

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



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

“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS MAREAS DEL RÍO CAÑAS Y
BEBEDERO MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN
Y SU CORRELACIÓN CON EL NIVEL FREÁTICO DE 154 HECTÁREAS DE
SIEMBRA DE CAÑA DE AZÚCAR (*SACCHARUM OFFICINARUM*) UBICADAS EN
EL INGENIO TABOGA, CAÑAS, GUANACASTE.”

AUTOR: DIMAS GERARDO ARRIETA CHAVES

CARTAGO, 2021.

“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS MAREAS DEL RÍO CAÑAS Y
BEBEDERO MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN
Y SU CORRELACIÓN CON EL NIVEL FREÁTICO DE 154 HECTÁREAS DE
SIEMBRA DE CAÑA DE AZÚCAR (*SACCHARUM OFFICINARUM*) UBICADAS EN
EL INGENIO TABOGA, CAÑAS, GUANACASTE.”

Autor: Dimas Gerardo Arrieta Chaves

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

Kerin Romero Calvo

Asesor

Isabel Guzmán Arias

Directora Escuela Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2021



CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

A las 8:00 horas del día 17 del mes de Junio del año 2022 el estudiante:
Dimas Gerardo Arrieta Chaves

presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

Análisis de la influencia de las mareas del río Cañas y Bebedero mediante imágenes satelitales e índices de vegetación y su correlación con el nivel freático de 154 hectáreas de siembra de caña de azúcar (*saccharum officinarum*) ubicadas en el Ingenio Taboga, Cañas, Guanacaste.

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Laura Segura Serrano

Asesor (a) de la Escuela: Kerin Romero Calvo

Lector (a): Alexa García Barrantes

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

LAURA PATRICIA
SEGURA SERRANO
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
LAURA PATRICIA SEGURA
SERRANO (FIRMA)
Fecha: 2022.06.17
18:06:26 -06'00'

PRESIDENTE (A)

Alexa G.

LECTOR (A)

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Firmado digitalmente
por KERIN FABIAN
ROMERO CALVO (FIRMA)
Fecha: 2022.06.17
11:30:42 -06'00'

ASESOR (A) DE LA ESCUELA



ESTUDIANTE

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico primeramente a Dios, por darme la fortaleza para culminar esta etapa llena de enseñanzas, y a mi familia, por ser pilar fundamental en mi vida y por ayudarme a concluir mis estudios universitarios.

Agradecimientos

A mi hermana Katherine, por su apoyo y motivación incondicional en cada etapa de mi vida, y, sobre todo, gracias por siempre creer en mí. Por estar conmigo en los momentos difíciles, por compartir mis victorias y logros, y por darme tantas lecciones de vida de manera que nunca encontraré la manera de agradecerle lo suficiente.

A las diferentes personas que fueron parte de esta etapa y que de alguna u otra manera lo hicieron más llevadero y me ayudaron a concluirlo, en especial a Enrique, Varo, Nati, Sergio y Raquel; gracias por ser parte de este viaje y de mi vida, gracias por los consejos, gracias por la motivación y gracias por formar parte de memorias inolvidables.

A David; gracias por ser un amigo incondicional y estar siempre presente desde el día que nos conocimos. A su familia por hacerme sentir que soy parte de ella.

Al personal de la Escuela de Ingeniería Agrícola por contribuir en mi formación como estudiante y profesional, en especial a los profesores Fernando Watson, Juan Carlos Jiménez y mi asesor, Kerin Romero.

A mis compañeros durante mi estancia en el Ingenio Taboga, gracias por acoplarme al grupo y por su constante apoyo y motivación, en especial a Bianka, Chino (Berny), Alexa, Andrey, Josué, Douglas y Jairo. También, a Fabricio Camacho, por las facilidades brindadas y el conocimiento transmitido en dicho periodo.

-Y por último, pero no menos importante, quiero agradecerme. Quiero agradecerme por creer en mí. Quiero agradecerme por hacer todo este trabajo duro. Quiero agradecerme por nunca renunciar.-

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	14
ABSTRACT	15
1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo General.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1 Caña de azúcar	20
2.2 Caña de azúcar en Costa Rica.....	20
2.2.1 Variedades	21
2.2.2 Riego y drenaje en caña de azúcar.....	23
2.3 Niveles freáticos	24
2.4 Pozos de observación.....	26
2.4.1 Frecuencia de las lecturas en pozos de observación.....	27
2.4.2 Métodos de medición	27
2.5 Isóbatas	28
2.5.1 Elaboración de isóbatas	28
2.6 Isohypsas.....	29
2.6.1 Elaboración de las Isohypsas	29
2.7 Teledetección	29
2.7.1 Teledetección en la Agricultura.....	30
2.8 Sensores remotos	32
2.8.1 Clasificación de los sensores remotos	33
2.8.2 Resolución y plataformas de sensores remotos	33

2.8.3	Principales satélites disponibles	35
2.8.4	Sentinel 2	36
2.8.5	Satélite Sentinel	37
2.8.6	Sentinel 1	38
2.8.7	Uso de sensores en el ámbito agrícola.....	38
2.8.8	Detección remota con drones	39
2.9	Espectro electromagnético	40
2.9.1	Bandas espectrales utilizadas en agricultura	42
2.10	Índices de Vegetación	43
2.10.1	NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	44
2.10.2	GNDVI (Índice de Vegetación Normalizada Verde)	46
2.10.3	Diferencia entre NDVI y GNDVI	46
2.10.4	NDRE (Borde Rojo de Diferencia Normalizada).....	47
2.10.5	NDMI (Índice de Diferencia Normalizada de Humedad)	48
2.10.6	SAVI (Índice de Suelo Ajustado).....	49
2.10.7	EVI (Índice de Vegetación Mejorado)	50
2.10.8	GCI (Índice de Clorofila Verde).....	51
2.11	Sistemas de Información Geográfico (SIG).....	51
2.11.1	Componentes de un SIG	52
2.11.2	Funcionamiento de los Sistemas de Información Geográfica	53
2.11.3	Agricultura de precisión y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ...	54
2.12	Datos espaciales	54
2.12.1	Componentes de los datos geoespaciales	55
2.12.2	Formatos de datos espaciales.....	57
2.12.3	Modelo ráster	57

2.12.4	Características de las imágenes y tratamiento de la información.....	59
2.12.5	Modelo vectorial.....	59
2.12.6	Análisis espacial.....	61
2.13	Generación de productos.....	63
2.13.1	Google Earth Engine (GGE).....	64
2.13.2	Plataforma de Google Earth Engine.....	65
2.13.3	Agricultura de precisión.....	66
2.14	Correlación estadística e Índices de correlación.....	68
2.14.1	Prueba estadística T de Student.....	68
2.14.2	Procedimiento de desarrollo de prueba T de Student.....	69
2.14.3	Coefficientes de correlación de Pearson (r).....	70
2.14.4	Coefficiente de determinación (R^2).....	72
2.14.5	Relación entre R^2 y r.....	73
2.15	Drenaje.....	74
2.15.1	Drenaje superficial.....	74
2.15.2	Drenaje subterráneo.....	74
2.15.3	El drenaje y su relación con el suelo y los cultivos.....	75
3	METODOLOGÍA.....	76
3.1	Flujograma de trabajo.....	77
3.2	Selección del área de estudio.....	77
3.3	Instalación de pozos de observación.....	79
3.4	Mediciones en pozos de observación.....	84
3.5	Cálculo del Índices de Vegetación.....	87
3.6	Tratamiento estadístico de datos obtenidos.....	88
3.7	Elaboración de mapas de isóbatas e isohypsas.....	88

3.8	Análisis de correlaciones entre datos.....	89
3.8.1	Correlación Precipitaciones Vs. Nivel freático	89
3.8.2	Correlación Nivel freático Vs Índices de Vegetación	90
3.8.3	Análisis 1: Promedios de mediciones de Nivel freático vs Índices puntuales de Vegetación.....	90
3.8.4	Análisis 2: Rangos de datos de Nivel Freático vs Promedios de Índices de Vegetación.....	90
3.8.5	Selección del índice con mejor correlación.....	91
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
4.1	Etiquetado para el manejo de datos	93
4.2	Efecto de las mareas sobre niveles freáticos.....	93
4.2.1	Prueba t de Student como validación	95
4.3	Efecto de las lluvias sobre niveles freáticos	95
4.4	Correlaciones encontradas entre Niveles Freáticos e Índices de Vegetación.....	102
4.4.1	Promedios puntuales de mediciones de niveles freáticos Vs Índices de Vegetación.....	102
4.4.2	Rangos de datos de Nivel Freático vs Promedios de Índices de Vegetación.....	105
4.4.3	Selección del índice representativo del estudio.....	112
4.4.4	Análisis general de las correlaciones encontradas.....	112
4.5	Isóbatas e Isohypsas.....	115
4.6	Valoración ambiental y económica.....	117
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
5.1	Conclusiones.....	119
5.2	Recomendaciones	119
6	BIBLIOGRAFÍA.....	121
7	ANEXOS.....	126

Anexo 1. Fotografías del área de estudio	127
Anexo 2. Gráficas obtenidas del Análisis 1 (Promedios puntuales de mediciones de niveles freáticos Vs Índices de Vegetación)	131
Anexo 3. Tabla t-Student.....	134
Anexo 4. Promedios de variación obtenidos para las fechas de medición de niveles freáticos en los meses de setiembre y octubre.....	135

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Principales satélites disponibles para aplicaciones agrícolas. (Fuente: Adaptado de Andreu et., al 2021)	35
Cuadro 2. Valores de correlación de Pearson y su significado. (Fuente: Suárez, 2011)	72
Cuadro 3. Información de lotes de estudio.	78
Cuadro 4. Rangos de fechas asignados para periodos quincenales en el periodo de toma de datos.....	87
Cuadro 5. ID Asignado a cada pozo para su manejo.....	93
Cuadro 6. Variaciones promedio de mediciones de Nivel Freático para Finca sur.....	94
Cuadro 7. Resultados obtenidos en prueba t de Student con promedios de Nivel Freático para mañana y tarde.....	95
Cuadro 8. Pluviómetros de influencia para Lote y Pozo.	96
Cuadro 9. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.	104
Cuadro 10. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.	104
Cuadro 11. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.	112
Cuadro 12. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.	113
Cuadro 13. Porcentajes de clasificación de datos de R^2	114

Índice de Figuras

Figura 1. Pozo perforado hasta la tabla de agua. (Fuente: Villón, 2007).	25
Figura 2. Perfil de humedad en el suelo. (Fuente: Villón, 2007)	26
Figura 3. Sondas para medir la profundidad del nivel freático. (Fuente: Villón, 2007).....	27
Figura 4. Espectro electromagnético.	32
Figura 5. Bandas del Satélite Sentinel 2.	37
Figura 6. Regiones del Espectro electromagnético. (Fuente: Bautista & Palacio, 2011).....	41
Figura 7. Espectro electromagnético. (Fuente: Torres, 2017)	43
Figura 8. Rangos de clasificación para NDVI. Fuente: (Toribio, 2019).	45
Figura 9. Ejemplo de diferencias entre índices GNDVI y NDVI. Fuente: (Calo, 2018)	47
Figura 10. Fórmulas de cálculo del índice SAVI para distintos sensores. (Fuente: Muñoz, 2013).....	50
Figura 11. Celdas de una malla ráster con sus valores asociados. (Fuente: Olaya, 2014) ...	57
Figura 12. Primitivas en el modelo de representación vectorial y ejemplos particulares de cada una de ellas con atributos asociados. (Fuente: Olaya, 2014).	60
Figura 13. Proceso de identificación de patrones geoespaciales. (Fuente: según Gahegan et., al 2001, como se citó en Bernabé & López, 2012).....	62
Figura 14. Comportamiento gráfico de posibles escenarios del Índice de Correlación de Pearson. (Fuente: Suárez, 2011).....	71
Figura 15. Flujograma de trabajo.	77
Figura 16. Mapa de lotes de estudio propuestos para Finca Sur.	79
Figura 17. Parte del equipo utilizado en la elaboración de los pozos (Barrenos de 1m y 2m, Pozo de observación, machete.)	80
Figura 18. Pozo instalado en Lote B-12.	81
Figura 19. Pozo instalado en Lote C-7.	82
Figura 20. GPS utilizado para la georreferenciación de los pozos de observación instalados.	83
Figura 21. Ubicación de pozos de observación instalados en Finca Sur.....	84
Figura 22. Comportamiento de mareas para el 12 de octubre en aplicación Nautide.	85
Figura 23. Cloc-Cloc elaborado por la empresa.	86
Figura 24. Cavidad interna del Cloc-Cloc.....	86

Figura 25. Comportamiento de niveles freáticos de lotes A-3, A-9, B-1 y B-7 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia El Coyol (Estación 12).	97
Figura 26. Comportamiento de niveles freáticos de lotes C-1, D-6 y B-12 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia Viento Fresco (Estación 13).	98
Figura 27. Comportamiento de niveles freáticos de lotes C-7, C-11 y E-8 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia Tortugal (Estación 14).	99
Figura 28. Comportamiento de niveles freáticos de lotes E-11, N-3, N-6 y N-7 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia La Montaña (Estación 15).	100
Figura 29. Comportamiento de niveles freáticos de lotes E-5 e I-6 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia Abandonos (Estación 18).	101
Figura 30. Promedio de NF Vs NDVI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.	103
Figura 31. Media de rango de NF Vs Promedio de NDVI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.	105
Figura 32. Media de rango de NF Vs GNDVI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R^2	106
Figura 33. Media de rango de NF Vs NDRE (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R^2	108
Figura 34. Media de rango de NF Vs GCI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R^2	109
Figura 35. Media de rango de NF Vs SAVI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R^2	110
Figura 36. Media de rango de NF Vs NDMI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R^2	111
Figura 37. Comportamiento de Isóbatas para Finca Sur.	115
Figura 38. Comportamiento de Isohypsas en Finca Sur.	116
Figura 39. Río cercano a sector Salimas.	127
Figura 40. Estado de los drenes en Sector Salimas antes de la construcción de tapones y limpieza en los drenes de desagüe.	128
Figura 41. Estado de los drenes en Sector Salimas antes de la construcción de tapones y limpieza en los drenes de desagüe.	129

Figura 42. Estado de los drenes en sector Salimas luego de construcción de tapones y limpieza en los drenes de desagüe.....	130
Figura 43. Promedio de NF Vs GNVI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.....	131
Figura 44. Promedio de NF Vs NDMI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.....	132
Figura 45. Promedio de NF Vs NDRE (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.....	132
Figura 46. Promedio de NF Vs GCI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.....	133
Figura 47. Promedio de NF Vs SAVI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.....	133
Figura 48. Valores de distribución para prueba T-Student. (Fuente: Universidad de Buenos Aires/Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Matemática, n.d.).....	134
Figura 49. Promedio de variación (%) del nivel freático para mediciones en la mañana de Finca Sur.....	135
Figura 50. Promedio de variación (%) del nivel freático para mediciones en la tarde de Finca Sur.....	135

RESUMEN

El presente trabajo tenía como objetivo analizar la influencia de la marea de los ríos Cañas y Bebedero sobre los niveles freáticos y la búsqueda de correlaciones de estos con índices de vegetación para los lotes ubicados en la Finca Sur del Ingenio Taboga ubicado en Cañas, Guanacaste. Se instalaron pozos de observación en lotes estratégicos y se realizaron mediciones de profundidad de nivel freático en la mañana y en la tarde, determinando posteriormente que la variación entre ambos periodos no era representativa. Además, para el cálculo de los índices se realizó una programación en Google Earth Engine que permitía obtener dichos índices para un área de influencia de 55 metros para cada pozo instalado.

Primeramente, se determinó que la marea no tenía influencia directa sobre la profundidad de los niveles freáticos, si no que aquellos que se encontraban más superficiales era debido a la problemática causada por el Canal de la Bajura. También, se determinó que las lluvias tampoco tenían una incidencia directa en dichos niveles, ya que las tendencias observadas no eran regulares al comparar la cantidad de las precipitaciones con los niveles registrados.

Por último, se realizaron varios manejos estadísticos de datos en búsqueda de correlaciones, obteniendo buenos valores de R^2 (0.40 – 0.69 y 0.70 – 0.89) al comparar Valores medios en rangos de Nivel Freático Vs. Promedios de Índices de Vegetación, siendo estas correlaciones moderadas positivas y altas. El índice que tuvo mejor ajuste fue el NDMI, obteniendo de este una ecuación con un $R^2=0.99$, permitiendo tomar esta como un modelo de predicción de la profundidad del nivel freático en función de este índice.

Palabras clave: nivel freático, Google Earth Engine, precipitaciones, correlación, tendencia, manejo estadístico de datos, índices de vegetación.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the influence of the tide of the Cañas and Bebedero rivers on the phreatic levels and the search for correlations of these with vegetation indexes for the fields located in Finca Sur of Ingenio Taboga located in Cañas, Guanacaste. Observation pits were installed in strategic fields and it was possible to detect the depth of the water table in the morning and in the afternoon, later determining that the variation between both periods was not representative. In addition, for the calculation of the indexes, programming was carried out in Google Earth Engine that allowed obtaining that indexes for an area of influence of 55 meters for each installed pit.

First, it was determined that the tide did not have a direct influence on the depth of the water table, but rather that those that were more superficial were due to the problems caused by the Canal de la Bajura. Also, it was determined that the precipitations did not have a direct incidence on these levels either, since the trends observed were not regular when comparing the amount of rainfall with the registered levels.

Finally, several statistical data managements were carried out in search of correlations, obtaining good values of R^2 (0.40 - 0.69 and 0.70 - 0.89) when comparing Mean Values in ranges of Water Table Vs. Means of Vegetation Indices, these correlations being moderate. positive and high. The index that had the best fit was the NDMI, obtaining from it an equation with $R^2=0.99$, allowing it to be taken as a prediction model for the depth of the water table based on this index.

Key words: water table, Google Earth Engine, rainfall, correlation, tendency, statistical data management, vegetation indexes.

1 INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es un cultivo muy importante en Costa Rica en consideración de que aporta grandes beneficios en varios órdenes como son el económico, laboral, social, alimentario, energético, tecnológico y hasta cultural. Es fuente generadora de riqueza y trabajo permanente y temporal que involucra y participa varias fases de la amplia y diversa cadena agrícola, industrial y de comercialización de sus productos y derivados. (Angulo et al., 2020). Taboga es una empresa agroindustrial dedicada a la producción agrícola en gran escala de caña de azúcar y sus derivados, tales como azúcar convencional, azúcares orgánicos y saborizados, electricidad, alcohol, arroz y proteína para alimento animal. Es concretamente un Ingenio donde se involucran una gran cantidad de procesos agrícolas, como preparación de suelos, planificación y diseño de sistema de riego y drenaje, planificación de maquinaria para las distintas labores culturales que requiere el cultivo, hasta llegar a la fase final de cosecha para pasar posteriormente a labores industriales para la fabricación de los productos mencionados anteriormente.

Una de las grandes áreas que se manejan en el sector agrícola del ingenio, es el drenaje tanto superficial como subsuperficial de los lotes donde se encuentran sembradas miles de hectáreas de caña de azúcar. Esta finca colinda en su lado sur con la finca de la empresa Solimar, que en su mayoría es de producción ganadera. Hace aproximadamente 20 años, cerca de dicho límite de fincas mencionado anteriormente, existían muchos brazos del río cañas, los cuales obstaculizaban tomar esa área para fines productivos y hacía en cierta forma hacía confuso el límite entre ambas fincas, por lo que se decidió modificar los cauces naturales y unirlos en unos solo, para aprovechar esa área y tener un solo afluente de mayor magnitud para obtener agua de él para las diversas labores que se realizaban en ambas fincas, a esta obra se le conoce actualmente como el Canal de la Bajura. Sin embargo, esto trajo efectos negativos en el drenaje del sector Finca Sur del Ingenio Taboga, ya que este nuevo río o canal hecho de forma artificial y con ayuda de maquinaria, provocó que el nivel freático de la finca aumentara de forma considerable, ya que con el tiempo este se ha ensuciado de forma natural por el crecimiento de maleza en sus superficies y además del hecho que la Finca Solimar realiza tapones con montículos de tierra en este para aprovechar las aguas para labores de riego de pastos, valiéndose también de que sus predios se encuentran a un nivel más bajo que el canal mismo y que Taboga.

Lo anterior se evidencia cuando se visita la finca y se encuentran algunos canales a su máxima capacidad, lo que indica que el suelo se encuentra muy húmedo, teniendo como consecuencia rendimientos de producción poco óptimos. Por lo tanto, se presenta el análisis de la influencia de las mareas de los Ríos Cañas y Bebedero sobre el nivel freático de Finca Sur mediante pozos de observación, a la vez que se intenta correlacionar estos resultados con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada obtenido mediante imágenes satelitales para los lotes seleccionados para su debido estudio, esto con la finalidad de poder recomendar una propuesta que pueda mejorar la situación actual.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

- Analizar la influencia de las mareas de los Ríos Cañas y Bebedero mediante la utilización de imágenes satelitales, índices de vegetación y su correlación con el nivel freático de 154 hectáreas de la Finca Sur pertenecientes al Ingenio Taboga, ubicado en Cañas, Guanacaste, con la finalidad de plantear un modelo de predicción basado en estas variables.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Demostrar si existe influencia de la marea sobre los niveles freáticos de lotes específicos mediante mediciones en pozos de observación.
2. Calcular índices de vegetación mediante el uso de imágenes satelitales para relacionarlo con el nivel freático de las zonas de estudio.
3. Evaluar la relación entre los datos de los niveles freáticos e índices de vegetación mediante correlación espacial como alternativa para la predicción de niveles freáticos.
4. Realizar mapas de isóbatas e isohypsas de los lotes seleccionados mediante los datos obtenidos de las mediciones en los pozos de observación para el posterior análisis del comportamiento de las aguas subterráneas del área de estudio.
5. Recomendar propuestas que ayuden a la optimización de las deficiencias presentes en el sistema de drenaje del área de estudio para aumentar la productividad de esta.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Caña de azúcar

La caña de azúcar pertenece a la familia de las gramíneas y al género *Saccharum.*, en el cual existen seis especies: *S. spontaneun*, *S. robustum*, *S. Barberi*, *S. sinensi*, *S. edule* y *S. officinarum*. Los clones comerciales de caña de azúcar son derivados de las combinaciones entre las seis especies anteriores, predominando las características de *S. officinarum* como productora de azúcar. (MAG, 1991).

Este cultivo requiere altas temperaturas durante el periodo de crecimiento y bajas temperaturas durante el periodo de maduración. Mientras más grande sea la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas durante la maduración, mayores serán las posibilidades de obtener jugos de alta pureza y un mayor rendimiento de azúcar. Las temperaturas óptimas para diferentes etapas del desarrollo de este cultivo son: para la germinación entre 32°C y 38°C, para el macollamiento de 32°C y para el crecimiento 27°C.

La precipitación anual adecuada para este cultivo es de 1500 mm, bien distribuida durante el periodo de crecimiento (nueve meses). La caña necesita la mayor disponibilidad de agua en la etapa del crecimiento y desarrollo, durante el periodo de maduración esta cantidad debe reducirse, para restringir el crecimiento y lograr el acumulo de sacarosa.

La luz es uno de los factores básicos para la producción de azúcares por lo que su intensidad es muy importante. En condiciones normales de humedad, la radiación solar tiene gran influencia en el crecimiento, así como en la formación de azúcares y en su pureza.

La caña de azúcar crece satisfactoriamente en una gran variedad de tipos de suelos, pero los más adecuados para este cultivo son los de textura franca o franco arcillosos, bien drenados, profundos, aireados ricos en materia orgánica, topografía plana y semiplana, con pH entre 5.5 y 7.5.

