xiu, J; Yang, Z; Liu, C. 2018. An Interpolation Method of Soil Erosion Based on Flexible Factor. *In Proceedings of 2017 Chinese Intelligent Systems Conference*. Jia, Y; Du, J; Zhang, W (eds.). s.l., Springer Singapore. p. 109-119.
- Ziegler, AD; Giambelluca, TW; Sutherland, RA; Nullet, MA; Yarnasarn, S; Pinthong, J; Preechapanya, P; Jaiaree, S. 2004. Toward understanding the cumulative impacts of roads in upland agricultural watersheds of northern Thailand (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(1):145-158.
- Ziegler, AD; Giambelluca, TW. 1997. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand (en línea). *Journal of Hydrology* 196(1):204-229.
- Zhang, Y; Zhao, Y; Liu, B; Wang, Z; Zhang, S. 2019. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau (en línea). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 284:106580.

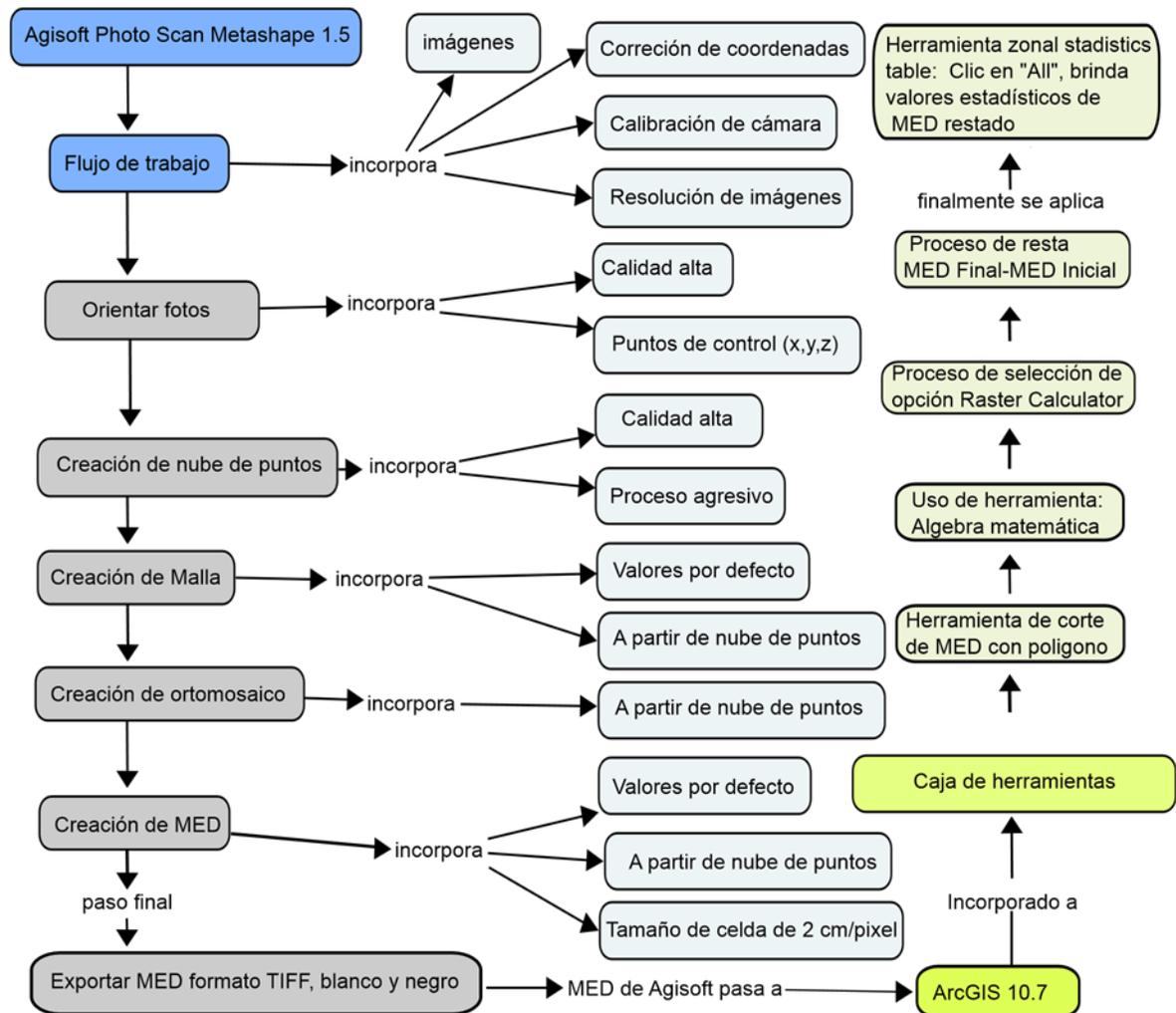
## 11. Anexo I

Guía de trabajo general con el uso de puntos de control con coordenadas para creación de modelos de elevación digital con software ArcGIS 10.7, 2018.



## 12. Anexo II

Pasos del procesamiento de imágenes aéreas de drone DJ Mavic Pro Fly para creación de modelos de elevación digital utilizando Software Agisoft PhotoScan Metashape 1.5 y ArcGIS 10.7, 2018.



### **13. Anexo III**

**Universidad de Costa Rica  
Sistema de Estudios de Posgrado**

**Protocolo para toma de puntos de control geográficos con instrumento de Estación Total modelo GeoMaxPro, interpolados y procesados en ArcGIS 10.7**

**Llano Brenes, San Ramón, Alajuela Costa Rica, 2018.**

**Revisión de materiales de oficina a campo**

1. Machete
2. Cinta adhesiva
3. Cinta métrica
4. Cuadriculas y cuerdas de colores
5. Batería para estación meteorológica
6. Aerosol de color.
7. Estación total (bastón, memoria, batería cargada)

**Colocación de cuerdas en barillas metálicas**

1. Parcela 1: se ubicó en la parte alta la cual hubo una cuerda de color naranja para diferenciar y esta misma se utilizó para toda la evaluación colocándola de la misma forma en todas las evaluaciones
2. Parcela 2: ubicó en la parte media del camino, la cuerda que correspondió el color verde
3. Parcela 3: se ubicó al final del camino, la cuerda que correspondió fue el color amarillo

**Pasos de nivelación del trípode de estación total para calibración en campo:**

Coordenadas definidas

1. Estación 1: Se determinó un punto de referencia para parcelas-1 y 2.

Coordenadas:

X-448637

Y-1,106,478

Z-1259 msnm

Altura de estación con punto de referencia: 1,53 m

2. Estación 2: Este punto de referencia estuvo ubicado cercano a parcela-3.

Coordenadas:

X- 448599

Y-1,106,462

Z-1259 msnm

Altura de estación con punto de referencia: 1,32 m, esto se midió con cintra métrica desde la base del suelo hasta la parte alta de estación total. El valor de altura de le se incorporó a la base de datos del trabajo al igual que las coordenadas.



### Primer paso con instrumento en campo:

1. Se debe fijar una pata del instrumento en el suelo y las otras dos patas para ajustar largo y acercar laser que apunte a la estaca en el suelo como referencia
2. Se utilizó GPS para las tomas de coordenadas.
3. Observar el nivel de burbuja de la base de la estación ajustando las 2 patas libres del trípode
4. Ajustar con 3 tornillos (calantes) de la base observando X, Y en la pantalla y lograr menos de 35"
5. Para Activar laser > presionar: FNC > nivelación (F1) > plomada > colocar coordenadas de X y Y
6. Cambio entre uso de laser o prisma > presionar FNC: F1 punto laser o F2: cambio > prisma/ no prisma.



### Colocación de datos en dispositivo de estación

1. Presione Menú > F1: Gestión de datos > F1 medición > selección de trabajo (definirlo, con nombre y usuario).

Se deberá llenar los siguientes datos:

Usuario: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Hora: \_\_\_\_\_

2. Presione > **ok**
3. Presione Menú > F2: Bases (del punto en la estación, X y Z) aquí se colocan las coordenadas obtenidas mediante GPS para calibrar los puntos de interés de investigación, los cuales quedaran desde inicio hasta final del estudio.

Coordenadas: Pt: colocar nombre de primer punto o base

Y: \_\_\_\_\_ m

X: \_\_\_\_\_ m

Z: \_\_\_\_\_ m

4. Presionar Menú > F3: > F1: Medición > F2: Selección estación

Orientación (2 opciones): 1) No usar X, Y y Z > Entrada ángulo > orientar norte > HZ = 0

F3> orientación > F2 usa X, Y y Z

Para colocar códigos:

5. Presionar Menú > F4 códigos: empezar > gestión datos

Aparecerá opción P1 el cual da inicio para tomar puntos de control con láser hacia prisma.