2.2 Caña de azúcar en Costa Rica

El país cuenta con diferentes zonas aptas para el cultivo, y su adaptabilidad va desde 0 a 1600 msnm. Dichas zonas son: Zona Pacífico Seco (Guanacaste y Puntarenas), Zona Valle Central Occidental (Alajuela y Heredia), Zona Valle Central Oriental (Turrialba), Zona de San Carlos y Zona Sur (El General). Centrándose en la primera región, es la mayor productora de caña de azúcar del país, con un área cultivada aproximadamente de 18000

hectáreas. Posee un clima tropical, con un periodo lluvioso entre mayo y noviembre, y seco entre diciembre y abril. La precipitación anual es de 1700 mm, la temperatura media de 27°C y 2500 horas luz; tiene gran cantidad de suelos aluviales recientes, planos, con capacidad de mecanización y de producir altos rendimientos. (MAG, 1991).

La región de Guanacaste destaca virtud de contar con las tres empresas azucareras de mayor capacidad de procesamiento de materia prima y fabricación de azúcar del país (Azucarera El Viejo, CATSA y Taboga), a lo cual se agrega poseer las dos plantas destiladoras de alcohol del sector azucarero costarricense; participa además activamente de la cogeneración biomásica de energía eléctrica a partir de bagazo residual la cual es incorporada a la red nacional. Esta región productora se caracteriza por el alto potencial fabril de azúcar que produce a nivel de ingenios y Productores “Independientes”, lo cual le ha permitido consolidar uno de los grados de desarrollo tecnológico más avanzados del país, adaptado a los diferentes grupos y tipos de agricultores dentro la organización regional. (Angulo et al., 2020).

Hay una amplia variedad de climas en las cinco regiones cañeras del país. En general puede decirse que la época más baja de precipitación pluvial corresponde a los meses de más baja temperatura y de mayor brillo solar. Los meses de enero, febrero, marzo y abril, constituyen el periodo favorable para la maduración de la caña de azúcar en nuestro país y es la mejor época para la zafra. (Angulo et al., 2020).

2.2.1 Variedades

Las variedades que se escojan para cultivar en un determinado lugar deben ser:

- Las que se adapten mejor a las condiciones de clima y suelos de la zona de influencia de cada ingenio.
- Que tengan un alto contenido de sacarosa.
- Que sean tolerantes a las principales plagas y enfermedades.
- Que los rendimientos sean similares en los diferentes cortes (plantilla, soca, resocas).

Los clones sembrados en el país son muchos. A continuación, se mencionan algunos de los más importantes que han sobresalido y prevalecido por sus buenas características agroindustriales, de adaptabilidad y de tolerancia a las enfermedades, en las pruebas de adaptación que ha realizado la antigua Sección de Caña de la Subdirección de Investigaciones del MAG hasta 1982 y a partir de esa fecha, el convenio cooperativo MAG-LAICA (DIECA). (MAG, 1991)

- **“Pindar”**. Variedad originaria de Australia. Se desarrolla bien en suelos livianos y ligeramente pesados y de fertilidad elevada. Es de maduración media a temprana, de buen rendimiento en el campo y con buen contenido de sacarosa; florece poco. Es tolerante al carbón, roya y otras enfermedades. La variedad Pindar se recomienda para las cinco zonas cañeras del país, en alturas inferiores a los 1000 msnm.
- **“QG8”**. Variedad procedente de Australia. Se ha adaptado a suelos aluvionales, de textura liviana y fértiles. Es de buen vigor y desarrollo, de maduración media, de buen rendimiento en el campo, buen contenido de sacarosa y tolerante al carbón y la roya. Se recomienda para la zona de Guanacaste.
- **“Q96”**. Variedad originaria de Australia. Es un clon que se desarrolla muy bien en suelos de textura liviana y alta fertilidad. Con riego tiene excelente desarrollo y macollamiento. Esta variedad es de maduración intermedia, de alto rendimiento, alto contenido de sacarosa y tolerante a la roya y al carbón. Es recomendable para las zonas de Grecia (800 msnm), Guanacaste y Puntarenas.
- **“SP 70-1284”**. Variedad originaria de Brasil (San Pablo). Se desarrolla en suelos aluviales y volcánicos de textura liviana, fértiles. Es de maduración media, de buen rendimiento en el campo y buen contenido de sacarosa. Tolerante al carbón y susceptible a la roya. Recomendada para Alajuela, Puntarenas y Guanacaste.
- **“SP 70-1143”**. Variedad originaria de Brasil (San Pablo). Se desarrolla muy bien en suelos aluvionales, pero también en suelos de baja fertilidad. Es tolerante a la sequía, de maduración media, de buen rendimiento en el campo y buen contenido de sacarosa. Tolerante al carbón y la roya. Recomendada para las zonas de Alajuela, Puntarenas y Guanacaste.

Propiamente en el Ingenio Taboga se tienen como principales variedades la CP 722086, NA 851602, SP 813250, B 82333 y LAICA 00301. Lo más importante a tener en cuenta es la clasificación según tercio y suelo; por ejemplo, CP es de primer tercio por sus características varietales (como la floración), es de suelos más francos que arcillosos. Por otro lado, SP es una variedad que toma ventaja en la composición varietal de la empresa por que se adapta muy bien a suelos más pesados colocados en un primer tercio donde CP no tiene tolerancia, y permite cosecharla aún en un segundo tercio. Por otro lado, NA es una variedad muy versátil, esta se maneja en todos los tercios en suelos livianos, su nivel de azúcar es muy constante, lo que permite crear un balance donde hay variedades más azucareras, pero con mayor peso; por ejemplo, la LAICA, que es una variedad de tercer tercio, esto por su curva de madurez, que es para suelos pesados y se adapta muy bien a las arcillas. (S. Camareno, comunicación personal, 3 de noviembre de 2021).

2.2.2 Riego y drenaje en caña de azúcar

El riego en la caña durante la etapa de crecimiento en la estación seca y frecuentemente soleada aumenta significativamente en los rendimientos en gran proporción. El requerimiento de agua para la caña de azúcar varía de 1600 a 2500 mm/año. Esta variación se debe principalmente a la zona en que se desarrolla el cultivo, aunque las necesidades de agua varían también según la etapa de crecimiento en que se encuentra la planta.

El agua que se aplica a la caña de azúcar no es aprovechada en su totalidad por lo que hay que aplicar más de lo estrictamente necesario. La eficiencia media del agua aplicada por gravedad es del 40% y la de riego por aspersión del 70%. En el país se usan dos métodos de riego: riego por surcos y riego por aspersión.

En el país, el exceso de agua en el suelo durante la estación lluviosa en algunas regiones es un factor que causa rendimientos bajos debido al poco desarrollo de la caña, por lo que es conveniente confeccionar sistemas de drenaje. Al eliminar el agua en exceso, se favorece la germinación y desarrollo de las raíces, ya que se favorece el recalentamiento del suelo, aumenta la resistencia a enfermedades y acelera la maduración. (MAG, 1991)

El drenaje agrícola se define como la evacuación del exceso de agua en el suelo. En el cultivo de caña de azúcar, el drenaje es tan importante como el riego, ya que en forma

conjunta mantienen en el suelo un ambiente propicio para obtener producciones óptimas de caña y azúcar. El exceso de humedad produce una reducción en el contenido de oxígeno en el suelo que disminuye la tasa de respiración de las raíces de la planta, la mineralización del nitrógeno, la absorción de agua y nutrimentos y propicia la formación de sustancias tóxicas. Si la planta de caña crece en estas condiciones durante un tiempo prolongado, especialmente durante el periodo de rápido crecimiento, se produce un retardo en su desarrollo vegetativo y, por ende, una disminución en la producción. Experimentos realizados en CENICAÑA (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia) muestran que la producción se puede reducir hasta en 35 toneladas por hectárea cuando el nivel freático se mantiene a una profundidad menor de 70 cm. Si la humedad excesiva ocurre durante las etapas de adecuación del terreno, la preparación y la siembra o la cosecha, estas labores sufren retraso ya que los suelos se compactan y el porcentaje de germinación se reduce, aumentando los costos por concepto de resiembras y, por consiguiente, los costos totales de producción. (Cruz, 1995)

El suelo necesita estar bien estructurado y fértil para maximizar el crecimiento y generar un rendimiento alto. Cualquier suelo es apto tanto sea profundo y tenga buen drenaje. La capa freática debe estar por debajo de 1.5 a 2 metros de profundidad para no restringir el enraizamiento. Sin embargo, se prefieren los suelos francos con buena capacidad de retención de agua. Una buena preparación de la tierra es clave para un desarrollo fuerte y productivo del retoño y el consiguiente rendimiento del cultivo. Las malas condiciones físicas, como puede ser un suelo compactado, son mucho más difíciles de mejorar y es necesario evitarlas en el cultivo o corregirlas antes de plantar. (Yara, n.d.)

2.3 Niveles freáticos

Cuando se perfora un pozo a suficiente profundidad, se hallará luego de un cierto tiempo agua, la cual subirá hasta cierto nivel. Este nivel de equilibrio donde la presión hidrostática en el agua iguala la presión atmosférica tiene una serie de denominaciones, entre otras: superficie freática, tabla del agua subterránea, nivel freático, nivel del agua subterránea, superficie libre de agua o capa freática (Figura 1). (Villón, 2007)

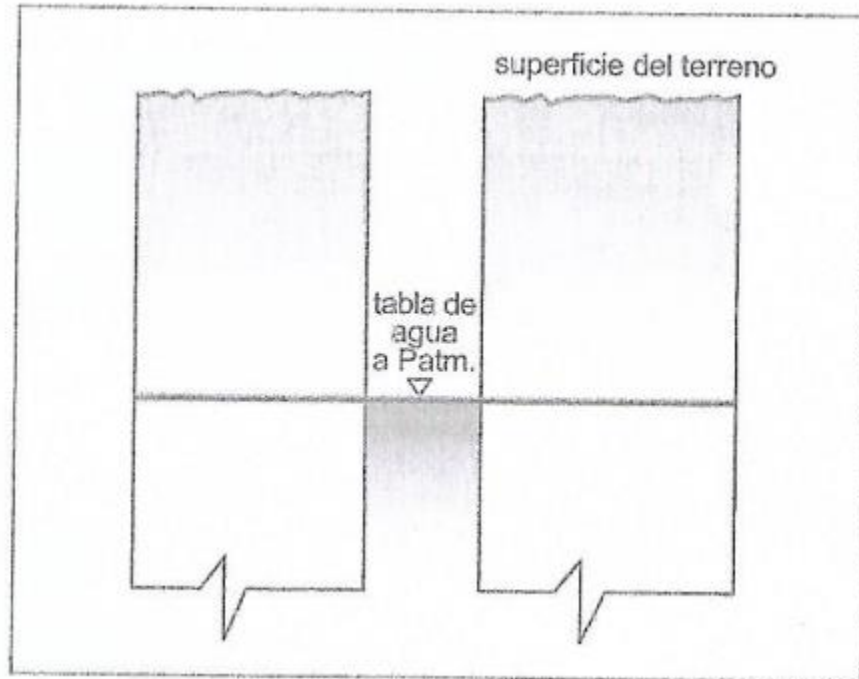


Figura 1. Pozo perforado hasta la tabla de agua. (Fuente: Villón, 2007).

Entonces la superficie freática, representa el lugar geométrico de los puntos de masa de agua, donde la presión es igual a la presión atmosférica, es decir:

$$P \text{ tabla de agua} = P \text{ atmosférica}$$

Por encima de la tabla de agua o superficie freática, el contenido de agua en el suelo generalmente decrece con el incremento de altura, el agua de esta zona no saturada se le llama *humedad del suelo* (agua gravitacional o agua vadosa), mientras que por debajo se mantendrá con los poros llenos de agua, al agua de esta zona saturada se llama *agua subterránea*.

Una cierta región por encima de la tabla de agua, por acción capilar se mantendrá frecuentemente con los poros llenos de agua, esta región es la llamada *orla o franja capilar*. (Figura 2).

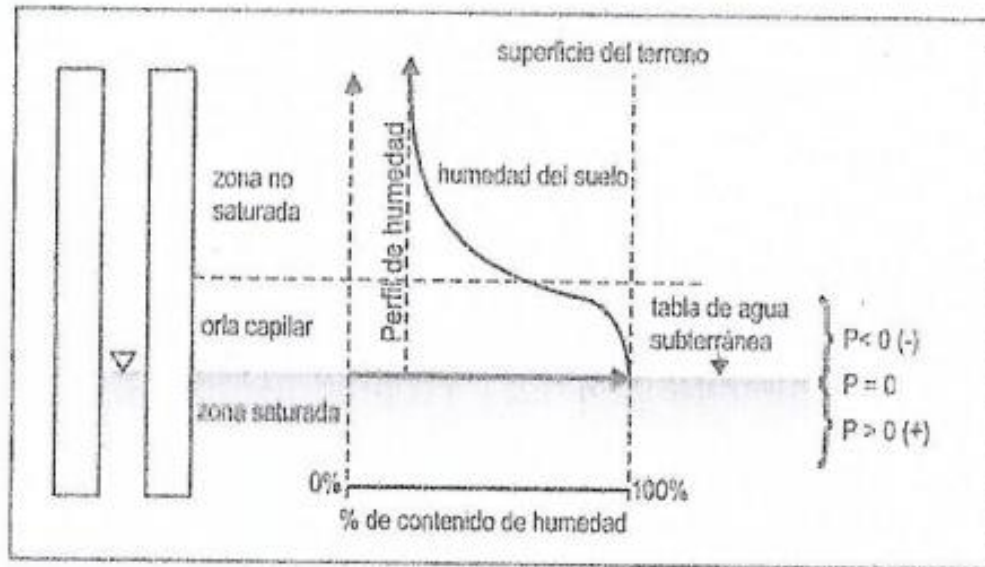


Figura 2. Perfil de humedad en el suelo. (Fuente: Villón, 2007)

La presión de la superficie de la tabla de agua, generalmente se expresa como la presión relativa p respecto a la presión atmosférica, donde esta última es tomada como nivel de referencia cero, en este caso, $p=0$ siendo la presión por debajo de la superficie freática positiva, y cuyo valor aumenta linealmente con la profundidad por debajo de la tabla de agua, mientras que por encima de ella es negativa. (Villón, 2007)

2.4 Pozos de observación

Un pozo de observación consiste en una perforación construida en el suelo, generalmente mediante un barreno agrológico, hasta una profundidad tal que exceda el nivel freático mínimo esperado. El pozo así construido puede ser entubado o no entubado.

Pozos no entubados pueden emplearse exitosamente en suelos cuya estabilidad es suficientemente grande como para impedir el colapso. Asimismo, estos pozos son una forma barata de medir los niveles freáticos en una primera etapa (estudio preliminar) cuando sólo se requiere una información general acerca de la profundidad del agua. Cuando se trabaja en suelos inestables (arenas) es necesario recurrir a un entubamiento temporal del pozo de observación. Esto generalmente se logra con tubería de Polivinilo de cloruro (PVC), debidamente ranuradas o perforadas en sus paredes, selladas en el fondo y rodeadas de un material altamente permeable (grava, chancado y/o geotextil). En atención a que es deseable

tener un considerable número de observaciones del nivel freático en el tiempo, para poder registrar adecuadamente sus fluctuaciones, se recomienda el uso de pozos de observación entubados. (Salgado, n.d.)

2.4.1 Frecuencia de las lecturas en pozos de observación

La frecuencia con que se deben realizar las lecturas depende del tipo de estudio que se desea realizar. Con fines de diseño es suficiente dos veces al mes. Para estudiar casos particulares (efectos de las lluvias, ríos, riegos, etc.) la frecuencia requerida puede ser incluso diaria. Cada pozo debe tener su propio registro de información donde deben contemplarse al menos los siguientes datos: fechas de la observación, profundidad del agua desde el nivel de referencia, profundidad del agua bajo el nivel de suelo, cota del nivel del agua con respecto al punto de referencia del levantamiento planialtimétrico. Otros datos importantes pueden ser el número del pozo, ubicación, profundidad, cota de terreno, cota del punto de referencia, etc. (Salgado, n.d.)

2.4.2 Métodos de medición

Las lecturas pueden realizarse con equipos simples y fáciles de confeccionar. Generalmente se emplean cintas mojables, sondas mojables (cloc-cloc), o sondas eléctricas. En la Figura 3, se muestran algunos de estos tipos de sondas.

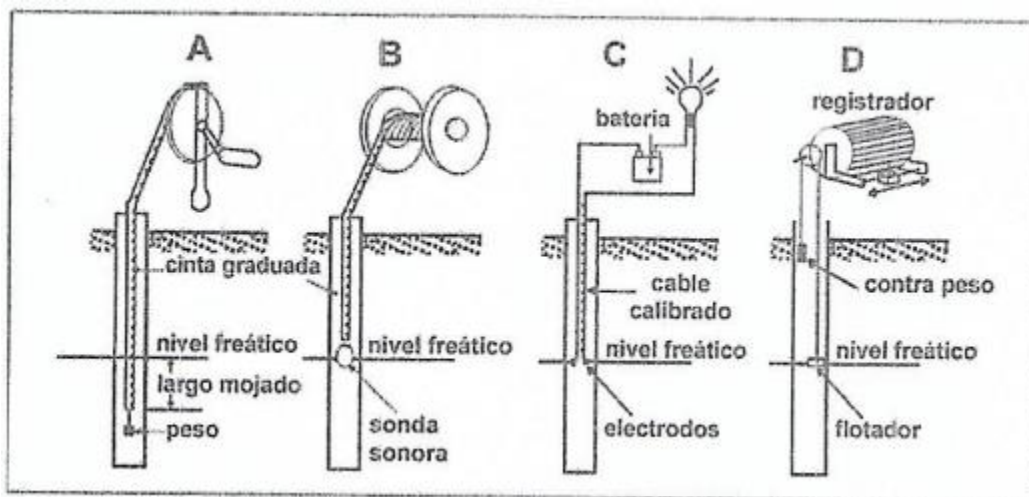


Figura 3. Sondas para medir la profundidad del nivel freático. (Fuente: Villón, 2007)

La sonda acústica o *cloc-cloc* (Figura 3-C), consiste en un pequeño trozo de tubo metálico de 2 cm de diámetro y de 5 cm de largo, cerrado en su extremo superior y con un agujero de 2 cm en su parte inferior, conectado a una cinta graduada metálica o de género. Cuando la sonda se introduce dentro del pozo y hace contacto con el agua provoca un sonido característico “cloc-cloc”, que permite registrar el nivel con gran precisión. (Villón, 2007)

2.5 Isóbatas

Para estudiar las condiciones del agua subterránea del área de estudio, una forma sencilla de su análisis es presentar información de las lecturas de los pozos de observación y profundidades del estrato impermeable, en forma gráfica, mediante planos o mapas, como: isóbatas, gráfica de área – tiempo, isohypsas, planos de mínimos niveles freáticos, plano de incrementos, plano de profundidad del estrato impermeable, perfil del nivel freático, hidrograma de pozos.

Las isóbatas representan líneas que unen puntos que tienen la misma profundidad de la tabla de agua (isoprofundidad). (Villón, 2007)

2.5.1 Elaboración de isóbatas

- En un plano topográfico se ubican los pozos de observación.
- En cada uno de ellos se ubica el valor de la profundidad de la tabla de agua, con respecto a la superficie del terreno.
- Se hace la interpolación para obtener los puntos que tienen la misma profundidad del nivel freático.
- Se unen dichos puntos de igual profundidad para obtener las isóbatas.

Este gráfico proporciona:

- La localización de las zonas con diferentes niveles freáticos.
- La localización de las áreas con problemas de drenaje, es decir, las áreas con un nivel freático cercano a la superficie.
- El aumento o disminución de las áreas problemáticas en función del tiempo.

2.6 Isohypsas

Las isohypsas representan líneas de igual elevación de la tabla de agua subterránea con respecto al nivel del mar (equipotenciales). (Villón, 2007)

2.6.1 Elaboración de las Isohypsas

- En cada punto de observación se anota el valor de la cota del nivel freático, referido al nivel del mar.
- Con estos datos, se trazan curvas de igual nivel a equidistancias que pueden variar de 0.25, 0.50 a 1 metro.

Permite calcular:

- Las líneas equipotenciales.
- La dirección de las líneas de corriente, las que se trazan ortogonales o perpendiculares a las isohypsas.
- Posibles zonas de aportación o sumideros.
- Posibles zonas de aportación o descarga.
- Valor relativo de K de cada área. (Villón, 2007)

2.7 Teledetección

Por Teledetección entendemos, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de ciencias de la Tierra, la Teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales.

Se abordan dentro de la acepción del término Teledetección Espacial, todos los problemas y procedimientos metodológicos y técnicos que en términos anglosajones quedan enclavados dentro del concepto de *Remote Sensing*.

Aunque en un principio queda contextualizada en este ámbito del conocimiento la Fotogrametría, el carácter cíclico de las tomas desde los satélites, la orientación preferentemente temática, y el carácter multiespectral de la información hacen de la

teledetección espacial una materia diferenciada e independiente dentro de las ciencias de la Tierra.

Se puede situar el comienzo de la Teledetección moderna en torno a 1960 con el desarrollo de las primeras misiones espaciales. En sus orígenes se trata de programas orientados esencialmente a fines militares, si bien no se tardó mucho tiempo en poner en órbita satélites de uso civil. La evolución desde los comienzos hasta la actualidad ha venido presidida por un constante avance en la calidad de los sensores utilizados, lo que ha permitido alcanzar mejores resoluciones y por tanto la posibilidad de abordar nuevos objetivos científicos. (Pérez & Muñoz, 2006)

2.7.1 Teledetección en la Agricultura

Hoy en día, las técnicas de observación remota en la superficie de la Tierra se han convertido en una herramienta esencial para apoyar la gestión y la planificación en muchos sectores y ámbitos, como el agrícola, forestal, en hidrología, meteorología, o ecología, y en muchos otros campos no relacionados con las ciencias de la Tierra, como el humanitario o el militar.

La teledetección, tal y como la conocemos, surgió alrededor de la década de 1960. Como subrayó uno de sus padres, Ray D. Jackson, ya desde sus inicios la agricultura fue uno de sus principales objetivos. El físico apuntó que, aunque los beneficios de la información proveniente de los satélites para la monitorización de la agricultura eran obvios (refiriéndose a Landsat-5, lanzado en 1984), estos no habían sido diseñados para dar información en tiempo real a los agricultores y ganaderos. Señaló que los datos que podían ser usados para tomar decisiones de manejo diarias estaban disponibles solo de manera rudimentaria, y que no existía un sistema operativo en detección remota por satélite que pudiera dar a los agricultores la información que necesitaban: en tiempo real, con una frecuencia temporal suficiente, y alta resolución espacial.

En la actualidad la situación ha variado sustancialmente: con satélites y constelaciones de satélites diseñados para este fin, ofreciendo información a más altas resoluciones, y sensores a bordo de vehículos aéreos no tripulado que aumentan esta resolución hasta centímetros. Con metodologías donde se combinan diferentes tipos de

información remota (radar, ópticos, térmicos, multiespectrales, etc.) con otras fuentes (datos de campo, meteorológicos, de análisis climático, etc.), junto con técnicas de fusión y agregación/desagregación de datos, permitiendo cada vez más el desarrollo de aplicaciones operativas de seguimiento en la agricultura. (Andreu et al., 2021)

Las características de los datos proporcionados por la teledetección los hacen esenciales para evaluar el funcionamiento de los ecosistemas. Son imprescindibles cuando los datos en campo son escasos, las redes de monitoreo son poco fiables o el acceso a los datos está restringido, y en las ocasiones en las que falta experiencia técnica para ejecutar campañas en campo.

Estas características son:

- Su cobertura global.
- Con varias resoluciones temporales (diarias, semanales, quincenales).
- Con varias resoluciones espaciales (de metros a decenas de kilómetros).
- Su naturaleza no destructiva.
- Su transmisión inmediata.
- El formato digital.
- La accesibilidad abierta de algunos de ellos (por ejemplo, las misiones Sentinel de la Agencia Espacial Europea, o las misiones Landsat y MODIS de la NASA).

La teledetección también se entiende como el proceso de detectar y monitorizar las características fisicoquímicas de una superficie midiendo a distancia la radiación que refleja y/o emite dicha superficie. Entre la superficie de la tierra y el sensor se produce una interacción, el sensor registra la energía solar (radiación visible o infrarroja) reflejada por la superficie (conocida como reflectancia), o bien la reflejada por un haz de energía artificial (por ejemplo, un radar), o la radiación emitida por la superficie (radiación térmica y microondas). La señal es transmitida a través de la atmósfera y capturada por los sensores, y la información es puesta finalmente a disposición para su posterior procesamiento en formato digital.