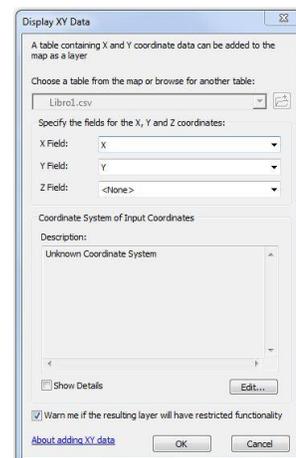
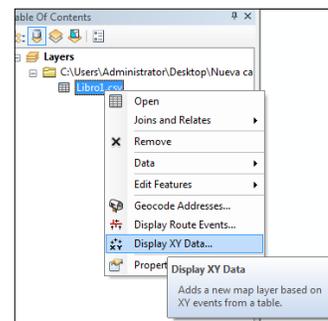


### Creación de archivo “shapile (shp)” de puntos de control geográficos

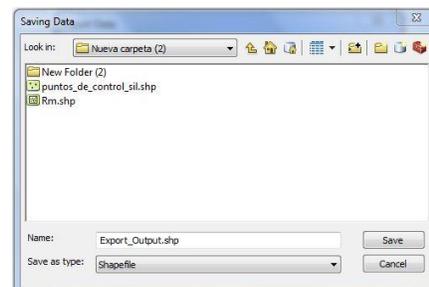
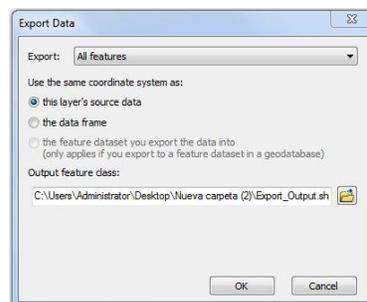
Los puntos de control contaban con coordenadas de X, Y y Z, los cuales se ordenaron en excel y luego fue convertido a csv para que ArGIS lea el formato.

Los principales pasos en el procesamiento son los siguientes:

1. Haga clic > Add Data > archivo de excel
2. Haga clic > derecho sobre archivo
3. Haga clic > display XY Data
4. Por defecto dejar “X”
5. Por defecto dejar “Y”
6. El valor de altura de interés < zone > colocar “Z”
7. Haga clic > Edit – buscar coordenadas de país
8. Haga clic > en “**ok**”



9. guardar archivo
10. Haga clic > derecho sobre el archivo creado para guardarlo en carpeta de interés en formato “shp”
11. Haga clic > Data > Export Data  
Aparecerá un cuadro de diálogo
12. Haga clic > en “This layer’s source data”
13. Haga clic > en “ouptut feature dass”- buscar carpeta donde se va guardar el archivo
14. Colocar nombre > name
15. Seleccionar > save as type > “shapile”
16. Haga clic > **save**



¡Listo! capa creada a partir de puntos

### Aplicación de Interpolación a los puntos de control para creación de MED

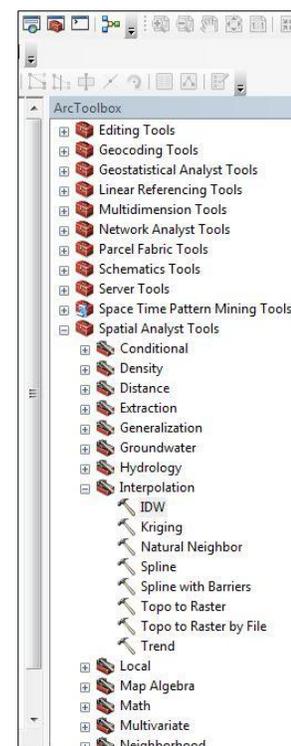
1. Incorporar archivos raster o MED > Add Data
2. Haga clic > caja de herramientas > ArcToolbox
3. Haga clic > Spatial Analyst Tools
4. Haga clic > interpolation
5. Haga clic > en icono “martillo” Clic > IDW (Inversal Distance Weight)

Aparecerá un cuadro de diálogo:

1. Haga clic > Imput point features > capa raster de interés  
Z value field > ID, X, Y, colocar “Z”  
Output raster > dejar por defecto  
Ouput Cell size (optional) > se asignó el valor de pixel de 0,02 cm  
Power optional > dejar por defecto

2. Haga clic > **ok**

Para guardar el archivo con la interpolación realizada se convierte de capa de puntos a capa interpolada, en este caso modelo de elevación digital de superficie por puntos de control.



- Haga clic > derecho encima de capa > Save As Layer File > aparecer un cuadro de diálogo haga clic > se puede cambiar nombre quedará guardado como archivo "lyr" haga clic en **Save** en carpeta de interés.

¡Listo!

### Creación de polígono para delimitar MED

- Haga clic > en cuadro > catalog

En el cuadro de catalog se debe buscar carpeta de interés

- Haga clic > derecho sobre la carpeta > buscar opción "new" > shapefile...

Créate New Shapefile > colocar nombre

Seleccionar > polygone

Buscar coordenadas > ejemplo CRTM05

- Haga clic > ok

- Una vez creado el shapefile de polígono haga clic > derecho sobre el archivo

- Haga clic > Edit features > Star editing

- Haga clic > en barra editor > haga clic en features > aparecerá un cuadro donde está el archivo de polígono

- Haga clic > en archivo de polígono y eso habilitará la edición apareciendo una cruz en el cursor, también estarán otras opciones de editar como rectangle, circle, ellipse y otros.

- Haga clic con el cursor y eso colocará puntos de sus intereses para delimitar el área deseada

- Al finalizar el polígono haga clic doble donde termine el polígono y esto lo deja finalizado

- Haga clic > en barra editor > Stop Editing

- Haga clic > derecho encima del polígono en área de trabajo

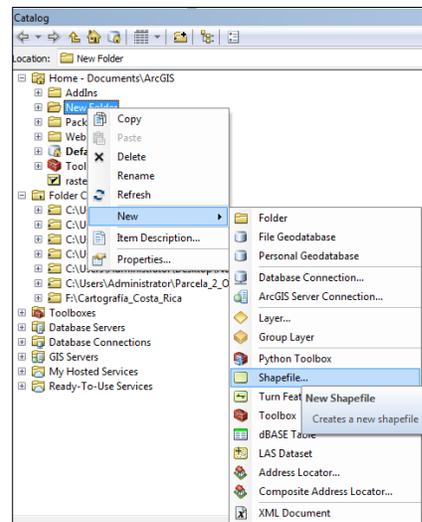
- Haga clic > data > export data >

- Haga clic > en carpeta donde lo guardara

- Haga clic > **ok**

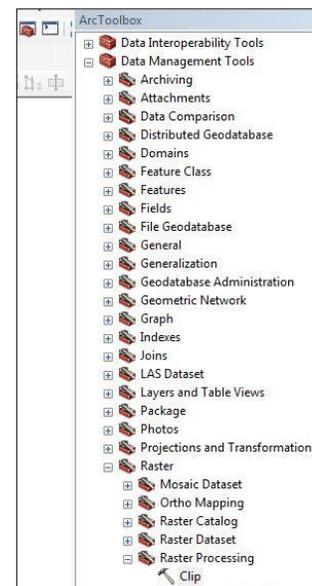
### Recorte de MED por medio de polígono de línea sencilla

Insertar capa interpolada o raster creado puede ser formato shp o lyr



Pasos:

1. IDW\_raster > este es un nombre “como ejemplo”
2. Haga clic > caja de herramientas > Data Management Tools > Raster > Raster Processing
3. Doble clic > icono “martillo” > Clip  
Aparecerá un cuadro de diálogo:
4. Input raster  
Seleccionar IDW raster
5. Output Extent (Optional)  
Seleccionar polígono
6. Dejar coordenadas por defecto
7. Haga clic > en “Use Input Features for Clipping Geometry (Optional)”
8. Output Raster Dataset > carpeta donde guardará y nombrará el polígono  
NoData Value (Optional)
9. Se agregó un valor de -9999 valor por defecto para pixeles que no hubo información
10. Haga clic > **ok**



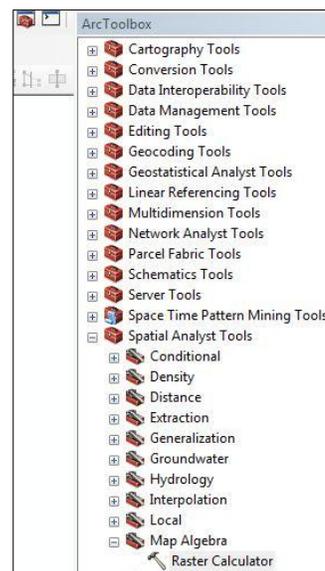
Este recorte funcionó para delimitar el área, el recorte de capa interpolada fue el que se utilizó en los siguientes procesos.