El flujo de energía entre la superficie y el sensor toma la forma de radiación electromagnética y se define por su longitud de onda y frecuencia. Aunque el espectro

electromagnético (Figura 4) es continuo, muchos de los detectores lo dividen en bandas, dentro de las cuales la radiación muestra un comportamiento similar. (Andreu et al., 2021)

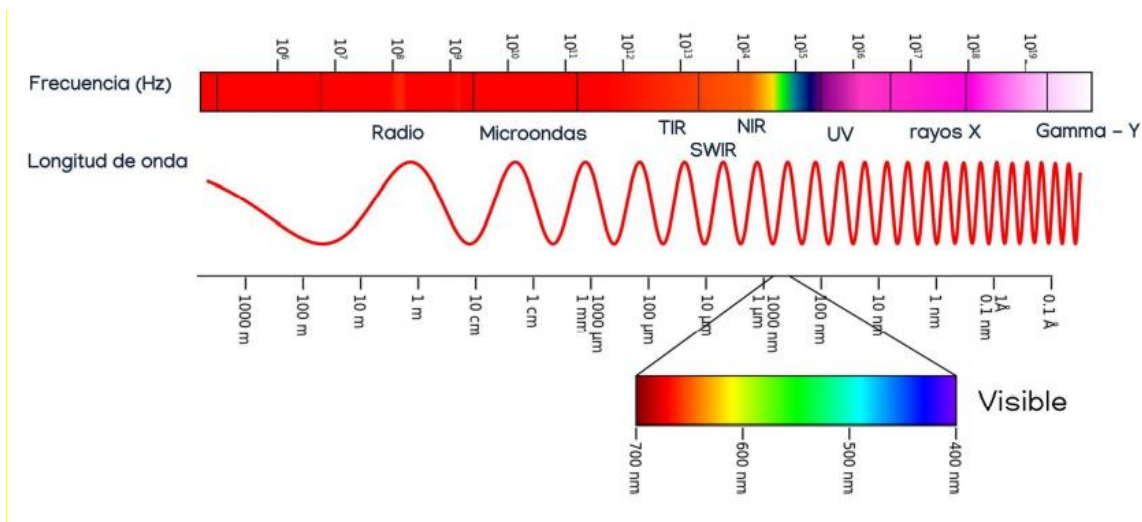


Figura 4. Espectro electromagnético.

Las regiones más utilizadas en la teledetección agrícola son:

- La parte visible del espectro (VIS, 0.4-0.7 μm) y el infrarrojo cercano (NIR, 0.7-1.3 μm), útiles para discriminar la vegetación y la humedad del dosel;
- El infrarrojo medio (SWIR, 1.3-3 μm), donde la reflectancia de la energía solar y la emisividad de la superficie se muestran juntas;
- La térmica (TIR, 3-100 μm), que incluye la porción de emisividad del espectro en términos de temperatura de la superficie;
- Las bandas de microondas (1mm – 1 m), radiación que puede penetrar en las nubes.

2.8 Sensores remotos

Los sensores remotos son sistemas o instrumentos utilizados para recolectar información rápida y viable de un objeto, área o fenómeno a distancia. Dicha información puede ser procesada e interpretada mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para tener una mejor comprensión. Los sensores remotos instalados a bordo de una plataforma son los más utilizados en los últimos años, y registran la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie de un objeto en distintas bandas del espectro electromagnético. Estos registros incluyen longitudes de onda desde las más cortas (gamma

y radiográficas) hasta las más largas (microondas y de radiodifusión). Dentro de las longitudes de onda más cortas están las ultravioleta, que son muy prácticas para los sensores. (Herrera et al, 2018, como se citó en (Veneros et al., 2020).

2.8.1 Clasificación de los sensores remotos

Los sensores remotos se pueden clasificar en sensores de tipo pasivo y sensores de tipo activo, de acuerdo con la energía que utilizan para obtener la información. Los sensores pasivos dependen de la energía ambiental de una fuente externa y permiten medir la magnitud de la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre y atmosférica a partir del sol en el espectro visible. El sensor Infrarrojo Térmico (TIRS por sus siglas en inglés) es un ejemplo de este tipo de sensor, el cual mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor. Mientras que los sensores activos generan su propia fuente de energía, y son capaces de emitir ondas en la región del espectro de las microondas y recibir la señal que rebota de la superficie terrestre. El sensor de Detección y Localización de Imágenes por Láser (LIDAR por sus siglas en inglés) y el sensor de Detección y Localización por Radio (RADAR por sus siglas en inglés) son sensores activos. (Herrera et al, 2018, como se citó en (Veneros et al., 2020)).

Los sensores pueden ir a bordo de plataformas en satélites, pueden ser aeroportados por aviones o drones, o pueden estar diseñados para su uso en campo. El tipo de información producida dependerá de las propiedades específicas del instrumento y la plataforma, por ejemplo: de la órbita del satélite, de la altura de vuelo del dron, de la posición y la orientación del sensor en el campo, del tipo de instrumento y lentes ópticas, o de las capacidades de almacenamiento. Las condiciones meteorológicas deben ser tenidas en cuenta para que la señal solo depende de las propiedades radiativas del objetivo. (Andreu et al., 2021)

2.8.2 Resolución y plataformas de sensores remotos

La resolución de un sensor viene dada por su capacidad para registrar y discriminar información, y depende del efecto combinado de una serie de criterios, como su resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal.

- La resolución espacial está determinada por el campo de visión instantáneo del sensor, la altura de la plataforma y en ángulo de visión del sensor. Se define como la sección angular en radianes observada en un momento en particular. Por lo general, se refiere a la distancia correspondiente a este ángulo sobre la superficie. Esta distancia será el tamaño mínimo de la información registrada: el píxel o mínimo elemento de la imagen. Cuanto mejor sea el tamaño del píxel, mayor será la resolución espacial que puede proporcionar el sensor (es decir, podrá discriminar un mayor número de objetos de la superficie).
- La resolución espectral de un sensor es el número, el centro de la longitud de onda y el ancho, de las bandas espectrales que puede discriminar y registrar, y depende del filtro óptico instalado.
- La resolución radiométrica se define como la cantidad mínima de energía que se necesita para aumentar el valor de píxel en un número digital. Se conoce como la sensibilidad del sensor.
- La resolución temporal es el intervalo de tiempo entre dos adquisiciones sucesivas de imágenes de la misma parte de la superficie, dependiendo de las características orbitales y del sensor.

La información que proporcionan los sensores remotos de interés para la agricultura consiste en la descripción de las características (morfológicas, biogeoquímicas, fisiológicas, estructurales y fenológicas) que definen el sistema (planta, suelo-planta, ecosistema, etc.), y de cómo éstas varían en el espacio y en el tiempo, influenciando el estado del sistema. (Andreu et al., 2021)

Los rasgos agronómicos pueden ser:

- Tipológicos (tipo de cultivo).
- Físicos (dosel del cultivo, temperatura o humedad del suelo)
- Químicos (por ejemplo, contenido de nitrógeno en la hoja)
- Estructurales (por ejemplo, inclinación de la hoja)
- Geométricos (densidad de plantas)
- El resultado de una serie de procesos relacionados.

2.8.3 Principales satélites disponibles

La organización Meteorológica Mundial desarrolló la Herramienta de Análisis y Revisión de la Capacidad de los Sistemas de Observación (OSCAR), que entre otras funcionalidades proporciona información detallada sobre la lista con misiones y satélites pasados, actuales y futuros, meteorológicos y de observación de la tierra, y sus instrumentos. El Cuadro 1 recopila y describe algunos de los principales satélites lanzados y que son útiles para fines agrícolas.

Cuadro 1. Principales satélites disponibles para aplicaciones agrícolas. (Fuente: Adaptado de Andreu et., al 2021)

Misión	Agencia	Propósito principal y carga útil	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo
Sentinel-1 (A,B)*	ESA	Monitoreo terrestre y oceánico. C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar)	5x5 m a 25 x 100 m (mode)	175 órbitas en 12 días	A2014, B2016
Sentinel-2 (A,B)	ESA	Vegetación terrestre de alta resolución. Mitigación de riesgos. MSI: Multi-Spectral Imager (VIS/NIR/SWIR).	10 m, 20 m, 60 m, dependiendo del canal	10 días (5 días con los 2 satélites)	A2015, B2017
Sentinel-3 (A,B)*	ESA	Misión terrestre y oceánica. DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), LRR (Laser Retro-Reflector), MWR (Micro-Wave Radiometer), SRAL (Synthetic aperture Radar Altimeter), OLCI (Ocean and Land Colour Imager), SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer).	MWR (20 km), OLCI (300 m), SLSTR: 0.5 km para canales de onda corta, 1 km para onda larga. SAR: 300 m x 1000	27 días OLCI y SLSTR, 2 días	A2016, B2018
SPOT	CNES, Spot Image	Observación de la superficie y la vegetación de alta resolución. HRV/HRVIR/HRG (canales VIS, NIR, SWIR, MS y PAN)	Desde 5 m (PAN) hasta 10-20 m (VNIR, SWIR)	26 días. Puntos estratégicos (3 días)	1986-2015
MODIS AQUA, TERRA	NASA	Multi-propósito: nubes, océano, hielo y tierra. Imágenes ópticas de resolución moderada. (VIS, NIR, SWIR, MWIR, TIR channels)	Desde 0.25 km (2 canales, hasta 1.0 km (29 canales)	2 veces o una vez al día	2000-presente
Landsat 4/5 TM	NASA	Observación de la tierra y la vegetación a alta resolución. TM (Thematic Mapper, VIS, NIR, SWIR, TIR)	TM: 30 m, VNIR 120 m	16 días	1982-2013

Misión	Agencia	Propósito principal y carga útil	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo
Landsat 7 + ETM	NASA	ETM + (Enhanced Thematic Mapper + PAN, VIS, NIR, SWIR, TIR)	ETM+: 30 m, VNIR 15 m PAN, TIRS 100 m	16 días	1999-presente
Landsat 8 OLI	NASA	OLI (Operarional Land Imager, PAN, VIS, NIR, SWIR) TIRS (Thermal Infra-Red Sensor, TIR)	OLI: 30 m VNIR, 15 m PAN, TIRS 100m	16 días	2013-presente
Ecoestress	NASA (ESA, JAXA, CSA...)	ECOsystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station. Temperatura de la superficie terrestre en diferentes momentos durante el ciclo diurno para detectar el estrés hídrico en las plantas.	Radiómetro de 5 canales TIR, ~70 m (30 m para ET dis-ALEXI USDA Daily L3 Global e Índice ESI)	Variable, dependiendo de la órbita de la ISS	2018-2023
ENVISAT *	ESA	Química atmosférica, climatología, océano y hielo. Observación de tierras y vegetación. AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer), ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar C-band SAR), MWR (Micro-Wave Radiometer), etc.	AATSR 1 km, MERIS 300 m MWR, RA-2 20 km	Entre 1 a 3 días MWR, RA-2, 35 días	2002-2012
SMAP	NASA, JPL, GSFC	Humedad del suelo Activo-Pasivo (Soil Moisture Active-Passive). Radiómetro MW, VV, HH y HV para el SAR.	Radiómetro: 41 km; SAR: 30 km (apertura real), 3 km (procesado)	1.5 días	2015-presente
SMOS	ESA, CDTI, CNES	Humedad del suelo y salinidad del océano (Soil Moisture and Ocean Salinity)	GPS, MIRASM (radiómetro de microondas, 50 km), STA.	3 días	2009-presente

Para propósitos de este trabajo, se utilizaron imágenes satelitales provenientes del Satélite Landsat 7, por lo que se profundizó un poco más en información relacionada a este.

2.8.4 Sentinel 2

Los satélites de Sentinel 2 contribuyen a las observaciones multiespectrales en curso y benefician a los servicios y aplicaciones de Copernicus, como gestión de tierras, agricultura y silvicultura, control de desastres, operaciones de ayuda humanitaria, mapeo de riesgos y preocupaciones de seguridad. Las bandas de las que dispone Sentinel 2 son:

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m/px)
Banda 1- Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 -Azul	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Verde	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Rojo	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Rojo	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Ultrarojo	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Rojo lejano	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Infrarojo cercano	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Infrarojo cercano 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Vapor de Agua	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 11 - Onda corta infrarroja	1,56 - 1,65	20
Banda 12 - Onda corta infrarroja 2	2,10 - 2,28	20

Figura 5. Bandas del Satélite Sentinel 2.

Existen dos niveles de descarga de datos: nivel 1 (Las imágenes vienen con valores de reflectancias en el tope de la atmósfera (TOA) georreferenciadas) y nivel 2 las imágenes vienen con valores de reflectancias a nivel del suelo (BOA) georreferenciadas.

Las imágenes de Sentinel 2 se utilizan para calcular diferentes índices mediante la combinación de sus bandas. Con estas combinaciones podemos analizar cambios en los cultivos, zonas urbanas, masas de agua. Pero solo podrán ser utilizadas cuando las nubes no interfieran en la señal que capta el sensor, pues si no tendremos datos erróneos. (Martínez, 2020)

2.8.5 Satélite Sentinel

El objetivo del programa Sentinel es reemplazar las misiones de observación de la Tierra más antiguas que se han retirado, como la misión ERS, o que actualmente están llegando al final de su vida útil operativa. Esto asegurará la continuidad de los datos para que no haya vacíos en los estudios en curso. Cada misión de Sentinel se centra en un aspecto diferente de la observación de la Tierra. (Martínez, 2020)

2.8.6 Sentinel 1

Proporciona datos radar de la superficie terrestre sin el impedimento de la presencia de nubes. La tecnología radar se usan para medir distancias y ángulos relativos para conocer la situación de diferentes objetos. El radar es un sistema activo, que ilumina la superficie terrestre y mide la señal reflejada. Por este motivo, se pueden adquirir imágenes por el día y por la noche, con total independencia de la luz solar. Los datos radar nos ayudan a monitorizar el entorno las 24 horas del día, aunque haya condiciones meteorológicas desfavorables. (Martínez, 2020)

Aplicaciones prácticas:

- En el mar: Determinar mareas, corrientes marinas en aguas poco profundas. Determinar zonas de capas de hielo profundas en los polos.
- En tierra firme: se suelen utilizar para la monitorización de inundaciones, pues estas ocurren cuando hay nubes y otros satélites no son capaces de obtener información. A partir de imágenes radar se puede realizar una combinación de sus bandas de intensidad para obtener un mosaico RGB.

2.8.7 Uso de sensores en el ámbito agrícola

El seguimiento preciso del estado de los cultivos es de gran importancia, entre otras cosas, debido al incremento en la demanda agrícola por el aumento poblacional, y al contexto de cambio climático y agotamiento de recursos naturales en el que nos encontramos. El incremento de la producción debe venir acompañado de un manejo sostenible de estos recursos y de las tierras agrícolas. Es necesario reducir los impactos negativos de la agricultura sobre la cantidad y calidad de las aguas, los recursos de suelo, la degradación de la tierra, las emisiones de gases invernadero, y la biodiversidad.

Para ello, es clave realizar un seguimiento preciso del crecimiento y el estado del cultivo en múltiples áreas y contextos medioambientales, a varias resoluciones temporales y para diferentes propósitos.

La prevención, y la alerta temprana de eventos extremos son fundamentales para minimizar su impacto en el sistema alimentario. Mediante el uso de la información

suministrada por la teledetección es posible anticipar eficientemente la producción de alimentos, o su escasez, y así reforzar la seguridad alimentaria en las regiones más vulnerables. También es posible optimizar las prácticas de gestión para que se cumplan requisitos de sostenibilidad. Además, la teledetección permite realizar esta evaluación con una visión a largo plazo, integrando las lecciones aprendidas en la definición de políticas o prácticas agrarias.(Andreu et al., 2021)

La teledetección aporta información valiosa para (Weiss et al., como se citó en Andreu et al., 2021):

- Detección del contenido de humedad del suelo para programación de riego, evaluación de áreas vulnerables, o seguimiento de la sequía.
- Seguimiento del estrés hídrico (avisos-impacto sequía), monitoreo del vigor de la vegetación y del estrés por sequía.
- Mejora del fenotipado: selección de los mejores cultivares para mejorar la producción de cultivos.
- Monitoreo del uso de la tierra agrícola, mapeo de alteraciones, cambios en el uso y cobertura del suelo (LULC). Estimación de superficie de cultivo y mapeo de tierras de cultivo, clasificación de cultivos, superficie, etc.
- Seguimiento del ciclo fenológico del cultivo, de la cobertura vegetal, del estado del cultivo.
- Producción de biomasa (predicción-estimación de cosecha) y rendimiento de cultivos.
- Seguimiento de cultivos para optimizar el rendimiento: agricultura de precisión.
- Seguimiento del uso de agua del cultivo (evapotranspiración).
- Evaluación de las deficiencias de nutrientes del cultivo, el estado, y la calidad.
- Seguimiento de la enfermedad de cultivos, infestación de malezas e insectos.

2.8.8 Detección remota con drones

Actualmente, la agricultura en todo el mundo propende por la seguridad alimentaria a futuro, razón por la cual se está en la búsqueda de tecnologías modernas que ayuden a mitigar la falta de atención de ciertas particularidades de los cultivos que generan gastos

innecesarios en el monitoreo de los mismos. Anteriormente, las fincas no tenían una gran área y, por ende, los cultivos en estas no eran muy grandes (además de otros factores que afectan a la sociedad actual: tiempo), por lo que no eran tan difícil recorrerlas completamente. No obstante, hoy en día, la demanda de alimentos necesita de cultivos más extensos, que se vuelven demasiado grandes para poderlos administrar perfectamente como se hacía antes. Esta problemática genera que las personas no puedan conocer de manera puntual los cultivos que manejan y tomen decisiones generalizadas de manera errónea, para ciertas áreas, que a corto y mediano plazo traerán como resultado pérdidas en gastos superfluos y un mayor impacto ambiental en sus cultivos.

Se evidencia que, a partir de los drones, visto como una herramienta tecnológica innovadora, es posible resolver las problemáticas expuestas en campos de cultivos de gran extensión, ya que con cámaras de alta definición e información geográfica pueden recorrer más de mil hectáreas en menos de una hora. Estos dispositivos para la toma de mediciones y captura remota que sobrevuelan los cultivos con cámaras multiespectrales pueden tomar fotografías y grabar videos de alta resolución que detectan características que se pasan por alto a simple vista, ayudando a respaldar las decisiones para una mejor precisión y productividad del campo. (González et al., 2016)

2.9 Espectro electromagnético

Para tener una comprensión cabal de la percepción remota es necesario conocer la forma en la radiación interacciona con la superficie de la Tierra. La principal fuente de energía del planeta proviene del sol. Esta energía, de la cual la luz visible forma parte y nos resulta más familiar, es la radiación electromagnética.

La energía puede ser transferida de un punto a otro de tres maneras posibles: conducción, convección o radiación. Esta última es de especial interés en percepción remota. La energía radiada se comporta básicamente acorde con la teoría ondulatoria de la luz: es un continuo de ondas que se caracterizan por su tamaño (longitud de onda, l , que se mide en micrómetros, μm) y frecuencia (n , que se mide en Hertz, Hz), el número de ondas por unidad de tiempo. Ambas propiedades se encuentran relacionadas, la longitud de onda es la distancia entre cresta y cresta de la onda, y la frecuencia es en número de ciclos, mientras más pequeña es la longitud de onda más alta es la frecuencia.

El espectro electromagnético abarca longitudes de onda que van desde las muy cortas, del orden de 3 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ mm}$), los rayos X, hasta los 30 km, ondas de radio. Las longitudes de onda de importancia para la percepción remota son aquellas ubicadas en el intervalo de la luz visible ($0.39 \text{ \mu m} - 0.78 \text{ \mu m}$), el infrarrojo cercano ($0.7-0.9 \text{ \mu m}$), el infrarrojo térmico ($3-14 \text{ \mu m}$) y la radiación en microondas (arriba de 15 \mu m), como se puede apreciar la Figura 6.

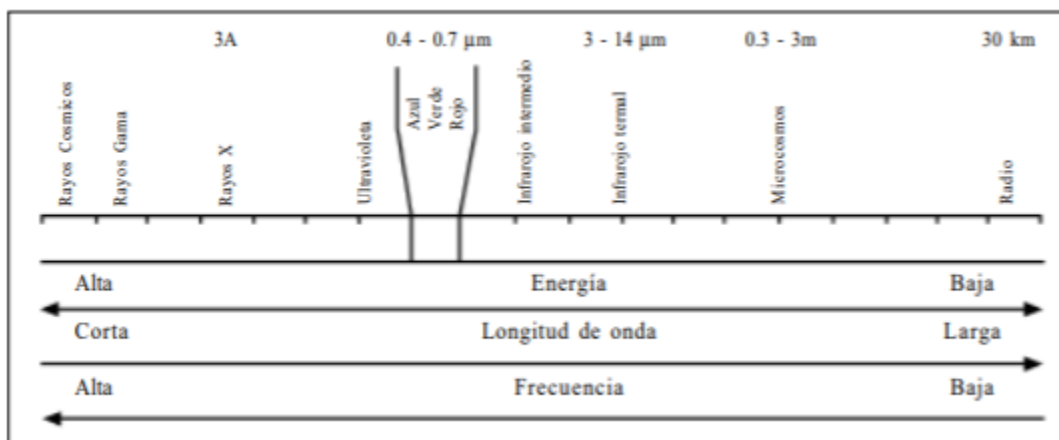


Figura 6. Regiones del Espectro electromagnético. (Fuente: Bautista & Palacio, 2011)

La radiación electromagnética que llega a un objeto puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Si la proporción del flujo radiante que es reflejado, absorbido o transmitido es muy diferente para los distintos rasgos de la superficie terrestre, entonces es posible identificar objetivos de acuerdo con sus propiedades espectrales. La cantidad de energía que refleja, transmite o absorbe cada objeto es diferente para cada longitud de onda. Este es el sustento teórico básico para la percepción remota. Y esto que aparece muy sofisticado, es algo que cotidianamente aplicamos cuando observamos cualquier objeto: vemos una hoja verde por el hecho de que tiene una alta reflectancia en la longitud de onda que corresponde al verde, un papel blanco posee una alta reflectancia en todas las longitudes de onda, etc. Sin embargo, el que un sensor remoto (cámara fotográfica, radiómetro, etc.) pueda o no detectar las diferencias espectrales de un objeto con respecto a otro depende de 4 factores determinantes: 1) la resolución radiométrica del sensor, 2) la cantidad de dispersión atmosférica, 3) lo irregular de la superficie del objeto y 4) la variabilidad espectral de los objetos en la escena en cuestión. (Bautista & Palacio, 2011)

2.9.1 Bandas espectrales utilizadas en agricultura

Es posible definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda (λ) o su frecuencia (F), elementos de las características de flujo energético. La sucesión de valores de la longitud de onda es continua, pero se establecen una serie de bandas donde la relación electromagnética muestran un conocimiento similar, denominado espectro electromagnético. (Torres, 2017)

En teledetección cabe destacar las siguientes bandas espectrales, como se ve gráficamente en la Figura 7:

- Espectro visible: Radiación electromagnética percibida por el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda donde es máxima radiación solar. Se distinguen 3 bandas:
 - Azul (0.4 a 0.5 μm)
 - Verde (0.5 a 0.6 μm)
 - Rojo (0.6 a 0.7 μm)
- Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 μm): Facilidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm): Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre. Facilita la estimación del contenido de humedad en la vegetación y la detección de focos de alta temperatura.
- Infrarrojo térmico o lejano (8 a 14 μm): Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, donde se detecta el calor mayormente procedente de las cubiertas terrestres.
- Microondas (a partir de 1 mm): Tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

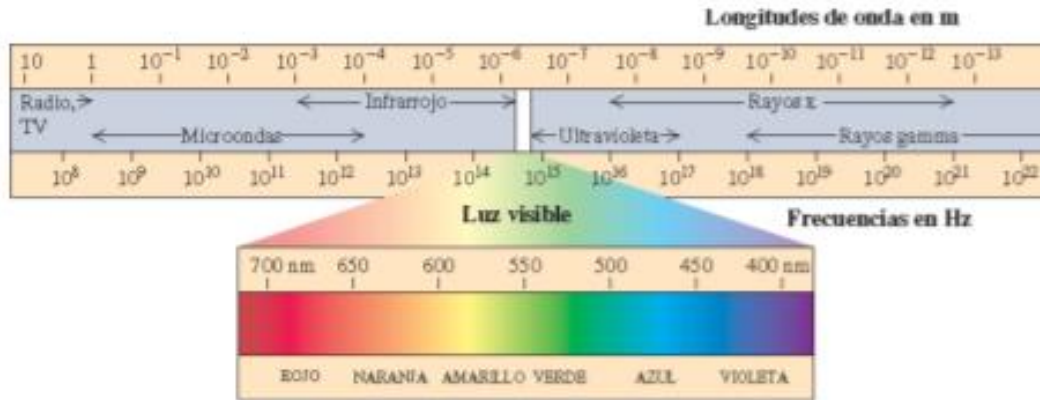


Figura 7. Espectro electromagnético. (Fuente: Torres, 2017)

2.10 Índices de Vegetación

La vegetación constituye uno de los componentes del medio físico de la mayor importancia para el equilibrio del medio ambiente. Por un lado, se trata de un recurso con un valor intrínseco (agricultura, pastos, bosques). Por otro lado, la cubierta vegetal juega un papel decisivo para el adecuado mantenimiento de otros muchos recursos (fauna, suelos, paisaje).

Mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite, es posible hacer un seguimiento de la evolución de las diferentes comunidades vegetales y de los cultivos agrícolas. Los Índices de Vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuya función es realzar la cubierta vegetal en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros componentes como el suelo, la iluminación, etc.

Los Índices de Vegetación, son pues, imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales: densidad, índice de área foliar y actividad clorofílica. (Ramos, 2020)

2.10.1 NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permittiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. (Díaz, 2015)

Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable. Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (*NDVI Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo. Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana muestra un claro contraste entre el espectro visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR).

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, como se presenta en la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots Ecuación (1)$$

Mientras que en el invisible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas. (Díaz, 2015)

Los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1. Los valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes, nieve; el suelo desnudo generalmente cae dentro del rango de 0.1 a 0.2; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1. El dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0.5, y la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0.2 a 0.5. Sin embargo, es solo una regla general y siempre debe tener en cuenta la temporada, el tipo de plantas y las peculiaridades regionales para saber exactamente qué significan los valores de NDVI. (Toribio, 2019)

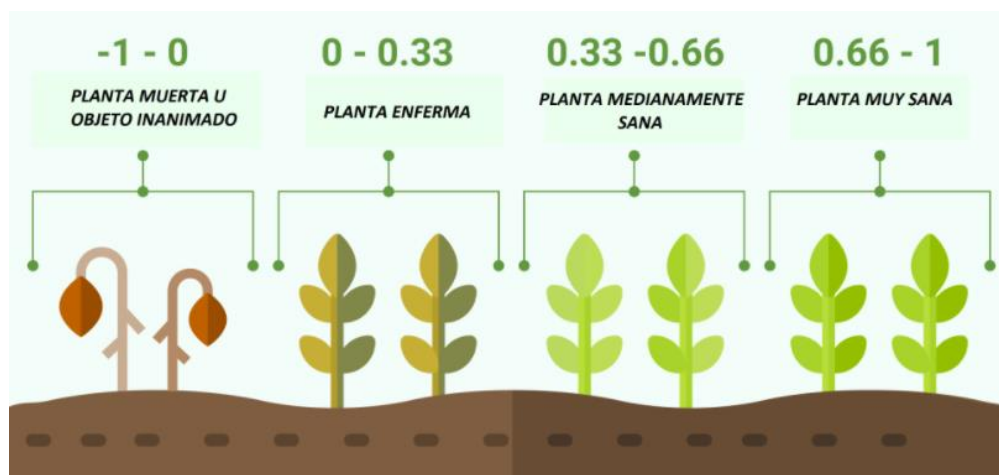


Figura 8. Rangos de clasificación para NDVI. Fuente: (Toribio, 2019).

2.10.2 GNDVI (Índice de Vegetación Normalizada Verde)

El Índice GNDVI es un índice del “verdor” de la planta o actividad fotosintética. Es uno de los índices de vegetación más utilizados para determinar la captación de agua y nitrógeno en el dosel del cultivo.(Calo, 2018b)

Los valores arrojados por dicho índice también oscilan entre -1 y 1. Valores entre -1 y 0 están asociados a la presencia de agua o suelo desnudo. Este índice se emplea fundamentalmente en la etapa intermedia y final del ciclo del cultivo.

Este índice utiliza la banda infrarrojo cercano (NIR) y la banda verde (GREEN) del espectro electromagnético y se calcula mediante la utilización de la siguiente fórmula:

$$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)} \dots Ecuación (2)$$

Donde:

GNDVI: Índice de Vegetación Normalizada Verde [adimensional]

GREEN: Banda verde del espectro electromagnético [adimensional]

2.10.3 Diferencia entre NDVI y GNDVI

El índice GNDVI es más sensible a la variación de la clorofila en el cultivo que el índice de NDVI, y presenta un punto de saturación más alto. Por otra parte, el índice GNDVI puede ser utilizado en cultivos con canopos densos o en etapas más avanzadas de desarrollo mientras que el índice NDVI es adecuado para estimar el vigor del cultivo durante las etapas iniciales. (Calo, 2018a)

Por ejemplo, en la Figura 9 se puede observar que el NDVI (izquierda) no presenta diferencias y se ve saturado. El índice GNDVI (derecha) es útil en estos casos.

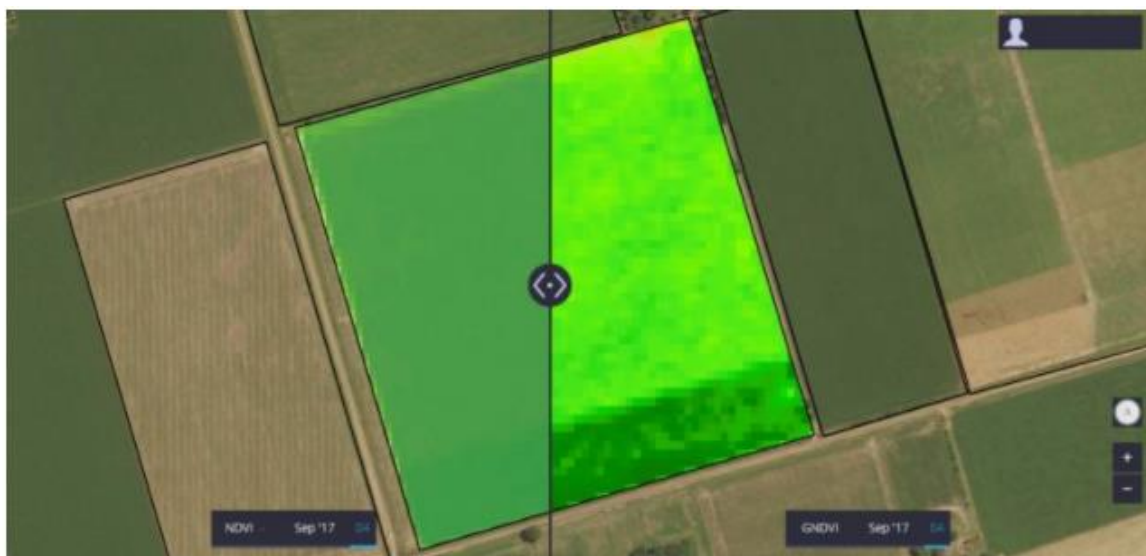


Figura 9. Ejemplo de diferencias entre índices GNDVI y NDVI. Fuente: (Calo, 2018)

2.10.4 NDRE (Borde Rojo de Diferencia Normalizada)

El Índice de Borde Rojo de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Red Edge Index*, por sus siglas en inglés), está basado en la medición de la clorofila presente en la vegetación y puede verse modificado en factor al estrés hídrico. El NDRE se encuentra ubicado entre los valores de -1 a 1 (similar al NDVI). Cabe recalcar que el NDRE, es un índice que incluye la interacción de los índices de NDVI y CSWI, y sirve también para determinar el estudio del estrés hídrico de las plantas (Araujo & Díaz, 2018). Se representa mediante la siguiente fórmula:

$$NDRE = \frac{(IRC - \text{Rojo Extremo})}{(IRC + \text{Rojo Extremo})} \dots \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

IRC: Banda del infrarrojo cercano [adimensional]

Rojo Extremo: Banda del borde rojo extremo [adimensional]

2.10.5 NDMI (Índice de Diferencia Normalizada de Humedad)

El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada consiste en la medición de la sensibilidad de los niveles de humedad de la vegetación. También, se usa para monitorizar las sequías y los niveles de combustible en las áreas vulnerables a los incendios. En pocas palabras, se utiliza para determinar el contenido de agua de la vegetación (Según Franzpc, 2019, como se citó en Mejía, 2020).

Para identificar estas coberturas de vegetación con problemas de estrés hídrico bajo el índice se basa en la siguiente fórmula:

$$NDMI = \frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)} \dots Ecuación (4)$$

Donde:

NIR: Valores de píxel de banda infrarroja cercana [adimensional]

SWIR1: Valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta 1 [adimensional]

2.10.5.1 Interpretación de valores de NDMI

Como la mayoría de los índices, el NDMI sólo puede tener valores entre -1 y +1, lo que facilita su interpretación. El estrés hídrico vendría señalado por los valores negativos que se acerca a -1, mientras que el +1 puede indicar anegamiento. Por lo tanto, cada valor intermedio corresponderá a una situación agronómica diferente.

- -1 – -0.8 Suelo desnudo,
- -0.8 – -0.6 Cobertura del dosel casi inexiste,
- -0.6 – -0.4 Cobertura del dosel muy baja,
- -0.4 – -0.2 Cobertura del dosel baja y seca o muy baja y húmeda,
- -0.2 – 0 Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto o cobertura del dosel baja y estrés hídrico bajo,
- 0.2 – 0.4 Cobertura media y estrés hídrico bajo,
- 0.4 – 0.6 Cobertura del dosel alta, sin estrés hídrico,
- 0.6 – 0.8 Cobertura del dosel muy alta, sin estrés hídrico,

- 0.8 – 1 Cobertura total del dosel, sin estrés hídrico/anegamiento.

Es importante tener en cuenta que los valores del NDMI varían a lo largo de la temporada de crecimiento porque la reflectancia de las plantas es ligeramente diferente en cada fase fenológica. El estrés hídrico por los valores del NDMI puede confirmarse mediante un NDVI significativamente inferior a la media. (EOS, n.d.)

2.10.6 SAVI (Índice de Suelo Ajustado)

Este índice incorpora una constante de suelo, la cual se usa de acuerdo con vegetación de baja, intermedia o alta densidad. Considera la influencia de la luz y del suelo oscuro en el índice. (Según Huete, 1988, como se citó en Muñoz, 2013)

El índice de suelo ajustado también tiene en cuenta la reflectividad del suelo y permite aislar la información que aporta la vegetación, de la que procede del suelo está bajo ella. Al usar este índice, dos coberturas vegetales de igual actividad fotosintética, pero sobre suelos muy diferentes, aparecerán con igual (o muy similar) índice SAVI, a diferencia de lo que puede suceder con el NDVI clásico.

Es importante considerar, que, si la cobertura de vegetación no es suficientemente densa, los valores medidos de reflectancia pueden deberse, no sólo a la vegetación, sino, también al suelo subyacente.

Para lograr el objetivo de separar radiancias del suelo y la vegetación, se añadió una constante L al denominador del NDVI, donde L puede tomar valores entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación (valores más altos del índice, para densidades más bajas). Para mantener el mismo rango de variación que el NDVI, el resultado debe multiplicarse por 1 + L. Según Huete (1988, como se citó en Muñoz, 2013), basándose en un modelo de transferencia radiativa, mostró que un valor de L= 0.5 permitía mejorar el ajuste, especialmente, para densidades intermedias de vegetación y sobre todo porque un valor de L=0 produce el mismo resultado que el NDVI y si L vale 1, el resultado es equivalente al PVI. (Muñoz, 2013)

$$SAVI = \left[\frac{IRC - R}{IRC + R + L} \right] (1 + L) \dots Ecuación (5)$$

Donde:

IRC: Banda del infrarrojo cercano [adimensional]

R: Banda del espectro visible, Roja [adimensional]

L: Constante de compensación promedio, 0.5.

La fórmula de cálculo del índice SAVI, para distintos sensores, en que las bandas roja e infrarroja tienen otro número, se muestran en la Figura 10.

Sensor	Bandas
Landsat 4,5,7:	$((4 - 3) / (4 + 3 + L)) * (1 + L)$
Landsat 8	$((5 - 4) / (5 + 4 + L)) * (1 + L)$
ASTER:	$((3 - 2) / (3 + 2 + L)) * (1 + L)$
MODIS:	$((2 - 1) / (2 + 1 + L)) * (1 + L)$
Ikonos:	$((4 - 3) / (4 + 3 + L)) * (1 + L)$
QuickBird:	$((4 - 3) / (4 + 3 + L)) * (1 + L)$
Spot 5:	$((3 - 2) / (3 + 2 + L)) * (1 + L)$

Figura 10. Fórmulas de cálculo del índice SAVI para distintos sensores. (Fuente: Muñoz, 2013)

2.10.7 EVI (Índice de Vegetación Mejorado)

El Índice de Vegetación Mejorado, comparado con otros índices como el NDVI, cuenta con una sensibilidad mejorada sobre regiones de alta biomasa. Además, cuenta con una capacidad mejorada de monitoreo de la vegetación a través de un desacoplamiento de la señal del fondo del dosel y una reducción en las influencias de la atmósfera (según Didan et al., 2015 como se citó en Borja, 2020). La ecuación utilizada para obtener EVI es la siguiente:

$$EVI = G * \frac{NIR - RED}{NIR + C1RED - C2BLUE + L} \dots Ecuación (6)$$

Donde NIR, RED y BLUE son las reflectancias superficiales total o parcialmente corregidas por la atmósfera (Absorción de ozono y Rayleigh); L es el ajuste del fondo del dosel que toma en cuenta la transferencia radiante diferencial del infrarrojo cercano y el rojo a través del dosel; C1 y C2 son los coeficientes de resistencia al aerosol; y G es un factor de ganancia o escala. Los valores de los coeficientes son, L=1, C1=6, C2=7.5 y G=2.5 (según

Didan et al., 2015 como se citó en Borja, 2020). El EVI al igual que el NDVI, tiene valores el -1 y 1, dicho rango es obtenido a partir de la multiplicación entre los valores brutos arrojados por MOD13A1 y el factor de escala.

Los valores positivos de EVI están asociados a la presencia de vegetación, entre mayor sea dicho valor más robusta y vigorosa será la vegetación. (Borja, 2020)

2.10.8 GCI (Índice de Clorofila Verde)

En teledetección, el GCI o Índice de Clorofila Verde se usa para estimar el contenido de clorofila de las hojas en varias especies de plantas. El contenido de clorofila refleja el estado fisiológico de la vegetación; disminuye en plantas estresadas y, por lo tanto, puede usarse como un evaluador de la vigorosidad de las plantas.

La fórmula de cálculo en la siguiente:

$$GCI = \left(\frac{NIR}{GREEN} \right) - 1 \dots Ecuación (7)$$

Este Índice de Vegetación es útil para monitorear el impacto de la estacionalidad, el estrés ambiental o, también, la aplicación de los pesticidas en su efecto sobre la salud de las plantas. (Ramos, 2020)

2.11 Sistemas de Información Geográfico (SIG)

Básicamente, un SIG ha de permitir la realización de las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).
- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc.

En función de cuál de estos aspectos se valore como más importante, encontramos distintas definiciones formales para el concepto de un SIG. Una definición clásica de un SIG

anota que es un elemento que permite analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre. En palabras habituales, un SIG es un conjunto de software y hardware diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos.

De igual modo, un SIG puede considerarse como un mapa de orden superior, entendiendo que se trata de una forma más potente y avanzada de hacer todo aquello que, previamente a la aparición de los SIG, se llevaba a cabo mediante el uso de mapas y cartografía en sentido clásico. Es decir, los SIG representan un paso más allá de los más. No obstante, esta definición resulta en exceso simplista, pues más y SIG no son conceptos equiparables en el contexto actual de estos últimos.

Un mapa es una representación de un conjunto de datos espaciales y, aunque esta representación resulta de enorme importancia, en el entorno de un SIG no es sino un elemento más de una serie de componente (tales como el software y el hardware que se mencionó anteriormente). Más aún, un SIG contiene no solo los datos y la representación, sino también las operaciones que pueden hacerse sobre el mapa, que no son ajenas a este sino partes igualmente de todo el sistema conformado por el SIG.

Debe entenderse, pues, un SIG, como un elemento complejo que engloba una serie de otros elementos conectados, cada uno de los cuales desempeña una función particular. Estos elementos son; los datos, los procesos, la visualización la tecnología y el factor organizativo.

Con lo anterior, una definición más precisa es decir que un SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.(Olaya, 2014)

2.11.1 Componentes de un SIG

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) está compuesto por los siguientes elementos (Torres, 2017):

- Hardware: se compone de equipos electrónicos.
- Software: es el encargado de realizar las operaciones y manipulación de los datos (programas). Sus componentes principales son:

- Sistema para el manejo de base de datos.
- Interfaz gráfica de usuarios para el fácil acceso a las herramientas.
- Herramientas para la captura y el manejo de la información geográfica.
- Herramientas que permitan la búsqueda y consultas de análisis y visualización de los datos geográficos.
- Datos espaciales: es la información georreferenciada utilizada en los sistemas de información geográfica que pueden ser adquiridas por quien utiliza el programa, así como por terceros que dispongan de los datos necesarios.
- Equipo humano: personas que realizan los análisis siguiendo sus propios criterios.
- Procedimientos: métodos basados en un buen diseño y reglas de actividad definidas, siendo éstas, los modelos y prácticas operativas características de cada organización.

2.11.2 Funcionamiento de los Sistemas de Información Geográfica

Un sistema de información geográfica, básicamente, trabaja como una base de datos que almacena datos alfanuméricos (información geográfica) asociados por un identificador común a los objetos existente en un mapa digital. De esta forma, es posible conocer los atributos de un objeto que está siendo señalado, al igual, qué si se realiza una pregunta en la base de datos cerca de un registro, se puede saber su localización en el mapa.

Una de las funciones más importantes de los sistemas de información geográfica, y que nos ayudan a gestionar la información espacial, es la permisividad que tiene el sistema para separar la información en diferentes capas temáticas y almacenarlas de forma independiente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, además de facilitar al profesional la posibilidad de relacionar la información existente en diversas capas a través de la topología de objetos, con el fin de generar otra capa nueva obteniendo los resultados deseados. (Torres, 2017)

El funcionamiento de un sistema de información geográfica consta de las siguientes fases:

- Entrada de la información en el sistema, ya sea digital o pendiente de digitalización.
- Almacenamiento y actualización de las bases de datos georreferenciando la información mediante coordenadas geográficas de latitud y longitud.

- Análisis e interpretación de los datos georreferenciados.
- Salida de la información en forma de diferentes productos, dependiendo de las necesidades del usuario.

2.11.3 Agricultura de precisión y los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas claves dentro de la agricultura de precisión, ya que permite la recolección, almacenamiento, análisis y procesamiento de información georreferenciada de un campo o cultivo definido, dando lugar a un mapa digital en el cual, es posible interactuar con él.

Gracias a los sistemas de información geográfica combinados con sistemas de posicionamiento global (GNSS) es posible determinar los puntos exactos para la realización de extracciones de muestras del suelo para un posterior análisis, un mejor uso de fertilizantes y otros correctivos para los suelos, determinando el umbral económico para el tratamiento de plagas y malezas, y así, proteger los recursos naturales.

Hoy en día, la maquinaria agrícola está equipada con tecnología que permite la recopilación de gran cantidad de capas de información sobre un sector o lote de un campo. Una de estas capas corresponde a los llamados mapas de rendimientos, que son modelos digitales formados por un conjunto de puntos de mapeo registrados durante la cosecha de un lote. (Torres, 2017)

2.12 Datos espaciales

Las infraestructuras de datos espaciales han supuesto un cambio trascendental en la gestión y el análisis de la información geográfica. Son soluciones tecnológicas que se basan y aprovecha la Red Internet, permitiendo la globalización en la intercomunicación, e incluso la interoperabilidad, entre los sistemas de información geográfica. Saltan sobre la capacidad tradicional que nos dan los sistemas de información geográfica (SIG), de construir modelos del mundo real orientados a satisfacer necesidades específicas contando con la disponibilidad en el sistema de unos datos específicos, dejando de lado los datos y accediendo e interoperando con servicios de red que proporcionan información geográfica elaborada por otros sistemas de información geográfica. Esta información geográfica elaborada pasa a

integrarse directamente en nuestro sistema, o a construir información de entrada para los procesos que desarrolla nuestro sistema.

La fuerza de la infraestructura de datos especiales no es la capacidad de acceder y hacer acopio en nuestro propio SIG de datos geográficos, si no la posibilidad de encadenar servicios de información geográfica que nos evitan tanto la acumulación de datos como la realización de procesos en nuestro sistema. Se puede decir que las infraestructuras de datos espaciales, en el mundo de la información geográfica, han despejado el camino para el acceso a los servicios de información geográfica y a la verdadera interoperabilidad entre ellos. (Iniesto & Núñez, 2013)

Los datos espaciales son entidades espaciotemporales que cuantifican la distribución, estado y los vínculos de los fenómenos u objetos naturales y sociales, y se caracterizan por tener:

- Posición absoluta: sobre un sistema de coordenadas (x, y, z).
- Posición relativa: frente a otros elementos del paisaje (topología).
- Figura geométrica que lo representa: punto, línea, polígono.
- Atributos que lo describen: características del elemento o fenómeno.

Las características propias de los datos geoespaciales dotan a estos de una gran potencialidad de análisis, al tiempo que condicionan o limitan otras operaciones. (Lopez & Torres, 2015)

2.12.1 Componentes de los datos geoespaciales

Los datos geoespaciales tienen tres componentes que hacen referencia a su localización, atributos y al tiempo.

- Componente espacial: Está ligada a la posición dentro de un sistema de referencia establecido de las propiedades de los objetos y a las relaciones espaciales que existen entre ellos. Esta componente es la que hace que la información pueda calificarse como geográfica, ya que sin ella no se tiene una localización, y por tanto el marco geográfico no existe. La componente espacial responde a la pregunta ¿dónde? A la

ubicación geográfica, las propiedades espaciales y a las relaciones espaciales que existen entre ellos.

El ser humano tiene distintas formas de conceptualizar el mundo real. Cuando se desplaza de un lugar a otro, utiliza relaciones topológicas (cerca, lejos, dentro de, al norte de, etc.) pues se orienta por referencias relativas con respecto a un lugar conocido. Las relaciones topológicas más importantes son:

- Adyacencia (entre polígonos)
 - Contigüidad (entre línea y polígono)
 - Pertenencia (arcos a polígonos)
 - Conectividad (entre arcos, en redes)
 - Inclusión (punto en polígono, línea de polígono, polígono en polígono)
- **Componente temática:** Está ligada a los atributos de los objetos con los que representamos el mundo real. Cada objeto puede registrar un determinado valor para sus atributos (variables), los cuales pueden presentar cierta regularidad en el espacio y en el tiempo, además pueden ser de distinto tipo y escala de medida, Los atributos se expresan como variables, que pueden ser:
 - Continuas: admiten cualquier valor en un rango.
 - Discretas: sólo admiten valores en números enteros.
 - Fundamentales: se obtienen directamente del proceso de medición. Por ejemplo, el tamaño de una población.
 - Derivadas: se obtienen al relacionar dos o más variables fundamentales. Por ejemplo, la densidad de la población.