Aparecerá tabla de diálogo:

11. Haga clic > derecho sobre el archivo recortado
12. Haga clic > Save Data > guardar como archivo shapefile en carpeta deseada

### Aplicación de calculadora raster

1. Insertar archivos MED recortados en caso son 2 o más archivos editados
2. Haga clic > ArcToolBox  
>Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator  
Aparecerá un cuadro diálogo:
3. Layer and variables  
Ejemplo:



IDW\_raster\_1

IDW\_raster\_2

- Haga clic > “IDW\_raster\_2 seleccionar signo de resta (-) para iniciar resta IDW\_raster\_1”

“IDW\_raster\_2 IDW\_raster\_1” raster final menos raster inicial es igual a

MED o raster de diferencia

Ejemplo de resultado:

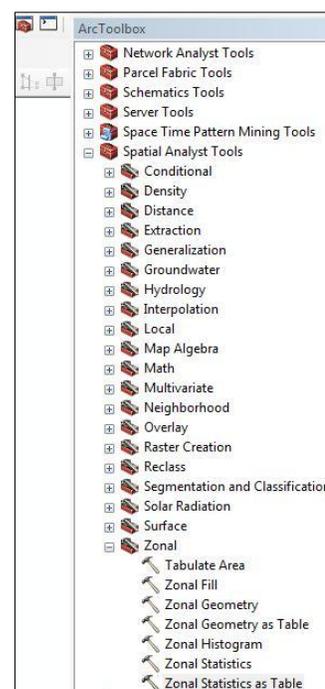
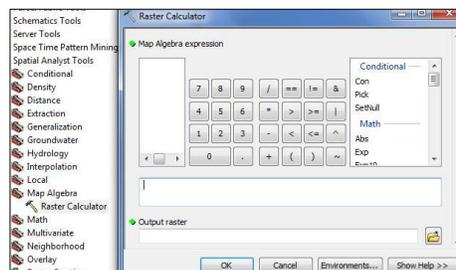
IDW\_resta\_2-1

- Haga clic > **ok**
- Haga clic > derecho sobre el archivo y se guarda en carpeta deseada

### Aplicación estadística a los MED o capas raster

- Insertar archivo recortado, y IDW\_RESTA\_2-1 resultado anterior
  - Haga clic > Spatial Analyst Tools > Zonal
  - Haga clic > icono “martillo” > Zonal Statistic as Table
- Aparecerá un cuadro de diálogo:
- En Input > Polígono para delimitar área de interés, archivo guardado de recorte
  - En Zona field > ID > Input > IDW\_Resta\_2-1 se aplicará estadística al resultado de MED de diferencias.
  - En Output table > guardar en carpeta deseada
  - En Statistics type > All > haga clic > aplicar todos los parámetros estadísticos que aparecen
  - Haga clic > **ok**

Una vez terminado la aplicación de estadística sobre el archivo haga clic > derecho exportar archivo en formato “dbs” este es reconocido por excel.



## **14. Anexo IV**

### **Universidad de Costa Rica Sistemas de estudios de posgrado**

#### **Procesamiento de Imágenes aéreas en Agisoft Metashape Professional**

##### **Llano Brenes, San Ramón, Alajuela Costa Rica, 2018.**

Algunos de los pasos importantes fueron tomados del siguiente documento de (USGS- Science for a changing world 2017), fue una guía importante para conocer mejor el proceso.

##### **Materiales para campo**

1. Tableta o celular para Drone
2. Drone (baterías cargadas, control, memoria)
3. Rampa de aterrizaje del Dron

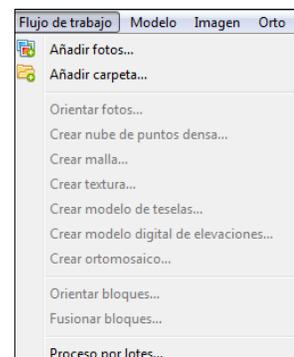
##### **Pasos para toma de imágenes aéreas**

1. se colocó rampa de despegue del Dron.
2. se verificó controles, baterías, protección de cámara del drone y actualizaciones de aplicaciones de Tableta Inteligente.
3. se midió la velocidad del viento y se tomó en cuenta la nubosidad para tener mayor iluminación.
4. se colocó cuadros de colores en las varillas metálicas de referencia para puntos de control en imágenes aéreas
5. se revisó posibles obstáculos en los caminos, rocas, ramas de árboles.
6. se inició el primer vuelo en parcela-3
7. se inició el segundo vuelo para las parcelas 1 y 2 en un solo vuelo

##### **Flujo de trabajo en software**

1. Hacer clic en “añadir fotos”. Selecciona las fotos que se utilizarán.
2. Corregir coordenadas y usar CRTM05, Costa Rica.
3. Hacer clic en barra de referencia “convertir coordenadas”.