Para que las variables (atributos) puedan ser almacenadas en un Sistema de Información Geográfica, deben ser descritas mediante categorías. Esta descripción se realiza por medio de escalas.

- **Componente temporal:** La consideración de la dimensión temporal en un SIG supone la necesidad de almacenar y tratar grandes volúmenes de datos, ya que cada estrato, capa o nivel de información se debe almacenar tantas veces como momentos temporales se consideren para el análisis del área de estudio. (Lopez & Torres, 2015)

2.12.2 Formatos de datos espaciales

La base de datos espacial de un SIG no es sino la representación digital del mundo real en base a objetos discretos. La información sobre estos objetos, de naturaleza doble, temática y espacial, expresada de forma numérica, origina una colección de datos georreferenciados que actúa como modelo de la realidad. Las directrices y normas necesarias para la obtención de la información, en este formato, constituye lo que se denomina modelo de datos. Dos son los modelos básicos sobre los que se basa toda la arquitectura de los sistemas de información geográfica: el modelo ráster y el modelo vectorial. (Santos & Cocero, 2017)

2.12.3 Modelo ráster

En el modelo ráster, la zona de estudio se divide en forma sistemática en una serie de unidades mínimas (denominadas habitualmente celdas), y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe. Se puede ver esto en detalle en la Figura 11, que muestra aumentada una porción de la malla ráster de elevaciones, de modo que los límites de las celdas se hacen patentes y puede además representarse en cada una de ellas su valor asociado.

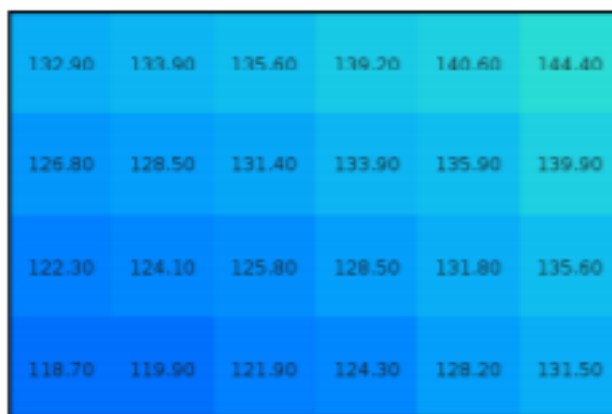


Figura 11. Celdas de una malla ráster con sus valores asociados. (Fuente: Olaya, 2014)

Aunque la malla de celdas puede contener información sobre varias variables, lo habitual es que trate una única variable. Es decir, que se tenga un único valor para cada una de las celdas.

La característica principal del modelo ráster, y que le confiere gran parte de sus propiedades más interesantes, especialmente de cara al análisis, es su sistematicidad. La división del espacio en unidades mínimas se lleva a cabo de forma sistemática de acuerdo con algún patrón, de tal modo que existe una relación implícita entre las celdas, ya que estas son contiguas entre sí, cubren todo el espacio, y no se solapan. Por tanto, la posición de una celda depende de las restantes, para así conformar en conjunto toda la malla regular que cumple las anteriores características. Dicho de otro modo, el orden propio de las celdas, presente gracias a la división sistemática realizada, aporta un elemento adicional que las relaciona entre sí.

Como unidad mínima pueden tomarse elementos de diversas formas. La más habitual es mediante unidades de forma cuadrada, aunque también pueden ser formas rectangulares o incluso triangulares o hexagonales. No obstante, los SIG habituales se limitan a modelos de celdas cuadradas, y las implementaciones de otros modelos son de uso muy reducido y en aplicaciones muy específicas que en general no están orientadas al uso general ni disponibles de forma accesible al usuario común. Justo a esto, la información geográfica en formatos ráster distintos de la división en celdas cuadradas es prácticamente inexistente, haciendo más difícil el empleo de estos formatos en condiciones normales de trabajo.

Siendo, pues, las mallas ráster de celdas cuadradas las más habituales, se puede ver algo más acerca de estas y sus elementos básicos. Dos son los elementos principales que resultan necesarios para una definición completa de una capa ráster:

- Una localización geográfica exacta de alguna celda y una distancia entre celdas, para en base a ellas, y en virtud de la regularidad de la malla, conocer las coordenadas de las restantes.
- Un conjunto de valores correspondientes a las celdas.

La orientación de las capas ráster es habitualmente Norte-Sur, de tal modo que si se pasa de la primera a la segunda se está descendiendo en latitud (este hecho sería matizable en función de la proyección empleada). Dicho de otra forma, la parte de arriba de la imagen es el norte, y la de abajo es el sur.

Otro parámetro necesario junto con la orientación de la malla y la situación geográfica de una de sus celdas es el denominado tamaño de la celda o tamaño de píxel, también conocido como resolución, pues, en efecto, su magnitud define la resolución de la capa, un tamaño de celda mayor implica menor resolución, y viceversa. (Olaya, 2014)

Cuando se descargan este tipo de imágenes desde los diferentes satélites en órbita y dependiendo del uso que se les dará, es necesario realizar un tratamiento para ser adecuadas a las necesidades que se tengan.

2.12.4 Características de las imágenes y tratamiento de la información

Actualmente hay una amplia variedad de satélites cuyas imágenes se proporcionan de forma gratuita, existiendo un gran volumen de información distribuida de la superficie terrestre.

Previamente al uso de esta información es necesario calibrar y corregir las imágenes geoméricamente (para posicionar la imagen en la zona territorial adecuada y eliminar distorsiones, georreferenciando la información: dando a cada píxel su localización en un sistema de coordenadas estándar), radiométricamente (corrección de problemas mecánicos y potenciales fallos de calibración de los sensores, eliminando imperfecciones presentes en los píxeles, transformando la información digital a radiancia), atmosféricamente (eliminando las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie) y topográficamente si procede (en zonas con un gradiente vertical muy acentuado).

Cada vez más, la tendencia de las distintas agencias es a ofrecer las imágenes de satélite ya corregidas (o corregida hasta un cierto nivel), o las herramientas necesarias para su preprocesamiento. (Andreu et al., 2021)

2.12.5 Modelo vectorial

El otro modelo principal de representación es el modelo vectorial. En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes. La forma de estas entidades (su frontera), se codifica de modo

explícito, a diferencia del modelo ráster, donde venía implícita en la propia estructura de la malla.

Si el modelo ráster era similar al modelo conceptual de campo, el vectorial lo es al de entidades discretas, pues modeliza el espacio geográfico mediante una serie de primitivas geométricas que contienen los elementos más destacados de dicho espacio. Estas primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos.

Utilizando puntos, líneas o polígonos, puede modelizarse el espacio geográfico si se asocia a estas geometrías una serie de valores definitorios. La componente espacial de la información queda así en la propia primitiva (recoge la forma, posición y otras propiedades espaciales), y la componente temática queda en dichos valores asociados (Figura 12).

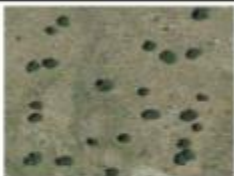


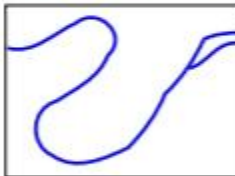


Primitiva	Entidad espacial	Representación	Atributos																												
Puntos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Área</th> <th>Diámetro</th> <th>Nombre</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>17,5</td> <td>35</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>45,5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> <td>30,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>15,7</td> <td>36,1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ID	Área	Diámetro	Nombre	1	17,5	35		2	22	45,5		3	15	30,2		4	15,7	36,1				
ID	Área	Diámetro	Nombre																												
1	17,5	35																													
2	22	45,5																													
3	15	30,2																													
4	15,7	36,1																													
...																															
...																															
Líneas			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho (m)</th> <th>Caída (m/m)</th> <th>Longitud (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>4,3</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>6,3</td> <td>3,9</td> <td>5,2</td> </tr> </tbody> </table>	Ancho (m)	Caída (m/m)	Longitud (m)	15	4,3	35	6,3	3,9	5,2																			
Ancho (m)	Caída (m/m)	Longitud (m)																													
15	4,3	35																													
6,3	3,9	5,2																													
Polígonos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie (m²)</th> <th>Profundidad (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31454</td> <td>1037</td> </tr> </tbody> </table>	Superficie (m²)	Profundidad (m)	31454	1037																								
Superficie (m²)	Profundidad (m)																														
31454	1037																														

Figura 12. Primitivas en el modelo de representación vectorial y ejemplos particulares de cada una de ellas con atributos asociados. (Fuente: Olaya, 2014).

No debe pensarse que las capas vectoriales, sean del tipo que sean, se emplean únicamente para recoger fenómenos o elementos cuya información coincide con la de las primitivas geométricas (es decir, puntos para recoger elementos puntuales, líneas para aquellos elementos con una dimensión mucho menor que la otra, y polígonos para el caso de superficies). Se debe recordar que el modelo vectorial también sirve para representar campos y recoger variables tales como la elevación. (Olaya, 2014)

2.12.6 Análisis espacial

Para aprovechar o explotar al máximo los atributos de la información geográfica es importante realizar un análisis espacial. Esta disciplina consiste en la aplicación y generación de modelos, métodos y herramientas para descubrir relaciones y patrones en datos geográficos, y explicar así el comportamiento de los fenómenos geográficos.

El análisis espacial, básicamente es la incorporación del método científico clásico en el campo de la geografía, disciplina que en estos años buscaba establecer conceptos y metodologías transversales en diferentes áreas. La aplicación de modelos físicos, matemáticos y económicos para el estudio de fenómenos geográficos impulsó el desarrollo de métodos y herramientas de exploración y manejo de datos geográficos incorporando posteriormente procesos computacionales y cartografía digital con el objetivo de facilitar el análisis espacial.

El análisis espacial contempla métodos de exploración de datos que permiten identificar comportamientos característicos de los procesos observados en forma de patrones, como un primer acercamiento a la descripción y caracterización de un fenómeno. Requiere de herramientas y técnicas de visualización a nivel del dato individual o del conjunto de datos tales como resaltados, acercamientos, alejamientos, consultas temáticas, etc. Pueden considerarse como tareas elementales a realizar sobre los datos e información de referencia o localización geográfica del dato y de los atributos asociados a este. A este nivel de exploración simple se le denominará Nivel I.

En otro nivel de interacción y manejo de los datos se pueden realizar tareas más avanzadas para comparar diferentes atributos en un mismo conjunto de datos o para comparar patrones entre diferentes atributos y/o diferentes conjuntos de datos (Figura 13). En este nivel se encuentran tareas como la búsqueda y comparación de patrones. Las herramientas y técnicas de visualización se aplican más bien a nivel del conjunto o subconjunto de datos y hacen uso extensivo de otras técnicas de visualización que complementan el despliegue visual como gráficos, matrices, clasificación plantillas de mapas, enlaces a bases de datos externas, animaciones o hipermapas, vuelos virtuales, etc. A este nivel de exploración se le denominará nivel II y a él corresponden las consultas espaciales.

Tras la exploración de datos se inicia un proceso de modelación geográfica donde se determina qué tipo de representación espacial sería más adecuada para simular el comportamiento del fenómeno estudiado. Esta fase de análisis a nivel primario permite hacer una serie de supuestos aplicables al conjunto de datos y de procesos involucrados, así como de modelos geográficos adecuados. El resultado de este análisis primario es una hipótesis general sobre el comportamiento observado. Si bien los datos tienen inicialmente una forma lógica de representación (puntos, líneas, polígonos), no significa que el fenómeno pueda caracterizarse de manera eficiente tal como se ha observado. Por ejemplo, muchas variables meteorológicas se observan en puntos fijos (estaciones), cuando su comportamiento es más bien distribuido espacial y temporalmente. Por lo tanto, se requieren modelos de superficies o fluidos para modelarlas. La generalización de un comportamiento observado mediante la aplicación de supuestos y modelos aplicables constituye un ejercicio de inducción. Una vez que se determina un modelo espacial apropiado para representar el fenómeno estudiado, se procede a realizar tareas de análisis que soporten la modelación geográfica para explicar el origen y significado del comportamiento observado.

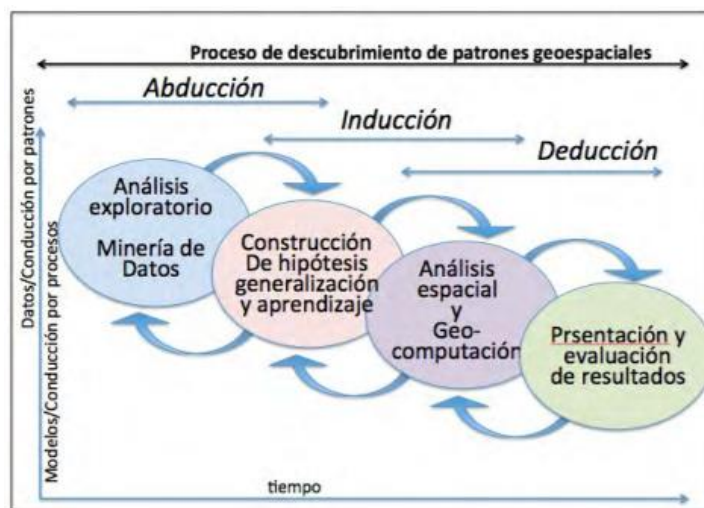


Figura 13. Proceso de identificación de patrones geoespaciales. (Fuente: según Gahegan et., al 2001, como se citó en Bernabé & López, 2012)

Finalmente, se aplican técnicas y métodos de análisis que aprueben la pertinencia y desempeño de los modelos, y la aprobación o rechazo de hipótesis.

Cuando se tiene un conocimiento suficiente sobre un proceso no se requiere un análisis exploratorio de datos. En este caso, se aplican modelos conocidos a un fenómeno observado y el análisis se limita a determinar el desempeño del modelo y su ajuste, con un método deductivo. El proceso general de análisis espacial resulta en la generación de información acerca de un proceso observado, lo cual permite cambiar la perspectiva del analista o usuario de los datos geográficos a lo largo del proceso. (Bernabé & López, 2012)

No debe verse el análisis espacial como un conjunto de complejos algoritmos, sino como una colección de procesos con los que explotar los datos espaciales. Estas operaciones producen resultados de diversa clase, como pueden ser los siguientes:

- Capas de datos geográficos, en cualquiera de los formatos posibles, y con cualquier tipo de información.
- Tablas de datos.
- Escalares o vectores.

En ocasiones, los resultados expresan la misma variable que el dato de partida (por ejemplo, el cálculo de una media), y en otros las variables de entrada y salida son distintas (por ejemplo, si a partir de una capa de elevaciones calculamos una de pendientes). Asimismo, todo análisis espacial parte de un conjunto de datos espaciales, pudiendo estos ser de un único tipo, o de varios distintos que se combinan en un procedimiento concreto. (Olaya, 2014)

2.13 Generación de productos

Existe una alta gama de productos y aplicaciones que pueden elaborarse utilizando como base los datos espaciales y la teledetección, los cuales pueden orientarse según los intereses o fines para los cuales se necesitan.

Por ejemplo, los sistemas vegetales como la vegetación y los bosques proporcionan propiedades de reflectancia únicas de la radiación recibida permitiendo su caracterización mediante técnicas de teledetección.

Dentro de las utilidades o productos que se pueden generar a partir del manejo de datos espaciales se encuentran:

- Georreferenciar datos temáticos o generarlos desde un principio sobre una estructura de datos ya georreferenciado.
- Dotar de un contexto geográfico de fondo a cualquier conjunto de datos y hacerlo más comprensible.
- Mezclar o sobreponer varios conjuntos de datos temáticos, que encajen y sean consistentes por estar basados en los mismos datos fundamentales.

Por otro lado, los beneficios del concepto de datos espaciales se mostrarán más en el momento de su actualización que de su creación, pues son creados por aquellos que los producen a través de sus ocupaciones cotidianas y actualizadas con mayor frecuencia. Además, los productores podrán desarrollar sus respectivos datos mucho más detallados y con mayor calidad, basados en los requisitos temáticos de su propia especialidad; asimismo, se facilita el proceso de compartir datos espaciales a otros usuarios. A escala nacional, se definen los datos espaciales fundamentales comunes, por medio de acuerdos legales comunitarios sobre su contenido. Un número variable de estratos de datos puede considerarse de uso común y de importancia nacional y transnacional como datos fundamentales.

En complemento a éstos se puede indicar que los datos temáticos, son los elaborados a partir de datos de referencia o sobre ellos, a los que se añaden otros datos, que describen determinados temas concretos que ocurren sobre el territorio, como por ejemplo la geología, turismo, medioambiente, climatología, etc. (IPGH, 2017)

Existen distintas herramientas o softwares que hacen uso de toda esta información en conjunto con el fin de generar y organizar nuevos tipos de información de una manera más metódica y adaptada completamente al fin para el cual se requiere. Un ejemplo de lo anterior es el Software Google Earth Engine, el cual funciona principalmente como un gestor a gran escala de generación de productos y también de productos terminados en la misma herramienta.

2.13.1 Google Earth Engine (GGE)

Actualmente existe una enorme cantidad de información satelital obtenida a escala global, recopilada por diferentes sensores que pertenecen a diferentes proyectos o agencias. Sus datos son de diferente naturaleza como, por ejemplo, observaciones atmosféricas,

elevación, así como respuestas de la cubierta de la Tierra en varias porciones del espectro electromagnético, registradas con varias resoluciones espaciales y temporales, conforman un vasto repositorio. Hoy, los datos recolectados por diferentes sensores, como Landsat, MODIS o Sentinel, se distribuyen de forma gratuita. (Perilla & Mas, 2020)

Es así que los estudios basados en percepción remota se han visto limitados no por la falta de información, sino al contrario, por la ausencia de capacidad para analizar todos los datos disponibles. Esto ha dado como resultado investigaciones a escalas locales o regionales de baja resolución espacial o temporal. En ocasiones, los análisis para el monitoreo de los cambios de cubierta del suelo pueden demorar mucho, de modo que los resultados no son útiles para el apoyo a acciones de fiscalización y de respuesta rápida.

Google Earth Engine nació a finales del 2010 como una forma para eliminar esa limitante computacional y permitir a los usuarios realizar análisis complejos, involucrando grandes cantidades de datos y expandiendo la frontera de la ciencia en percepción remota. Esta plataforma de análisis permite procesar información geoespacial en la nube sin necesidad de ocupar la memoria de la computadora del usuario. Al mismo tiempo, GEE está ligado directamente a varios programas satelitales que permiten integrar en el manejo de las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas. GEE es, por lo tanto, una solución innovadora para el manejo de los datos masivos (“Big Data”), que permite afrontar problemas globales, dando resultados velozmente. De esta manera, permite proponer y actuar en soluciones para dichos problemas de forma ágil.

2.13.2 Plataforma de Google Earth Engine

GEE está compuesto por cuatro elementos principales. El primero es la infraestructura de Google, la cual pone a disposición del usuario sus servidores, permitiendo así hacer análisis en paralelo con cerca de 10.000 CPUs. Esto agiliza la velocidad de procesamiento, en comparación con una computadora individual. (Perilla & Mas, 2020)

El segundo elemento es el acervo de datos. Google tiene almacenado todas las imágenes de varios sensores (Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros). Estas bases de datos se actualizan a medida que se toman nuevas imágenes (cerca de 6000 nuevas escenas diarias), creando así un enorme catálogo de datos geoespaciales. Estas bases se pueden consultar a

través de diferentes criterios (calidad, localización, fechas) sin necesidad de descargar ni solicitar acceso a las imágenes.

El tercer elemento es la API (*Application Program Interface*), la cual consiste en una serie de comandos y funciones preestablecidas, escritor en lenguaje JAVA, que permite una programación sencilla al desarrollar algoritmos para las investigaciones. Sin embargo, dichas funciones no pueden modificarse ni tampoco se puede acceder a su código, lo cual impide al usuario realizar modificaciones para lograr análisis alternativos a los preestablecidos.

Finalmente, el cuarto elemento es el Code Editor, el cual es un entorno de desarrollo integrado en línea, donde se juntan todos los elementos. Aquí es donde el usuario puede, a través de código de trabajo (“scripts”), llamar a los datos, procesar y visualizarlos de manera virtual con los servidores de Google, teniendo así sus resultados e información en la nube. (Perilla & Mas, 2020)

El uso de la tecnología en trabajos agrícolas es sumamente importante, ya que se parte de la premisa de que, al utilizarla de una forma apropiada, los resultados que se obtengan contarán con una buena calidad y precisión. Sin embargo, existen diferentes estructuras y labores manuales que se realizan en campo que pueden complementar perfectamente un estudio, en este caso de drenaje, como los son los pozos de observación.

Los productos generados mediante la utilización de todos los elementos mencionados anteriormente generan información valiosa en el ámbito agrícola, estos son utilizados finalmente en la toma de decisiones relevantes dependiendo del objetivo que se quiera alcanzar con un alto grado de exactitud, funcionando como pilar fundamental en lo que se conoce como Agricultura de precisión.

2.13.3 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión se basa en el manejo específico de un área de cultivo. Para ello, se utilizan herramientas tecnológicas como el posicionamiento global, dispositivos de distribución de riego, fertilización y plaguicidas variables, sensores climatológicos de cultivo y, últimamente, los drones. Estas herramientas en conjunto realizan el proceso de recolección

de la información la cual es finalmente plasmada en mapas digitales sobre los cuales se toman decisiones de manejo.

La agricultura de precisión tiene como herramientas: el uso de tecnologías de posicionamiento global satelital (GPS), sensores láser en tierra para medir el nivel del terreno e imágenes aéreas para evaluar las diferentes variables de cada determinada parcela y, claro está, el país debe contar con un buen sistema de información geográfica.

Para entender en estado de la vegetación en general, se utilizan los índices de vegetación, aplicando las operaciones algebraicas entre las bandas de la imagen tratada; esta puede ser tomada por medio de un dron, un avión o un satélite, dando como resultado destacar algunas características como la vegetación, el suelo, la radiación solar y la humedad, entre otras, y determinar los parámetros de la cobertura vegetal por medio de los píxeles.

En la agricultura de precisión por medio de drones se captan imágenes originadas por cámaras hiperspectrales que capturan información del espectro electromagnético incluido el espectro visible con frecuencias de cada banda muy pequeños, las cámaras multispectrales que pueden obtener el RGB más cualquier otra banda con información adicional a parte de la visible; las cámaras infrarrojas o térmicas se usan para obtener las diferentes bandas del espectro, que con una oportuna implementación permiten adquirir los datos con los que se generan las valoraciones de los cultivos tratados y, de esta forma, prestar una adecuada atención de manera puntual y localizada a los cultivos. En cambio, en la agricultura convencional se aplican de manera uniforme los insumos o fertilizantes para la prevención de enfermedades sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los diversos factores implicados en el buen desarrollo de los cultivos; en otras palabras, no se presta una adecuada atención y se generan gastos innecesarios.

Mediante las imágenes tomadas con los drones se pueden generar diagnósticos que permiten diversas operaciones, tales como, gestiones hídricas, fertilización, detección de enfermedades y cosechas selectivas, que, a su vez, dan paso a la producción de mapas agronómicos los cuales representan claramente los problemas y avances de los cultivos. (González et al., 2016)

2.14 Correlación estadística e Índices de correlación

Las técnicas de correlación y las de regresión están estrechamente relacionadas, aunque obedecen a estrategias de análisis un tanto diferentes. Por un lado, el coeficiente de correlación determina el grado de asociación lineal entre X y Y, sin establecer a priori ninguna direccionalidad en la relación entre ambas variables. Por el contrario, la regresión lineal simple permite cuantificar el cambio en el nivel medio de la variable Y conforme cambia la variable X, asumiendo implícitamente que X es la variable explicativa o independiente y Y es la variable respuesta o dependiente.

La finalidad de la correlación es examinar la dirección y la fuerza de la asociación entre dos variables cuantitativas. Así conoceremos la intensidad de la relación entre ellas y si, al aumentar el valor de una variable, aumenta o disminuye el valor de la otra variable. Hay dos coeficientes de correlación que se usan frecuentemente: el de Pearson (paramétrico) y el de Spearman (no paramétrico, se utiliza en aquellos casos donde las variables examinadas no cumplen criterios de normalidad o cuando las variables son ordinales).