4. Hacer clic en barra herramientas, calibración de cámara > haga clic en Rolling shutter. Automáticamente la versión toma los datos de calibración de cámara, eso evita hacer otros procesos externos.
5. En barra de visualización de imágenes, haga clic > derecho encima de imágenes de interés
6. Hacer clic en “estimar calidad de imágenes”
7. Hacer clic todas las cámaras
8. Hacer clic en detalles para ver la calidad de imágenes, esta no debe ser inferior a 0,7 debe deshabilitarse o eliminarse.
9. Revisar y quitar fotos > haga clic derecho sobre la foto > “deshabilitar cámaras”.
10. Este proceso se realiza debido a que las fotografías captan niebla, ramas de árboles, si hay vientos fuertes estps desplazan el dron, lo que provoca una baja resolución en las imágenes e induce al incremento de errores en barra de referencia en “altitud en m”.



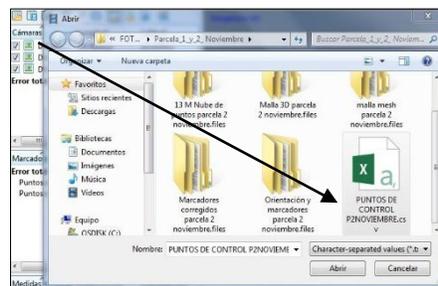
### Orientación o alineamiento de fotos

1. Flujo de trabajo
2. Hacer clic orientación: seleccionar precisión “máxima o alta”, dejar en alta si las imágenes son de muy buena resolución.
3. Pre-selección genérica activado
4. Pre-selección de referencia activado.
5. Puntos claves 60,000 y 0 enlace por foto (esa cantidad de puntos funciona muy bien, se realizó una prueba en el procesamiento vrs 40,000 y 10,000 estos valores aumentaban el error en las alturas)
6. Adaptativo ajuste del modelo de cámara activado.
7. Esto puede tardar unos 4 o 5 minutos, o más dependiendo la cantidad y calidad de imágenes y de la capacidad de la computadora. Después de este paso permite observar el MED de área fotografiada en 3D.



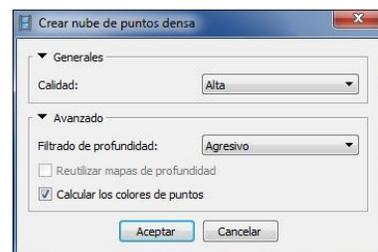
### 3.3 Incorporación de puntos de control (georreferenciación de imágenes).

1. Los puntos de control fueron adquiridos de estación total o una fuente propia, estos se crearon en excel en 3 columnas de X, Y, y Z con opción de “número” para coordenadas y “texto” para títulos y numeración
2. Se deberá guardar como archivo CSV (del inglés comma-separated values) para que sea compatible con Agisoft.
3. En barra de referencia: > haga clic “importar”
4. Hacer clic en “si a todo”, aparecerán los puntos con coordenadas en metros.
5. En “referencia” debe quedar fotos y puntos de control o “marcadores” en la parte baja, se debe observar el error de ambos datos. Desplazando las barras hacia la derecha.



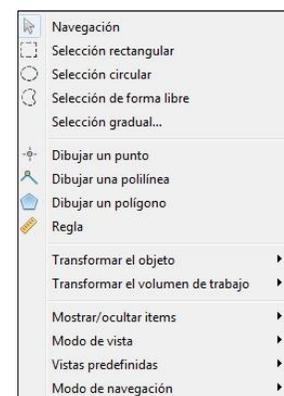
#### Optimización de fotografías y puntos

1. En este paso la optimización crea la georreferenciación o traslape entre puntos e imágenes aéreas. Eso permitió que el modelo de elevación digital fuera creado y leído en programas como ArGIS o QGIS.
2. Hacer clic > en “barita mágica, o estrellita optimizar cámaras” esto lo que hace es enlazar fotos con puntos de control para su georreferenciación.
3. Dentro de este proceso puede disminuirse el error por cada proyección, es decir, una proyección es un punto en una imagen.
4. Se debe revisar minuciosamente imagen por imagen y punto por punto, que calce en el cuadro de color.
5. La optimización se puede realizar varias veces para disminuir el error, funciona como una actualización de proceso.



## Nube de puntos densa

1. Este proceso es el que presenta mayor duración en un promedio de 30 imágenes y 15 puntos de control, puede tardar aproximadamente entre 2 a 3 horas, también, dependerá de la cantidad y resolución de las imágenes.
2. Una vez creada la nube de puntos de densa este permite crear los siguientes procesos en menor tiempo. Malla, textura, téselas, modelo de elevación digital y ortomosaico. Estos son el producto final de acuerdo al interés del investigador.
3. En los procesos de optimización y nube de puntos densa pueden utilizarse opciones para eliminar formas espaciales en los modelos para disminuir el tiempo de procesamiento.
4. Haga clic en modelo > “selección rectangular, selección circular, selección libre” estas permiten eliminar información de puntos del modelo, como por ejemplo copas de árboles o superficie que no es de interés. Al realizar este proceso permite que el procesamiento sea más rápido.
5. Hacer clic > en crear nube densa
6. Hacer clic > calidad “alta”
7. Hacer clic > filtrado “agresivo”
8. calcular colores de puntos
9. Hacer clic en “aceptar”, a esperar...
10. Nota: es importante tener una copia de cada proceso para evitar volver a empezar, es decir el guardar el proceso de “orientación” permite regresar a ese proceso y no realizarlo nuevamente.
11. Una vez creada la nube de puntos densa, y los procesos anteriores. En barra de herramientas se pueden visualizar los productos resultados de cada proceso como vista previa.



## Creación de malla

1. Al crear este proceso activa el proceso de creación del ortomosaico.
2. Cada proceso debe llevar una guía del procesamiento, por ejemplo: >crear malla > a partir de nube de puntos densa > número de cara “alta” > arbitrario 3D

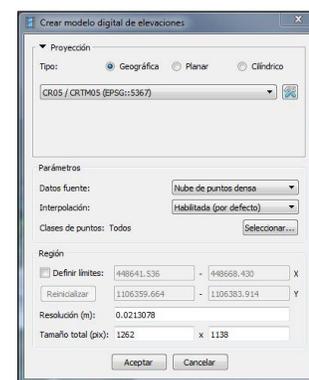
3. (No a partir de nube de puntos dispersos, proceso que no se realizó).

### Creación de textura

Al haber realizado unas pruebas del proceso de textura, se consideró no realizar este paso por que no alteraba el resultado más dominante que fue el de nube de puntos, con la creación del proceso de malla activo los demás procesos de interés.

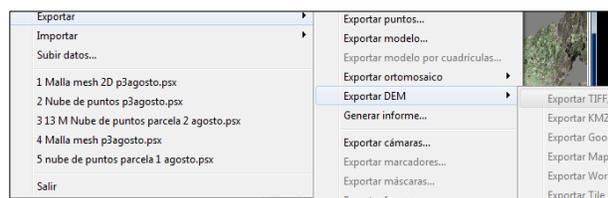
### Creación de téселas

Los últimos dos procesos de textura y téселas, en esta investigación no fueron de mayor utilidad. Estos procesos pueden realizarse para mejorar la práctica y observar las superficies creadas a partir de las imágenes aéreas.



### Creación de Modelo de Elevación Digital

1. Los MED pueden exportarse en RGB o blanco y negro, este es el resultado de la creación de la superficie del suelo mediante imágenes aéreas.
2. Tipo: geográfico, se debe revisar que tenga las coordenadas geográficas del país de investigación CRTM05.
3. A partir de nube de puntos > por defecto > puntos por defecto > resolución debe definirse se acuerdo al interés de la investigación
4. Haga clic > “aceptar”
5. Haga clic en archivo > exportar > formato TIFF



### Creación de ortomosaico

1. Este es mosaico de todas las imágenes creadas, capta los límites de información de área estudiada. Este modelo es de gran importancia para observar a detalle marcas de interés en la superficie, contribuye en la

visualización de la superficie con alta resolución. Esta puede ser utilizada para presentaciones, en softwares cartográficos.

2. Puede exportarse como formato TIFF.
3. Puede ser utilizado como fondo o mapa de referencia del estudio.
4. Haga clic en archivo > exportar > formato TIFF

### **Proceso externo creado en software ArcGIS**

1. Una vez exportado el MED de imágenes aéreas, este se convirtió en formato compatible por softwares como ArcGIS, QGIS, los cuales permitieron observar a detalle, con diferentes opciones de editar a los MED.

### **Referencia:**

USGS- Science for a changing world. 2017. Unmanned Aircraft Systems Data Post-Processing (en línea). s.l., s.e. Disponible en <https://uas.usgs.gov/nupo/pdf/PhotoScanProcessingDSLRLMar2017.pdf>

## 15. Anexo V

Correlación de nueve datos de sedimento erosionado y depositado contra características de lluvia, con el uso de las 3 parcelas y las dos metodologías.