El coeficiente de correlación de Pearson evalúa específicamente la adecuación a la recta línea que defina la relación entre dos variables cuantitativas. El coeficiente no paramétrico de Spearman mide cualquier tipo de asociación, no necesariamente lineal. (Laguna, 2014)

Antes de entrar en el proceso de búsqueda de correlaciones teniendo una buena cantidad de variables, se hace necesario en algunas ocasiones trabajar con grupos más pequeños y representativos como lo son los promedios. Existen herramientas que permiten validar el uso de estos datos, como por ejemplo la prueba t de Student.

2.14.1 Prueba estadística T de Student

La prueba “t” de Student es un tipo de estadística deductiva. Se utiliza para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos grupos. Como toda la estadística deductiva, se asume que las variables dependientes tienen una distribución normal. Se especifica el nivel de probabilidad (nivel de la alfa, nivel de la significación) se está dispuesto a aceptar antes de cercar los datos. (Osteópatas de la Federación Científica Europea, 2019)

Con una prueba t-prueba, el investigador desea indicar con un cierto grado de confianza que la diferencia obtenida entre las medias de los grupos de la muestra sea demasiado grande.

Existen 5 factores que contribuyen para indicar si la diferencia entre dos medias de los grupos se puede considerar significativa:

- Cuanto mayor es la diferencia entre las dos medias, mayor es la probabilidad que una diferencia estadística significativa exista.
- La cantidad de traslape que existe entre los grupos (es una variación dentro de los grupos). Cuantas más pequeñas son las variaciones que existen entre los dos grupos, mayor es la probabilidad que una diferencia estadística exista.
- El tamaño de la muestra es extremadamente importante en la determinación de la significación de la diferencia entre las medias. Aumentando el tamaño de la muestra, las medias tienden a ser más estables y más representativas.
- Un nivel más grande de alfa requiere menos diferencia entre las medias.
- Se debe utilizar una hipótesis (con dos colas) no directivas.

2.14.2 Procedimiento de desarrollo de prueba T de Student

La prueba t de dos muestras es un método utilizado para probar si las medias de población desconocidas de dos grupos son iguales (JMP Software Estadístico, n.d.). Para desarrollarla se pueden seguir los siguientes pasos:

- Se debe calcular la estadística de prueba, es decir, hallar la diferencia entre los promedios.
- Se debe calcular la desviación estándar de los grupos de datos que se utilizaron para hallar los promedios del paso anterior.
- Calcular la desviación estándar combinada, mediante la siguiente ecuación:

$$S^2_p = \frac{((n_1 - 1) * s_1^2) + ((n_2 - 1) * s_2^2)}{n_1 + n_2} \dots \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

S^2_p : desviación estándar combinada [adimensional]

n_1 : tamaño muestral 1 [adimensional]

n_2 : tamaño muestral 2 [adimensional]

- Obtener la raíz cuadrada de la varianza combinada para obtener la desviación estándar combinada.
- Calcular la estadística de la prueba mediante:

$$t = \frac{\text{diferencia de promedios de grupo}}{\text{error estándar de la diferencia}} \dots \text{Ecuación (9)}$$

- Se decide el riesgo que se está dispuesto a asumir por declarar una diferencia significativa (α).
- Encontrar el valor teórico de la distribución t basado en la hipótesis planteada en las tablas de valores para la distribución t. Para encontrar este valor se necesita el nivel de significación (α) y los grados de libertad. Los grados de libertad (gl) se basan en el tamaño muestral de los dos grupos. Dichos grados de libertad se calculan mediante:

$$gl = n_1 + n_2 - 2 \dots \text{Ecuación (10)}$$

- Se comparan el valor de la estadística de prueba (T_0) con el valor de t de la tabla de valores. Si $T_0 > t$ se rechaza la hipótesis y el porcentaje de error asumido, mientras que si $t > T_0$ se acepta la hipótesis y el porcentaje de error asumido.

Cuando ya se cuenta con la validación de valores representativos de una gran cantidad de datos se hace más sencillo buscar correlaciones entre las variables que se tienen. Uno de los métodos que más se aplican es el de Pearson y R^2 .

2.14.3 Coeficientes de correlación de Pearson (r)

Dado dos variables, la correlación permite hacer estimaciones del valor de una de ellas conociendo el valor de la otra variable. Los coeficientes de correlación son medidas que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, es decir, son la expresión numérica que nos indica el grado de relación existente entre las 2 variables y en qué medida se relacionan.

Son números que varían entre los límites +1 y -1. Su magnitud indica el grado de asociación entre las variables; el valor $r = 0$ indica que no existe relación entre las variables; los valores ± 1 son indicadores de una correlación perfecta positiva (al crecer o decrecer X,

crece o decrece Y) o negativa (Al crecer o decrecer X, decrece o crece Y). (Suárez, 2011)
 Pueden observarse posibles escenarios de estos comportamientos en la Figura 14.

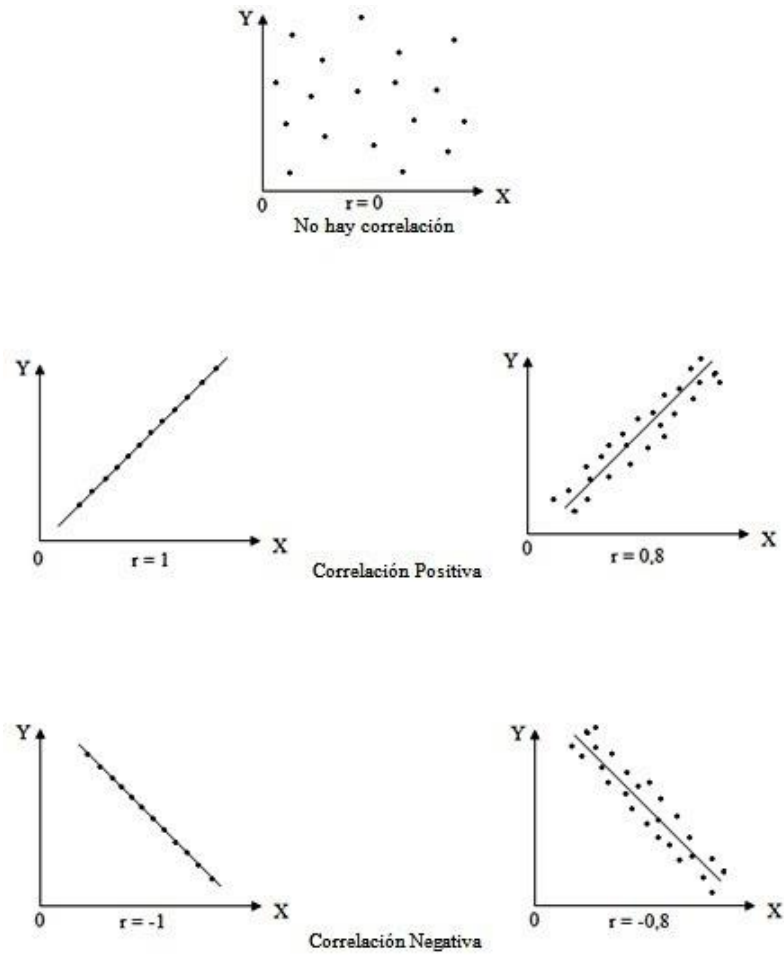


Figura 14. Comportamiento gráfico de posibles escenarios del Índice de Correlación de Pearson. (Fuente: Suárez, 2011)

Cuadro 2. Valores de correlación de Pearson y su significado. (Fuente: Suárez, 2011)

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Cuando el coeficiente de Pearson se eleva al cuadrado, el resultado indica el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra y viceversa. Es decir, el coeficiente de determinación, r al cuadrado o r^2 , es la proporción de la variación en Y explicada por X . Puede adoptar cualquier calor entre 0 y 1, inclusive.

2.14.4 Coeficiente de determinación (R^2)

Si se quiere evaluar en qué grado el modelo de regresión lineal encontrado a partir de un conjunto de observaciones explica las variaciones que se producen en la variable dependiente de éstas, la medida más importante de la bondad del ajuste es el coeficiente de determinación (R^2). Este coeficiente indica el grado de ajuste de la recta de regresión a los valores de la muestra, y se define como el porcentaje de la variabilidad total de la variable dependiente Y que es explicada por la recta de regresión.

Las características del coeficiente son:

- R^2 es una cantidad adimensional que solo puede tomar valores en $[0, 1]$.
- Cuando un ajuste es bueno, R^2 será cercano a uno (mayor será la fuerza de asociación entre ambas variables).
- Cuando un ajuste es malo, R^2 será cercano a cero (la recta no explica nada, no existe asociación entre X y Y).

Puesto que R^2 nos explica la proporción de la variabilidad de los datos que queda explicada por el modelo de regresión, cuanto más cercano a la unidad esté, mejor es el ajuste. (Laguna, 2014)

2.14.5 Relación entre R^2 y r

Es importante tener clara la diferencia entre el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación:

- R^2 : mide la proporción de variación de la variable dependiente explicada por la variable independiente.
- r: mide el grado de asociación entre las dos variables.

A diferencia de R^2 que siempre es positivo, r puede ser positivo o negativo (tendrá el mismo signo que la pendiente de la recta. Por tanto, es importante tener presente que r da más información que R^2 . El signo de **r** nos informa si la relación es positiva o negativa. Así pues, con el valor de r siempre se puede calcular el valor de R^2 , pero al revés siempre quedará indeterminado el valor del signo a menos que se conozca la pendiente de la recta. (Laguna, 2014)

Una vez que se tienen las herramientas para analizar y encontrar posibles comportamientos o correlaciones entre datos y variables específicas, se puede llegar a conclusiones que sirvan para analizar el comportamiento de variables más globales, como lo es el drenaje en un área.

2.15 Drenaje

El drenaje de tierras agrícolas consiste en un conjunto de técnicas que permiten eliminar cualquier exceso de agua y/o sales que se presenten sobre la superficie del suelo, o en la zona radicular de los cultivos, con el objetivo de proporcionar a éstos un medio adecuado para su normal desarrollo, y mantener el suelo en condiciones favorables. Al atacar los problemas de drenaje, debe hacerse contemplando simultáneamente el drenaje superficial y el subterráneo. (Villón, 2007).

2.15.1 Drenaje superficial

El drenaje superficial, tiene como finalidad la remoción del exceso de agua sobre la superficie del terreno y consiste en una serie de canales poco profundos que recogen la escorrentía superficial y la descargan a drenes colectores, Normalmente se trata de aprovechar cauces naturales o depresiones para los colectores y algunos secundarios. La necesidad del drenaje superficial se justifica en zonas donde los factores climáticos, las condiciones hidrológicas, las características de los suelos, la topografía y la utilización de la tierra, dan lugar a que el agua permanezca inundando la superficie del suelo, durante un tiempo superior al que los cultivos pueden soportar sin manifestar serios efectos sobre los rendimientos y/o sobrevivencia. (Villón, 2007)

2.15.2 Drenaje subterráneo

El drenaje subsuperficial o subterráneo, tiene como finalidad controlar la posición de la tabla de agua, nivel freático o napa freática, de forma que el balance de agua y sales en la zona radicular sea favorable para los cultivos. Para ello se elimina el agua infiltrada procedente de la lluvia, riego u otros orígenes. Se llama nivel freático, a la superficie de agua presente en el suelo, la cual marca el límite entre el suelo saturado y el suelo no saturado y que tiene la particularidad de que la presión es igual a la presión atmosférica. Generalmente, el nivel freático se ubica sobre un estrato impermeable, el cual impide el movimiento vertical del agua, produciendo la condición de suelo saturado. (Villón, 2007).

2.15.3 El drenaje y su relación con el suelo y los cultivos

Para que las semillas germinen, las plantas crezcan, se desarrollen adecuadamente y produzcan altos sedimentos, es necesario que en el suelo coexistan adecuadamente tres fases: una fase sólida, representada por las partículas de suelo; una fase líquida, representada por el agua; y una fase gaseosa, representada por el aire.

Bajo condiciones de mal drenaje o de exceso de agua, el aire presente en el suelo es removido y el espacio libre es ocupado por el agua. En tales condiciones, las plantas son afectadas en sus procesos esenciales, debido a que el oxígeno es indispensable para la respiración de las raíces. La condición de humedad excesiva influye, por una parte, en muchas propiedades del suelo; por otra, afecta directamente a los cultivos que en ellos se desarrollan. (Villón, 2007)

3 METODOLOGÍA

3.1 Flujograma de trabajo

Antes de iniciar con la descripción de la metodología desarrollada, se hizo un flujograma de trabajo a grandes rasgos con la finalidad de seguir un hilo a la hora de obtener resultados y su posterior uso y análisis.

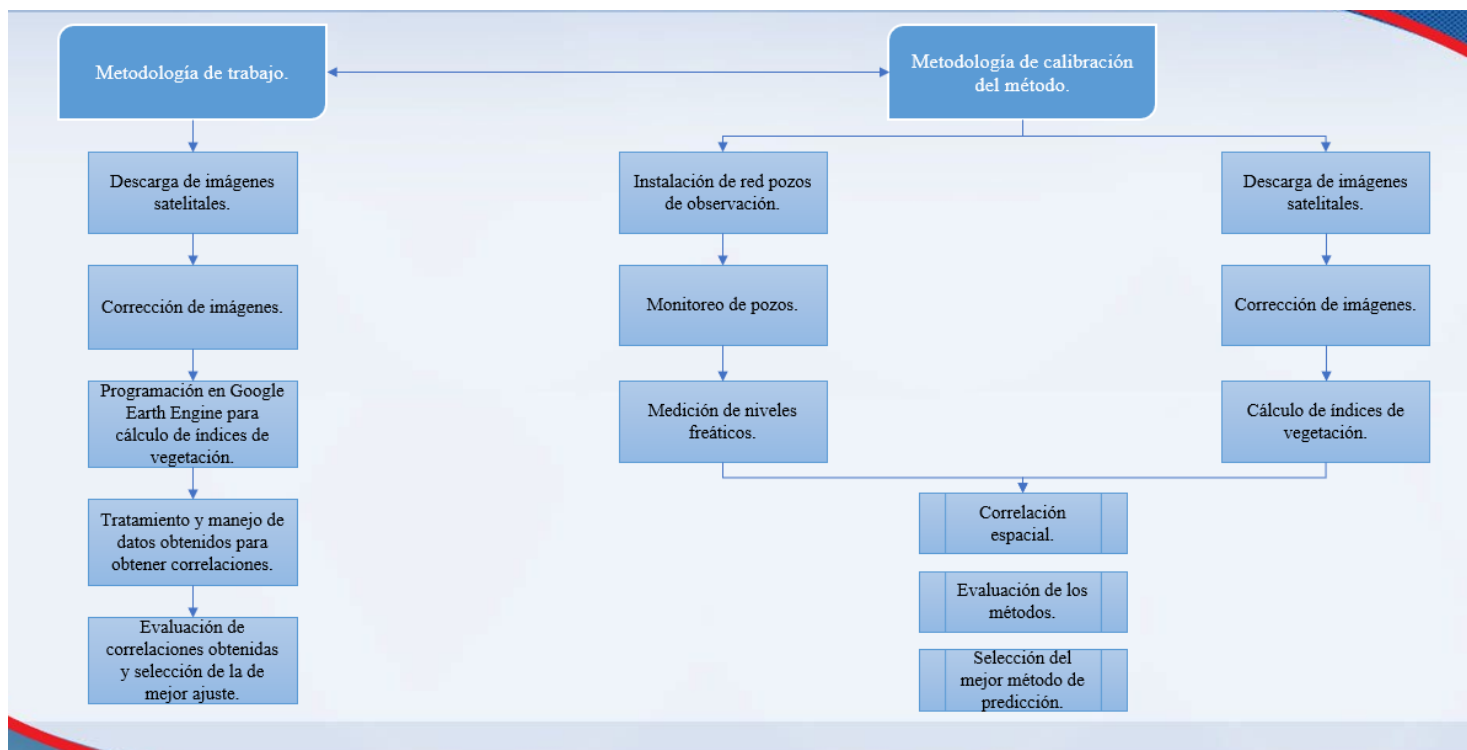


Figura 15. Flujograma de trabajo.

3.2 Selección del área de estudio

Se dio lugar a una reunión inicial con el Ingeniero Fabricio Camacho, Jefe del Departamento de Ingeniería Agrícola y tutor de la empresa para este proyecto, donde se indicó que el lugar donde se presentan problemas de drenaje es Finca Sur y en el cual se deseaba evaluar la influencia de las mareas en los niveles freáticos y su relación con los índices de vegetación correspondientes. Esta finca tiene un área total aproximada de 500 hectáreas, subdivididas en lotes que van desde las 1.24 hasta 19,75 hectáreas. Además, esta finca se compone por otras sub-fincas o secciones llamadas Las Salimas, La Montaña, Abandonos, Viento Fresco, Papaturrada, El Coyol y Tortugal.

Mediante la observación realizada en el software Quantum Gis (Qgis) de las capas en formato Shape facilitadas por la empresa, se realizó una cuadrícula dentro de la misma con la finalidad de ubicar los lotes donde se instalarían los pozos de observación que fueron georreferenciados aproximadamente cada 10 hectáreas, los cuales se presentan en el Cuadro 3. Cabe mencionar que se realizó esta distribución para tratar de abarcar un área hidráulica significativa de la finca y poder también tratar estos datos de forma individual tomando como una unidad cada lote.

Cuadro 3. Información de lotes de estudio.

Lote de estudio	Código	Área Neta [ha]	Nombre de Lote	Nombre Sección	Textura
1	300	6.46	A-1	El Coyol	Franco limoso
2	302	6.34	A-3	El Coyol	Franco
3	308	5.65	A-9	El Coyol	Franco areno arcilloso
4	329	9.25	A-13	El Coyol	Franco limoso
5	311	11.68	B-1	Papaturrada	Franco limoso
6	317	7.92	B-7	Papaturrada	Franco areno arcilloso
7	319	6.49	B-9	Papaturrada	Franco areno arcilloso
8	331	9.92	C-1	Tortugal	Franco areno arcilloso
9	337	8.25	C-7	Tortugal	Arcilloso
10	341	5.92	C-11	Tortugal	Arcilloso
11	356	8.98	D-6	Viento Fresco	Franco limoso
12	365	7.6	E-5	La Montaña	Franco limoso
13	368	12.29	E-8	La Montaña	Franco limoso
14	371	8.23	E-11	La Montaña	Franco areno arcilloso
15	446	10.3	I-6	Abandonos	Franco limoso
16	793	6.78	N-3	Las Salimas	Franco limoso
17	797	7.53	N-7	Las Salimas	Franco areno arcilloso
18	769	6.41	N-6	Las Salimas	Franco areno arcilloso

Además, cabe mencionar que, para la escogencia de estos lotes se tomó en cuenta el acceso a los mismos (presencia de caminos, drenes y el estado de desarrollo del cultivo), por lo que previamente se realizó una visita de campo junto con la Ingeniera Alexa García, supervisora de riego y drenaje, a los lotes de Finca Sur haciendo una inspección visual de estos, eligiendo finalmente los que se muestran en la Figura 16.

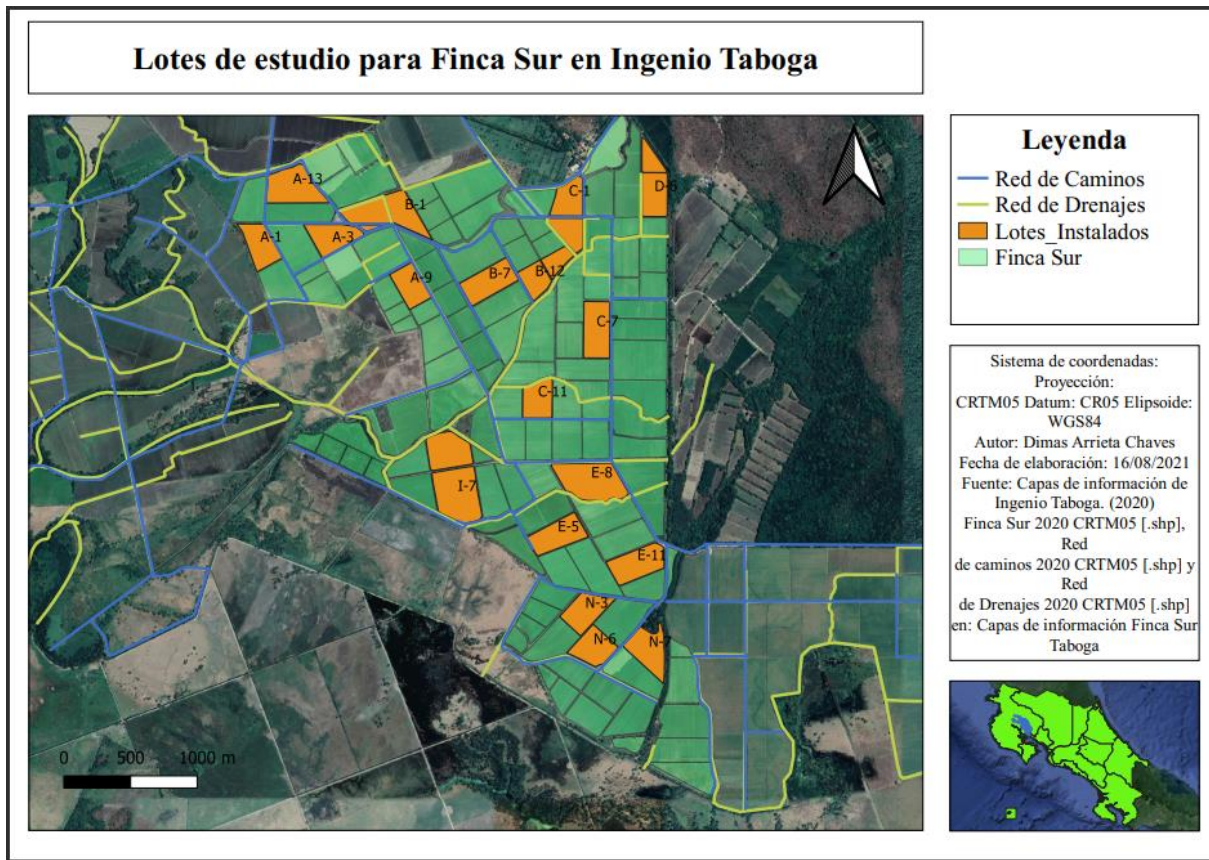


Figura 16. Mapa de lotes de estudio propuestos para Finca Sur.

3.3 Instalación de pozos de observación

Una vez definidos los lotes donde se instalarían los pozos de observación, se procedió a realizar su instalación. Los pozos mencionados anteriormente ya tenían medidas estándares definidas por la empresa, los cuales eran construidos en tubería de PVC con una longitud de 2 metros y usando un diámetro interno de tubería de 1 1/2". Esta instalación se iniciaba aproximadamente a las 8 a.m. y se extendía hasta las 4 p.m, instalando de 3 a 4 pozos por día de trabajo.

Para realizar la instalación se contaba con dos 2 barrenos, usando uno pequeño de 1 metro de longitud para “abrir camino” en el suelo, y otro de 2 metros de longitud para terminar de ensanchar el hueco y llegar a la profundidad deseada (1.70 metros aproximadamente). Además, se utilizó una tabla con la finalidad de golpear el barreno en la superficie de esta para despegar el suelo que quedaba en ellos. También, se usaban botellas

de agua para mejorar el proceso de barrenado en lotes donde en el perfil de suelo se encontraba arcilla. Además, para el proceso de instalación, siempre se utilizaba equipo de seguridad como mangas contra el sol, gorra, lentes, botas, guantes y machete, como se puede observar en la Figura 17.



Figura 17. Parte del equipo utilizado en la elaboración de los pozos (Barrenos de 1m y 2m, Pozo de observación, machete.)

En cada uno de los lotes seleccionados para el estudio, se hacía inicialmente un recorrido en su parte más larga, visualizando y tratando de escoger un surco con un acceso aceptable hacia el mismo. Posteriormente, se hacía una chapea manual cortando las hojas secas de la caña que se encontraban en el surco, esto se hacía hasta caminar aproximadamente de 30 a 50 metros, longitud a la cual se instalarían los pozos a partir del inicio de los surcos. Luego, se introducían las herramientas hasta el lugar donde se decidía instalar cada pozo y

se iniciaba la labor de excavación con los barrenos. Se pretendía enterrar aproximadamente 1.70 metros del pozo de observación, sin embargo, dependiendo de los perfiles de suelo que se encontraban en cada lote, se lograba introducir solo 1.50-1.60 metros, debido a la presencia de arena, la cual dificultaba su extracción del pozo. Se muestran ejemplos de pozos instalados en las Figuras 18 y 19.



Figura 18. Pozo instalado en Lote B-12.



Figura 19. Pozo instalado en Lote C-7.

Por último, se hacía una georreferenciación de cada uno de los pozos utilizando un GPS marca PX 2.0 como se muestra en la Figura 20, con una precisión de 1" en los ejes vertical y horizontal, con la finalidad de poder mostrar con exactitud la ubicación de estos sobre las capas de los lotes suministradas inicialmente por la empresa y facilitar la toma de datos que se realizaría posteriormente.



Figura 20. GPS utilizado para la georreferenciación de los pozos de observación instalados.

La posición exacta de todos los pozos instalados en Finca Sur puede observarse en la Figura 21.

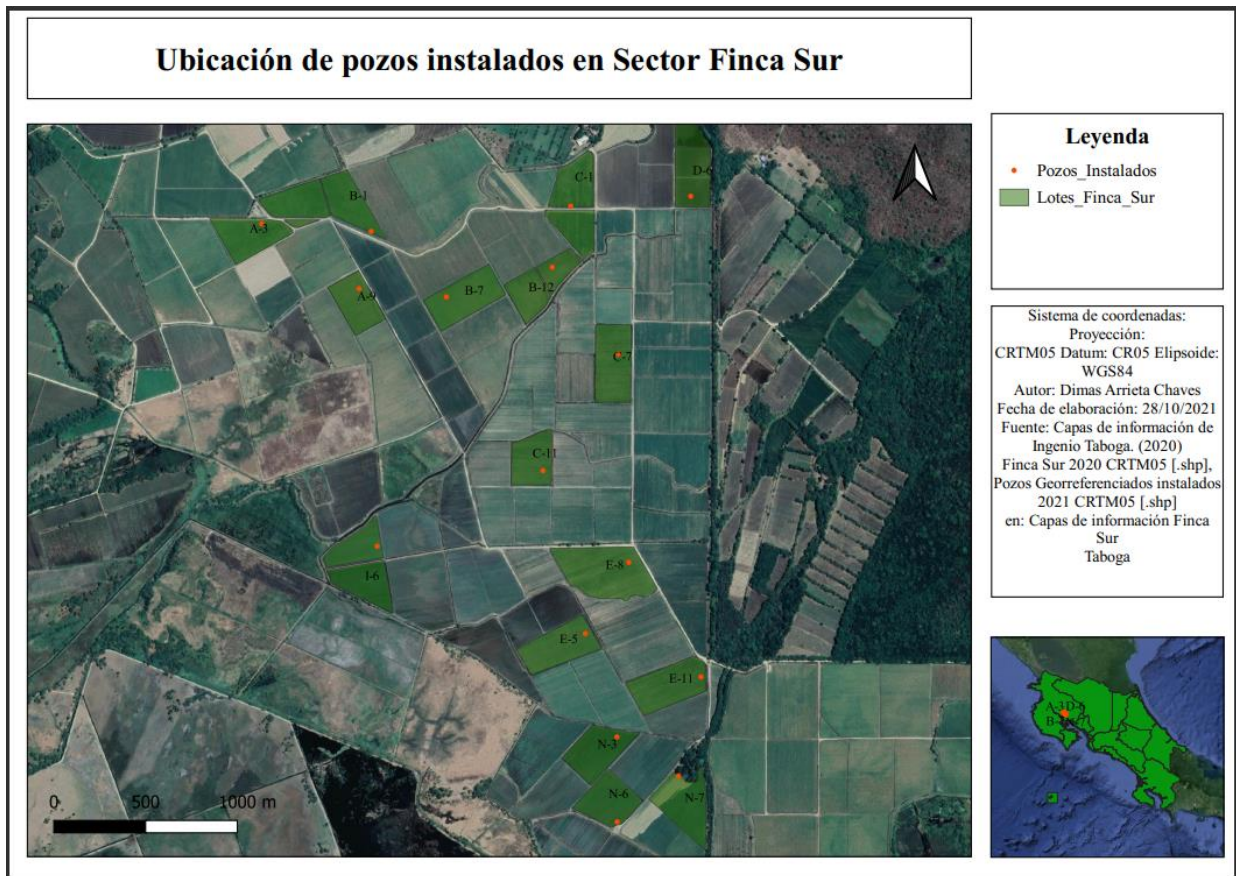


Figura 21. Ubicación de pozos de observación instalados en Finca Sur.

3.4 Mediciones en pozos de observación

Como se ha mencionado anteriormente, la finalidad de este trabajo era analizar la influencia de las mareas de los Ríos Cañas e Higuierón sobre el nivel freático de la zona de estudio. Tomando esto como base, se realizaron mediciones 2 veces por día (una en la mañana y otra en la tarde) tratando de coincidir con el comportamiento de las mareas, tomando datos de 2 a 3 días en los pozos de Finca Sur, dependiendo de la disponibilidad del transporte para dichos días.

Para conocer los horarios en los que se presentaban los fenómenos de marea, se utilizaron datos de la aplicación *Nautide* (Figura 22), la cual muestra datos diarios y en tiempo real del comportamiento (horarios de inicio y fin de bajamar y pleamar) de las mareas en el país por medio de estaciones, en este caso se utilizó la estación ubicada en Guanacaste.



Figura 22. Comportamiento de mareas para el 12 de octubre en aplicación Nautide.

Las mediciones concretamente se realizaban con un “cloc-cloc” amarrado a una cuerda (ver Figura 23). Esta herramienta está diseñada con una cavidad en su parte inferior que emite un sonido cuando choca con la superficie agua (ver Figura 24), una vez que se escuchaba dicho sonido se sacaba la cuerda y se medía con una cinta métrica para saber a qué profundidad llegaba. Como bien se sabe, cada pozo quedaba enterrado a alturas no precisamente iguales, por lo tanto, era importante conocer de cada uno a cuánto estaba enterrado y cuánto quedaba por encima de la superficie, y junto con las mediciones realizadas por el cloc-cloc, sacar por diferencias a qué profundidad estaba el nivel freático de cada pozo de observación en cada día de toma de datos.



Figura 23. Cloc-Cloc elaborado por la empresa.



Figura 24. Cavidad interna del Cloc-Cloc.

3.5 Cálculo del Índices de Vegetación

Para realizar el cálculo de los índices de vegetación de interés, se utilizó la plataforma de Google Earth Engine, en la cual, se realizó un código adaptado a los objetivos del proyecto tomando como base un *script* o código facilitado por el Ingeniero Fernando Watson (Watson et al., 2022) perteneciente a un trabajo de investigación realizado para la Escuela de Ingeniería Agrícola en conjunto con otros profesionales. En el código realizado se trabajó en conjunto con descargas de imágenes del Satélite Sentinel (resolución de 10mx10m y pasadas cada 5 días) para periodos de fecha de 15 días comprendidos dentro del periodo de medición o toma de datos en los pozos de observación (ver Cuadro 4). Además, mediante este código se programaron las funciones que realizaban los enmascarados de nubosidad, obteniendo finalmente imágenes procesadas limpias.

Cuadro 4. Rangos de fechas asignados para periodos quincenales en el periodo de toma de datos.

Rango	Fechas comprendidas
1	09-03 a 09-17
2	09-20 a 10-01
3	10-02 a 10-16
4	10-18 a 10-31

Además, para que el cálculo de los índices calzase sobre las áreas específicas de estudio, se realizó un *Buffer* en Qgis de 55 metros sobre la ubicación de los pozos de observación instalados con la finalidad de tener índices representativos de los lotes. Este *Buffer* fue importado a la programación de Google Earth Engine para que el cálculo de los índices se realizara solo en las áreas de interés, con el plus de que permitía descargarlas en un Drive en línea para su posterior descarga, visualización y manejo en Qgis.

Este código de programación realizaba el cálculo de los índices sobre cada uno de los pozos y el área de influencia asignada, permitiendo observar el comportamiento a lo largo del periodo de estudio mediante gráficas y posterior descarga de los datos en una tabla de Excel. Las funciones para el cálculo de los índices se realizaron introduciendo las fórmulas de la revisión bibliográfica correspondiente a cada índice en la programación mencionada anteriormente en Google Earth Engine, teniendo claro cuál era cada banda del Sentinel presente en cada una.

3.6 Tratamiento estadístico de datos obtenidos

Se debe tomar en cuenta que se tenían datos de mediciones de nivel freático diarios en un periodo de casi dos meses completos, tomándolos en la mañana y en la tarde de cada día (tratando de observar variaciones en función de los fenómenos de marea) y asociándolos con la lluvia del día anterior, por lo que el tamaño de la memoria de cálculo para el tratamiento de los mismos era considerable. Para manejo más ágil y representativo, se decidió trabajar con promedios de las todas las mediciones de nivel freático realizadas para cada pozo.

Para poder justificar lo anterior, se hicieron cálculos de coeficientes de variación comparando primeramente si había variación significativa entre los datos de nivel freático de la mañana con respecto a los de la tarde, y segundo, para determinar si había una variación de estos con respecto al promedio obtenido de cada día. Al determinar que los coeficientes de variación no eran considerables (menores al 10%), se tomaron los promedios de nivel freático de cada día y se calculó el promedio general del nivel freático para uno de los pozos, tomando este dato como inicial para el análisis que se realizaría.

Para validar que esta variación no fuese considerable, se desarrolló una prueba t de Student con los promedios de cada pozo para los datos obtenidos en la mañana y en la tarde. Para dicha prueba se utilizaron las ecuaciones 8, 9 y 10 descritas en la revisión literaria y asumiendo un riesgo del 10% en la variación de los promedios de la mañana con respecto a la tarde.

3.7 Elaboración de mapas de isóbatas e isohypsas.

Una vez que se tenían los datos diarios obtenidos mediante la medición en los pozos de observación se generó una memoria de cálculo. Para elaborar estos mapas se optó por hacerlos en periodos de fechas que presentaran un comportamiento similar de niveles freáticos correspondientes a la mañana y a la tarde (definidos en el Cuadro 4), con la finalidad de que fuesen uniformes y representativos, y también para poder comparar los comportamientos que estos presentaran. Como bien se sabe, para las isóbatas es necesario contar con los datos de profundidades de niveles freáticos de los pozos y para las isohypsas la elevación de los pozos con respecto al nivel del mar; esto se tenía previamente gracias a la georreferenciación realizada para cada uno de los pozos.

Es importante mencionar que se tomaron los datos de los pozos instalados por la empresa en lotes y ubicaciones cercanas a los pozos propios del proyecto, tanto de su elevación sobre el nivel del mar como de los datos de profundidades de niveles freáticos de cada uno recolectado, por lo que se solicitó al departamento de riego y drenaje dichos datos, con la finalidad de utilizarlos para interpolarlos con los datos propios y generar mapas más representativos del área de estudio.

Propiamente para la elaboración de los mapas, se utilizó Qgis y su herramienta de interpolación en SAGA y el programa CivilCAD. Además, para representar mejor los valores obtenidos, se hicieron categorizaciones de los mismos en intervalos a conveniencia que permitieran demostrar gráficamente el comportamiento de las isóbatas e isohypsas en el área de estudio.

3.8 Análisis de correlaciones entre datos

Se plantearon inicialmente dos hipótesis tratando de probar correlaciones o influencia entre diferentes tipos de datos; Precipitaciones con Nivel freático y Nivel freático con los diferentes Índices de Vegetación planteados inicialmente. Para tratar de encontrar o probar cada correlación, se utilizó el software Excel y sus herramientas de tablas dinámicas para un mejor manejo de los datos y la de elaboración de gráficos y líneas de tendencia, generando para las segundas una ecuación de cada línea y su correspondiente R^2 . Además, se realizaron distintos manejos de datos (mediciones puntuales de niveles freáticos para cada día, promedios y rangos, los cuales se explicarán más adelante) tratando de encontrar el mejor ajuste para cumplir con los objetivos del proyecto.

3.8.1 Correlación Precipitaciones Vs. Nivel freático

Para realizar este análisis, primeramente, se agruparon los pozos con su respectivo pluviómetro de influencia, esto para tener referencia de la cantidad de agua en mm que caía en cada lote donde se encontraban instalados los pozos de observación. Una vez se contaba con lo anterior, se hicieron gráficos de barras en Excel de la profundidad del nivel freático (tomando como nivel de referencia 0 y aumentando la profundidad hacia abajo) de cada pozo en las fechas de medición correspondiente, y por otro lado en el mismo gráfico, se realizó una línea que unía las precipitaciones en los lotes del día anterior a la medición. Con lo

realizado anteriormente, se pretendía observar de una manera gráfica el aumento o disminución del nivel freático con respecto a la cantidad de lluvia que captó el pluviómetro. Lo anterior se observa más a detalle en las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29.

3.8.2 Correlación Nivel freático Vs Índices de Vegetación

Con la finalidad de tratar de encontrar algún tipo de correlación que describiera el comportamiento de los datos obtenidos se hicieron distintos manejos de datos de los Niveles freáticos y de los índices de vegetación obtenidos mediante las imágenes satelitales, esto a su vez para encontrar los R^2 correspondientes y poder definir la validez de dichas correlaciones. A continuación, se describen dos casos de análisis; uno donde las correlaciones encontradas no eran muy buenas y otro donde eran bastante aceptables, ambas buscando correlación de Nivel freático Vs Índices de vegetación:

3.8.3 Análisis 1: Promedios de mediciones de Nivel freático vs Índices puntuales de Vegetación

Como se ha mencionado anteriormente, se contaban con imágenes satelitales de cada 5 días, por lo que para este primer análisis y tomando lo anterior como base, se hizo un promedio tomando los datos de las mediciones de los niveles freáticos que se tenían antes y hasta la fecha de corte (fecha de toma de imagen del satélite). Posterior a esto, se hizo una gráfica en Excel, donde en el Eje X (variable dependiente) se encontraban los valores del índice a analizar y en el Eje Y (variable independiente) el promedio de nivel freático mencionado anteriormente, esto se hizo para cada fecha de corte y para cada uno de los índices que se querían analizar en cada pozo instalado, como se puede observar en la Figura 330 en la sección de resultados como ejemplo demostrativo para el índice NDVI y en los anexos de las Figuras 43 a la 47 para los demás índices estudiados. Para cada línea de tendencia se obtuvo la correspondiente ecuación y su R^2 .

3.8.4 Análisis 2: Rangos de datos de Nivel Freático vs Promedios de Índices de Vegetación

En el primer análisis que se realizó, no se obtuvieron valores de R^2 aceptables, por lo que se hizo necesario realizar un segundo análisis con un manejo de datos diferente; en

agricultura muchas veces se trabaja y se diseña con valores representativos de las áreas de estudio (rangos de datos, promedios y valores críticos) con la finalidad de deslumbrar mejor el comportamiento de estas. Por lo que para este segundo análisis se trabajó con rangos de datos; se tomó el valor máximo medido de nivel freático y se dividió en 6 rangos a convenir, dejando los primeros más finos y engrosando los que correspondían a mayores profundidades. Luego, se tomó una media de cada rango de nivel freático y se utilizó como valor final para construir la tabla de datos que posteriormente se utilizaría para las gráficas de líneas de tendencia, tal como se hizo en el primer análisis. Mediante el uso de tablas dinámicas, se obtuvieron también los promedios de los índices encontrados en dichos rangos de nivel freático, permitiendo construir finalmente una línea de tendencia con valores de “Media de valores del índice para el rango de nivel freático” en el Eje X y valores de “Media del rango del nivel freático” en el Eje Y. Lo anterior se muestra y se explica a detalle a partir de la Figura 31 hasta la Figura 36 en el capítulo de resultados.

3.8.5 Selección del índice con mejor correlación

Esta selección se realizó mediante un análisis de las gráficas construidas para cada uno de los índices, donde se observaba el comportamiento general de las líneas de tendencia y los valores de R^2 obtenidos para cada una de las fechas de corte.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Etiquetado para el manejo de datos

Con la finalidad de tener un manejo más ágil de los datos, se le asignó una identificación o ID a los lotes, la misma se hizo tomando en cuenta el orden en el que se medían los días correspondientes. Esta identificación se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. ID Asignado a cada pozo para su manejo.

Identificación de pozos	
Finca Sur	
Nombre de Lote	ID Asignado
A-3	1
A-9	2
B-1	3
B-7	4
B-12	5
C-1	6
D-6	7
C-7	8
C-11	9
I-6	10
E-5	11
E-8	12
E-11	13
N-3	14
N-7	15
N-6	16

4.2 Efecto de las mareas sobre niveles freáticos

Antes de dar paso a verificar la correlación o no entre niveles freáticos e índices de vegetación, se debía discutir primero entre si existía relación o incidencia del efecto de las mareas sobre los niveles freáticos muestreados en los pozos de observación. Las mediciones, como se mencionó anteriormente, se realizaron a lo largo de dos meses tomando una medida en la mañana y otra en horas de la tarde, tratando de coincidir con los horarios de marea alta y baja. Ahora, en los pozos de Finca Sur se encontraron variaciones similares de la profundidad de los niveles freáticos que iban desde los 4 centímetros hasta máximo 12 centímetros en algunos días específicos, por lo que para representar las variaciones se plantea el Cuadro 6. Además, en las Figuras 49 y 50 en la sección de Anexos se presentan las variaciones más a detalle por día de medición. Es importante recordar que se trabajaron con los promedios de nivel freático de cada pozo para todo el periodo de mediciones en estos.

Cuadro 6. Variaciones promedio de mediciones de Nivel Freático para Finca sur.

Profundidades promedio de mediciones de Nivel Freático para Finca Sur y su variación.					
ID Lote	Promedio de Nivel Freático Mañana [m]	Promedio de Nivel Freático Tarde [m]	Promedio NF [m]	Promedio de Variación (%) NF Mañana	Promedio de Variación (%) NF Tarde
1	0.73	0.77	0.75	-2.33%	2.33%
2	0.57	0.61	0.59	-3.37%	3.37%
3	1.35	1.38	1.37	-1.05%	1.05%
4	0.24	0.26	0.25	-3.82%	3.82%
5	1.08	1.12	1.10	-2.02%	2.02%
6	0.56	0.59	0.57	-2.87%	2.87%
7	0.73	0.78	0.76	-2.90%	2.90%
8	0.94	0.98	0.96	-1.69%	1.69%
9	1.03	1.07	1.05	-1.93%	1.93%
10	0.28	0.30	0.29	-3.90%	3.90%
11	0.35	0.39	0.37	-4.71%	4.71%
12	1.28	1.31	1.30	-1.27%	1.27%
13	0.81	0.84	0.82	-1.77%	1.77%
14	0.13	0.15	0.14	-10.11%	10.11%
15	0.54	0.57	0.56	-2.88%	2.88%
16	0.16	0.18	0.17	-7.16%	7.16%

En el Cuadro 6 se puede observar el promedio del nivel freático de cada pozo para todo el periodo de estudio tanto para la mañana como para la tarde y la variación de las mediciones con respecto al promedio. Se puede observar que las variaciones son muy bajas al comparar las de la mañana con las de la tarde y apenas superan el 10% en solo un pozo de observación. Por lo tanto, se están manejando variaciones muy bajas de mediciones de la mañana con respecto a la tarde y viceversa, por lo que podría concluirse que el efecto de las mareas no afecta mayormente las profundidades de los niveles freáticos, por lo que sería indiferente realizar las mediciones en la mañana o en la tarde.

Se debe tomar en cuenta que lo anterior se asegura porque las variaciones no eran considerables independientemente del nivel freático que se encontrara en el día, es decir, podría encontrarse arriba o debajo de la media que la variación entre mediciones se mantenía muy similar.

Es importante recordar que se trabajó con el promedio del nivel freático de cada pozo debido a que las tendencias no eran muy variables, por lo tanto, con este método se obtiene una medida representativa.

4.2.1 Prueba t de Student como validación

Para poder trabajar con los promedios de mediciones de nivel freático y verificar que no había mayor variación de estos en la mañana con respecto a la tarde, se desarrolló una prueba t de Student para validar lo anterior, tomando $n=16$, $GL=30$. Se asumió un 10% de error de variación en los datos (α). Los resultados de la prueba se presentan en el Cuadro 7 a continuación:

Cuadro 7. Resultados obtenidos en prueba t de Student con promedios de Nivel Freático para mañana y tarde.

Prueba t de Student para promedios de Nivel Freático asumiendo un 10% de error en los datos									
Pozo	Promedio mañana [m]	Promedio tarde [m]	Diferencia promedios [m]	D. Estándard mañana	D. Estándard tarde	S2p	To	T Tablas	Condición
1	0.730	0.765	0.035	0.291	0.281	0.2859	0.0430	1.3104	Aceptable
2	0.568	0.607	0.040	0.204	0.188	0.1962	0.0714	1.3104	Aceptable
3	1.352	1.381	0.029	0.283	0.248	0.2661	0.0380	1.3104	Aceptable
4	0.238	0.257	0.019	0.176	0.184	0.1797	0.0371	1.3104	Aceptable
5	1.075	1.120	0.044	0.357	0.328	0.3427	0.0458	1.3104	Aceptable
6	0.556	0.589	0.033	0.327	0.320	0.3233	0.0360	1.3104	Aceptable
7	0.735	0.779	0.044	0.137	0.112	0.1254	0.1237	1.3104	Aceptable
8	0.943	0.975	0.032	0.333	0.317	0.3250	0.0352	1.3104	Aceptable
9	1.028	1.068	0.040	0.386	0.372	0.3791	0.0377	1.3104	Aceptable
10	0.279	0.301	0.023	0.241	0.244	0.2424	0.0330	1.3104	Aceptable
11	0.353	0.388	0.035	0.250	0.245	0.2475	0.0499	1.3104	Aceptable
12	1.280	1.313	0.033	0.184	0.173	0.1784	0.0654	1.3104	Aceptable
13	0.810	0.839	0.029	0.027	0.066	0.0505	0.2047	1.3104	Aceptable
14	0.126	0.155	0.028	0.064	0.063	0.0637	0.1576	1.3104	Aceptable
15	0.539	0.571	0.032	0.281	0.268	0.2747	0.0412	1.3104	Aceptable
16	0.158	0.183	0.024	0.120	0.136	0.1282	0.0673	1.3104	Aceptable

4.3 Efecto de las lluvias sobre niveles freáticos

Como se mencionó en el apartado anterior, las mareas no generan un efecto significativo sobre los niveles freáticos, por lo que se hacía necesario plantear una conjetura sobre qué otro fenómeno podría estar afectando o determinando la profundidad de estos. Otra de las hipótesis que se hacía necesario analizar correspondía a la influencia de las precipitaciones sobre los niveles freáticos de los pozos de observación.

Para realizar este análisis, fue necesario ver qué pluviómetro específico tenía influencia sobre cada uno de los pozos y poder asignar precipitaciones mediante registros

facilitados por la empresa. Dicha asignación de pluviómetros se hizo con los códigos que maneja la empresa y se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 8. Pluviómetros de influencia para Lote y Pozo.

ID Pluviómetro	Nombre estación	Pozos que influencia
12	El Coyol	A-3, A-9, B-1, B-7
13	Viento Fresco	C-1, D-6, B-12
14	Tortugal	C-7, C-11, E-8
15	La Montaña	E-11, N-3, N-6, N-7
18	Abandonos	E-5, I-6

Una vez que se tenía identificado el pluviómetro de influencia correspondiente a cada pozo, se podían asignar las precipitaciones del día anterior a la toma de datos para ver realmente el efecto que tenían estas sobre el nivel freático encontrado. Tomando esto como base, se construyeron gráficos como los presentados en las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29, donde se presentas las variaciones diarias de nivel freático de los pozos en los lotes versus la precipitación reportada del pluviómetro de influencia correspondiente.