Parcelas	Estación total		Fotogrametría		
	sedimento (g/m <sup>2</sup> )	lámina lluvia	parcelas	sedimento (g/m <sup>2</sup> )	lámina lluvia
1. ago-set	-6,1	210,9	1. ago-set	-4,6	210,9
2. set-oct	-2,4	330,2	2. set-oct	-3,9	330,2
3. oct-nov	-11,3	89,0	3. oct-nov	-13,5	89,0
1. ago-set	-5,8	210,9	1. ago-set	-13,0	210,9
2. set-oct	-1,3	330,2	2. set-oct	109,9	330,2
3. oct-nov	-1,1	89,0	3. oct-nov	-13,5	89,0
1. ago-set	-2,1	210,9	1. ago-set	-2,3	210,9
2. set-oct	2,9	330,2	2. set-oct	60,8	330,2
3. oct-nov	17,4	89,0	3. oct-nov	22,8	89,0
correlación		-0,1	correlación		0,6
sedimento		total tiempo mm	sedimento		total tiempo mm
1. ago-set	-6,1	19380,0	1. ago-set	-4,6	19380,0
2. set-oct	-2,4	8550,0	2. set-oct	-3,9	8550,0
3. oct-nov	-11,3	43500,0	3. oct-nov	-13,5	43500,0
1. ago-set	-5,8	19380,0	1. ago-set	-13,0	19380,0
2. set-oct	-1,3	8550,0	2. set-oct	109,9	8550,0
3. oct-nov	-1,1	43500,0	3. oct-nov	-13,5	43500,0
1. ago-set	-2,1	19380,0	1. ago-set	-2,3	19380,0
2. set-oct	2,9	8550,0	2. set-oct	60,8	8550,0
3. oct-nov	17,4	43500,0	3. oct-nov	22,8	43500,0
correlación		0,2	correlación		-0,5
sedimento		int.media mensual	sedimento		int.media mensual
1. ago-set	-6,1	0,01	1. ago-set	-4,6	0,01
2. set-oct	-2,4	0,04	2. set-oct	-3,9	0,04
3. oct-nov	-11,3	0,00	3. oct-nov	-13,5	0,00
1. ago-set	-5,8	0,01	1. ago-set	-13,0	0,01
2. set-oct	-1,3	0,04	2. set-oct	109,9	0,04
3. oct-nov	-1,1	0,00	3. oct-nov	-13,5	0,00
1. ago-set	-2,1	0,01	1. ago-set	-2,3	0,01
2. set-oct	2,9	0,04	2. set-oct	60,8	0,04
3. oct-nov	17,4	0,00	3. oct-nov	22,8	0,00
correlación		0,00	correlación		0,7
sedimento		Int. media 30 min	sedimento		Int.media 30 min
1. ago-set	-6,1	13,5	1. ago-set	-4,6	13,5
2. set-oct	-2,4	6,0	2. set-oct	-3,9	6,0
3. oct-nov	-11,3	30,0	3. oct-nov	-13,5	30,0
1. ago-set	-5,8	13,5	1. ago-set	-13,0	13,5
2. set-oct	-1,3	6,0	2. set-oct	109,9	6,0
3. oct-nov	-1,1	30,0	3. oct-nov	-13,5	30,0
1. ago-set	-2,1	13,5	1. ago-set	-2,3	13,5
2. set-oct	2,9	6,0	2. set-oct	60,8	6,0
3. oct-nov	17,4	30,0	3. oct-nov	22,8	30,0
correlación		0,2	correlación		-0,5
sedimento		intensidad máxima	sedimento		intensidad máxima
1. ago-set	-6,1	19,6	1. ago-set	-4,6	19,6
2. set-oct	-2,4	32,8	2. set-oct	-3,9	32,8
3. oct-nov	-11,3	33,6	3. oct-nov	-13,5	33,6
1. ago-set	-5,8	19,6	1. ago-set	-13,0	19,6
2. set-oct	-1,3	32,8	2. set-oct	109,9	32,8
3. oct-nov	-1,1	33,6	3. oct-nov	-13,5	33,6
1. ago-set	-2,1	19,6	1. ago-set	-2,3	19,6
2. set-oct	2,9	32,8	2. set-oct	60,8	32,8
3. oct-nov	17,4	33,6	3. oct-nov	22,8	33,6
correlación		0,3	correlación		0,4