Como se podrá observar en las figuras mencionadas anteriormente, no se reconoce una tendencia clara, es decir, los datos de precipitación no van acorde a las profundidades de niveles freáticos de cada pozo en cada fecha de medición registrada. Cuando se realizaron estos gráficos se esperaba que cuanto mayor fuera la precipitación más arriba o cerca del nivel de referencia (nivel del suelo) estuvieran los niveles freáticos, y también viceversa; cuando las precipitaciones fueran muy bajas o nulas el nivel freático debería estar bastante profundo, es decir; un pozo casi seco. Sin embargo, como se mencionó anteriormente el comportamiento o la tendencia no es clara, ya que no para todos los pozos se cumple con lo esperado o hay algunos inclusive que rompen completamente con la tendencia, por lo que se llega a la conclusión que no hay una correlación directa entre estas variables. A continuación, se comentará más a detalle cada gráfico y posibles causas o condiciones de los lotes donde están los pozos que rompen con la tendencia esperada.

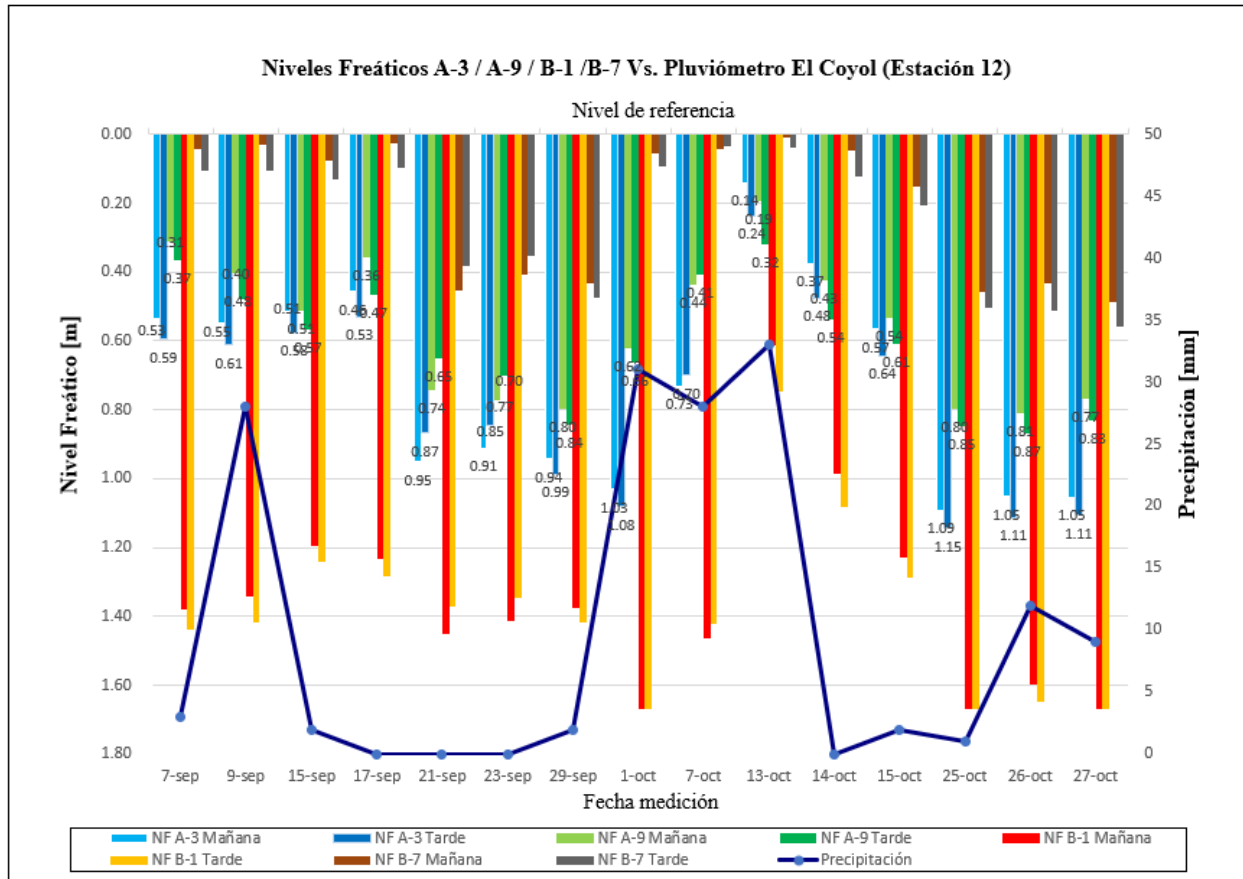


Figura 25. Comportamiento de niveles freáticos de lotes A-3, A-9, B-1 y B-7 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia El Coyol (Estación 12).

En la figura anterior se puede observar claramente que el pozo instalado en el lote B-1 rompe por completo con la tendencia que se esperaba encontrar, mientras que los otros lotes si muestran cierta tendencia de la profundidad del nivel freático a disminuir al aumentar las precipitaciones registradas del día anterior a la fecha de medición. El lote B-1 tuvo la particularidad de tener siempre profundidades de nivel freático bastante altas en todo el periodo de mediciones, independientemente de la cantidad de lluvia registrada, esto pudo haber sucedido porque este lote se encontraba bastante alto con respecto a los drenes que poseía; había una diferencia de al menos medio metro, lo que pudo haber contribuido a un drenaje mucho más rápido.

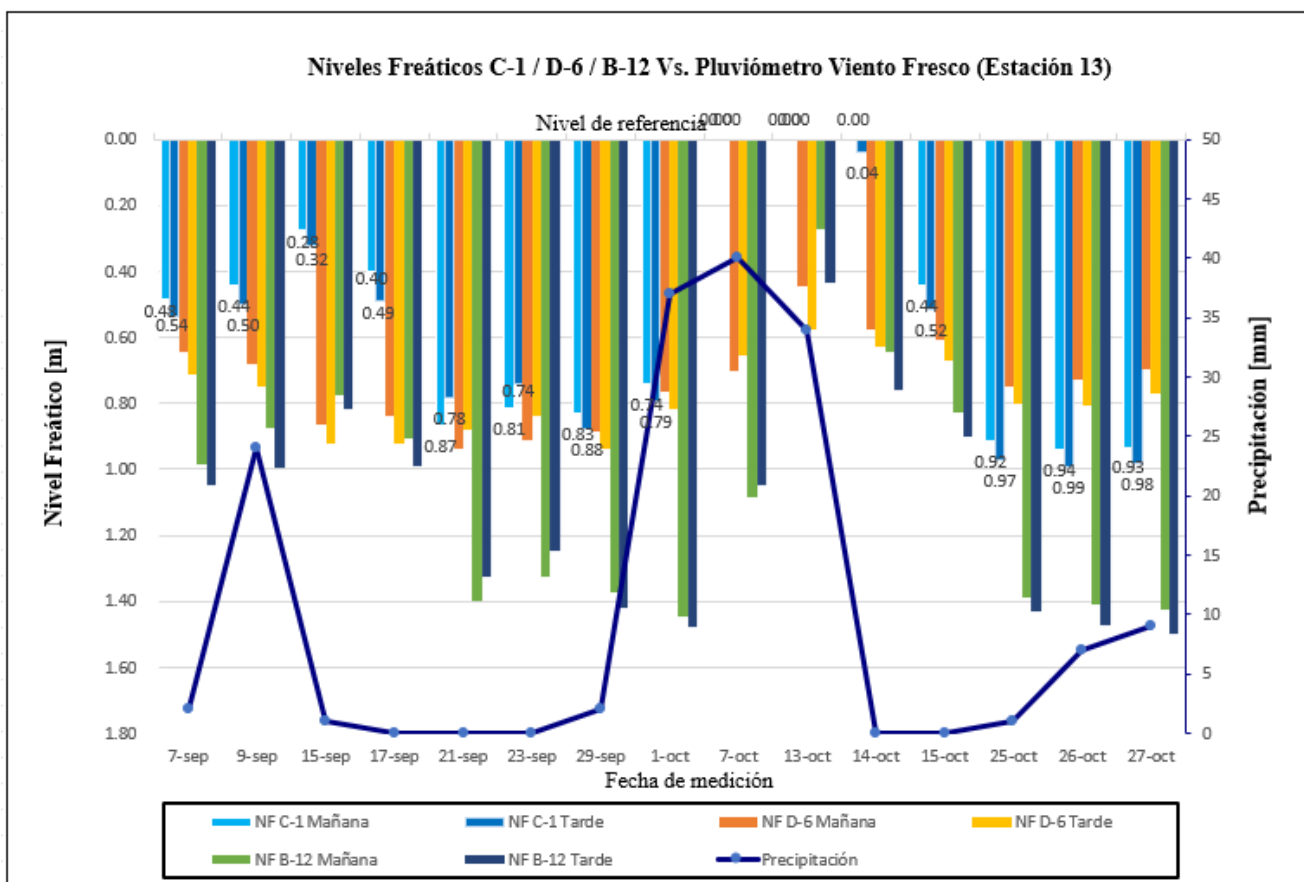


Figura 26. Comportamiento de niveles freáticos de lotes C-1, D-6 y B-12 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia Viento Fresco (Estación 13).

Como se puede observar en la Figura 26, nuevamente se presenta el fenómeno de no tener una tendencia clara a lo largo de la toma de mediciones; en este caso el pozo instalado en el lote B-12 se sale por completo del comportamiento esperado en las fechas de precipitación máxima ya que mantiene profundidades de nivel freático altas. Se observa por otro lado que dicha profundidad disminuye, pero hasta casi una semana después de presentadas las lluvias, por lo que podría tratarse de un tema de conductividad hidráulica del suelo, ya que los drenes que este lote tiene se encuentran al mismo nivel.

Por otro lado, se puede apreciar que los otros dos pozos si muestran tendencias de disminución de la profundidad del nivel freático conforme se presentan precipitaciones considerables y viceversa.

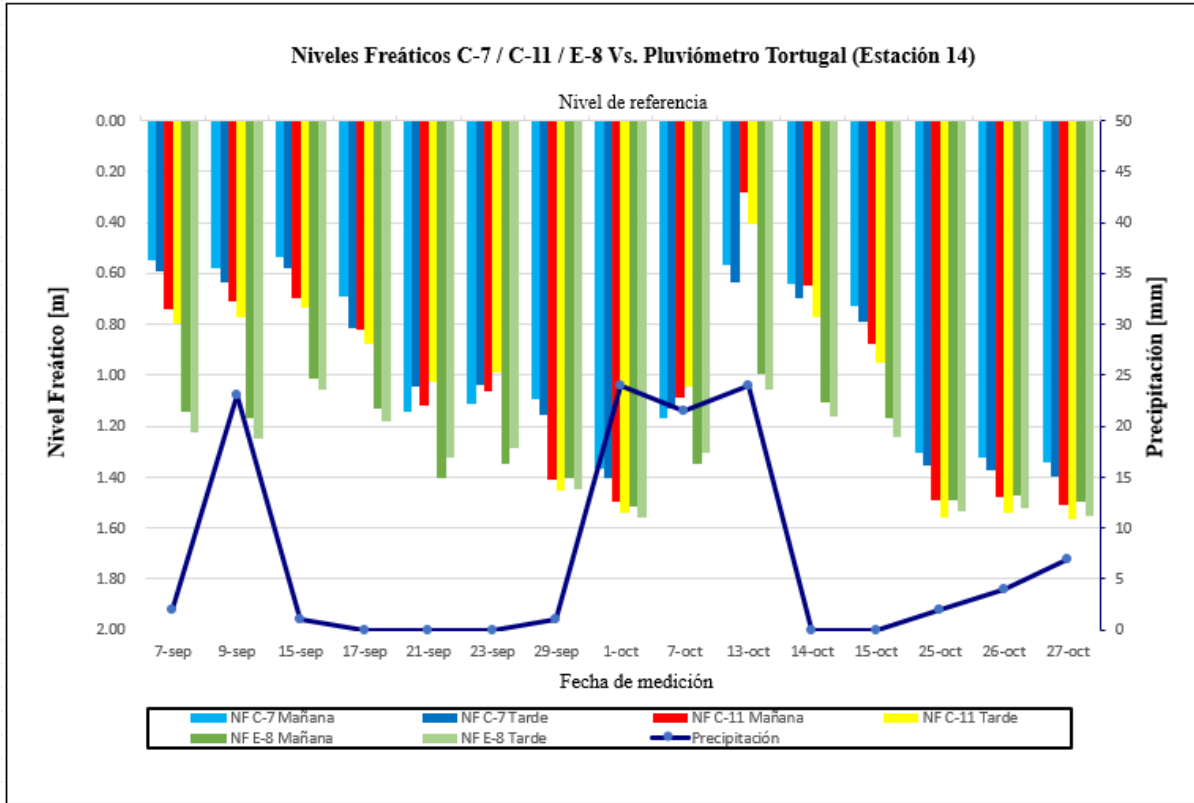


Figura 27. Comportamiento de niveles freáticos de lotes C-7, C-11 y E-8 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia Tortugal (Estación 14).

En la figura anterior se puede observar que se cumple con el comportamiento esperado en la mayoría de los días de medición. Por ejemplo, el lote E-8 representado con colores verdes, era un lote semillero (suelo desnudo y drenes limpios relativamente nuevos), donde se puede observar cómo varía la profundidad del nivel freático según las lluvias registradas. Para este lote se puede observar la poca variación de la profundidad del nivel freático cuando se presentaron los mayores registros de precipitación en comparación a cuando no llovía, esto se puede presentar por la condición que se mencionó anteriormente de ser semillero, lo cual pudo haber contribuido a presentar un drenaje rápido de las lluvias.

Por otro lado, los pozos C-7 y C-11 igual mantienen un comportamiento acorde al esperado en casi todas las fechas de medición, sin embargo, se puede observar que, para el 9 de septiembre, y las primeras 3 mediciones de octubre, las precipitaciones reportadas son casi iguales, sin embargo, las profundidades de niveles freáticos medidas en esas fechas presentan

una variación considerable, por lo que se mantiene lo afirmado anteriormente; no se presenta una tendencia clara para todos los pozos.

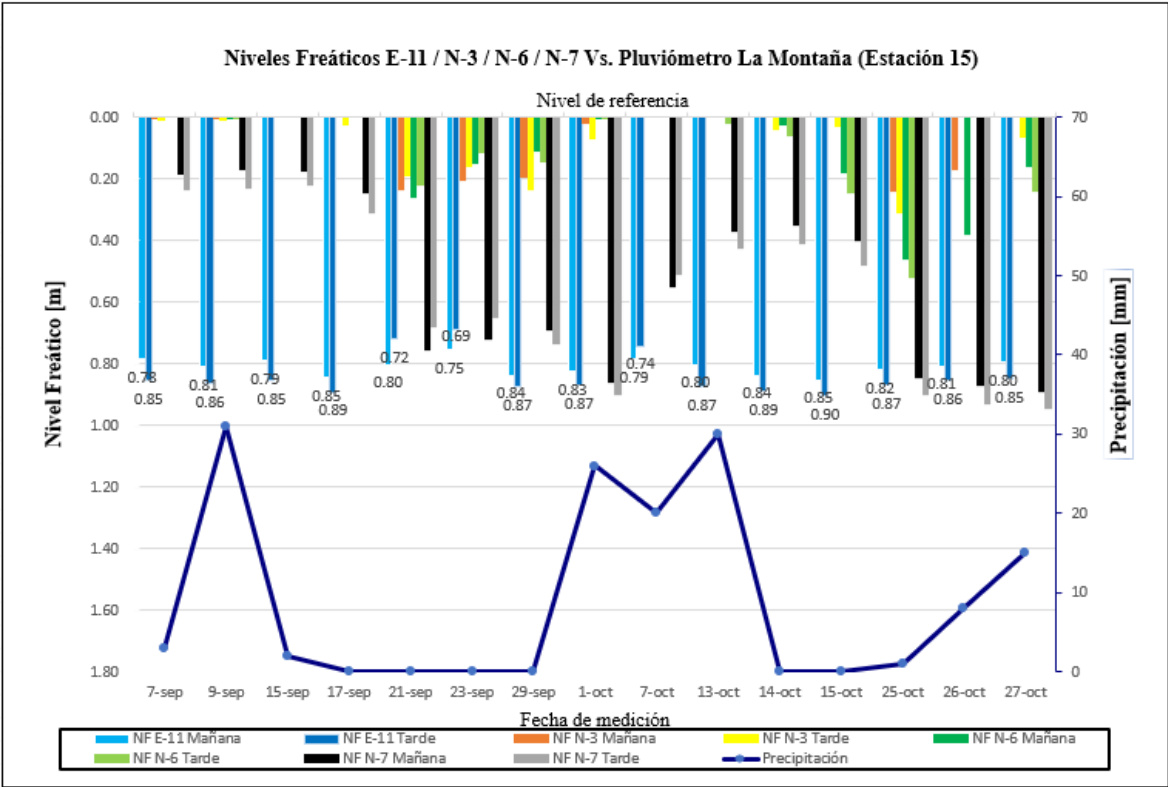


Figura 28. Comportamiento de niveles freáticos de lotes E-11, N-3, N-6 y N-7 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia La Montaña (Estación 15).

La Figura 28 muestra 3 lotes del sector conocido como Las Salimas o Volio; N-3, N-6 y N-7, los cuales presentan la particularidad de ser los más críticos de los seleccionados para realizar el estudio. Los lotes donde se encuentran instalados estos pozos están ubicados cerca del Canal de la Bajura y por ende gran parte de las mediciones se veía afectada por el agua que recibían de dicho canal. Estos lotes se encuentran muy abajo y los drenes que poseían no funcionaban de manera eficiente, ya que la mayoría del tiempo permanecían llenos de agua. En las Figuras 30, 31 y 32 de la sección de Anexos se puede observar la condición de estos drenes antes y también el después de estos luego de que realizar unos tapones en dicho canal para impedir el paso del agua. Estos 3 pozos son

complicados de analizar, ya que como se mencionó anteriormente, siempre había presencia de agua y por ende los niveles freáticos la mayoría del tiempo estaban en la superficie.

Por otra parte, el pozo ubicado en el lote E-11 mantuvo los niveles freáticos bastante similares durante todo el periodo de toma de datos, a pesar de tener las vías de acceso y drenajes llenos de agua la mayoría del tiempo, saliéndose totalmente del comportamiento esperado y contribuyendo a la premisa planteada de no tener una tendencia o correlación lo suficientemente clara como para poder decir que la lluvia si afecta directamente las profundidades de niveles freáticos de los pozos.

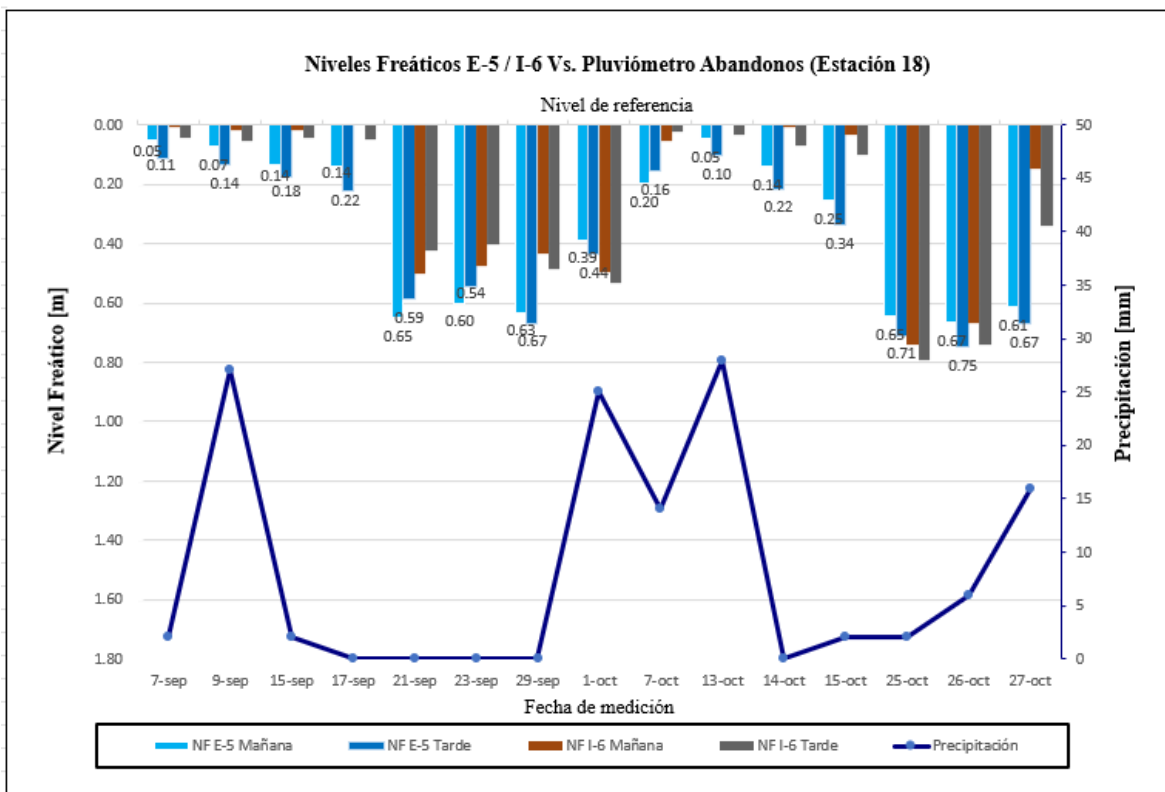


Figura 29. Comportamiento de niveles freáticos de lotes E-5 e I-6 vs precipitación reportada de pluviómetro de influencia Abandonos (Estación 18).

En la figura anterior se muestra el comportamiento del pozo instalado en el lote I-6 del sector Abandonos. En este lote siempre había presencia de agua dentro y en el camino de

acceso a este, por lo que los niveles freáticos se encontraban muy superficiales durante la mayoría de las mediciones. Dichos niveles bajaron levemente más a partir de una limpieza que realizaron de los canales cercanos a este, como se puede observar a partir del 15 de octubre. El tener esta condición ocasionaba que el pozo se llenara con muy poca precipitación y que el drenaje del agua presente se diera de forma muy lenta. Sin embargo, se puede apreciar que si cumplía de cierta manera con la tendencia esperada aumentando la profundidad del nivel freático cuando no se registraban precipitaciones y disminuyendo drásticamente hasta el punto de quedar en la superficie cuando llovía.

Por otra parte, el pozo instalado en el lote E-5 tenía condiciones similares al anterior, ya que la ruta de acceso hacia este se encontraba llena de agua la mayoría del tiempo al igual que el dren que lo rodeaba. De igual manera se puede observar que en la mayoría de las fechas de medición si cumplía con el comportamiento esperado hasta las últimas 3 fechas de medición (25, 26 y 27 de octubre) donde hubo presencia de precipitaciones en la zona y la profundidad de los niveles freáticos se mantuvo muy similar a los días donde no hubo, contribuyendo igualmente a la premisa de no tener una correlación o tendencia clara entre precipitaciones y profundidades de niveles freáticos, como también pudo observarse en todos los demás pozos analizados.

4.4 Correlaciones encontradas entre Niveles Freáticos e Índices de Vegetación

Como se mencionó anteriormente en el capítulo de metodología, se explicarán a detalle los resultados que se obtuvieron de manejos diferentes de los datos que se tenían; uno donde las correlaciones encontradas mediante R^2 no eran muy buenas y otro donde se obtuvieron resultados bastante aceptables.

4.4.1 Promedios puntuales de mediciones de niveles freáticos Vs Índices de Vegetación

En la Figura 30 se muestra un ejemplo de las gráficas obtenidas a partir del primer manejo de datos realizado, con las correspondientes líneas de tendencia potencial. Cada color corresponde a una fecha de corte en función de la toma de imágenes satelitales (se detalla en el Cuadro 9 y 10 con la ecuación y valores de R^2 para cada una de las fechas y líneas de tendencia). Las gráficas de los demás índices se encuentran de la Figura 41 a la 45 en el capítulo de anexos.

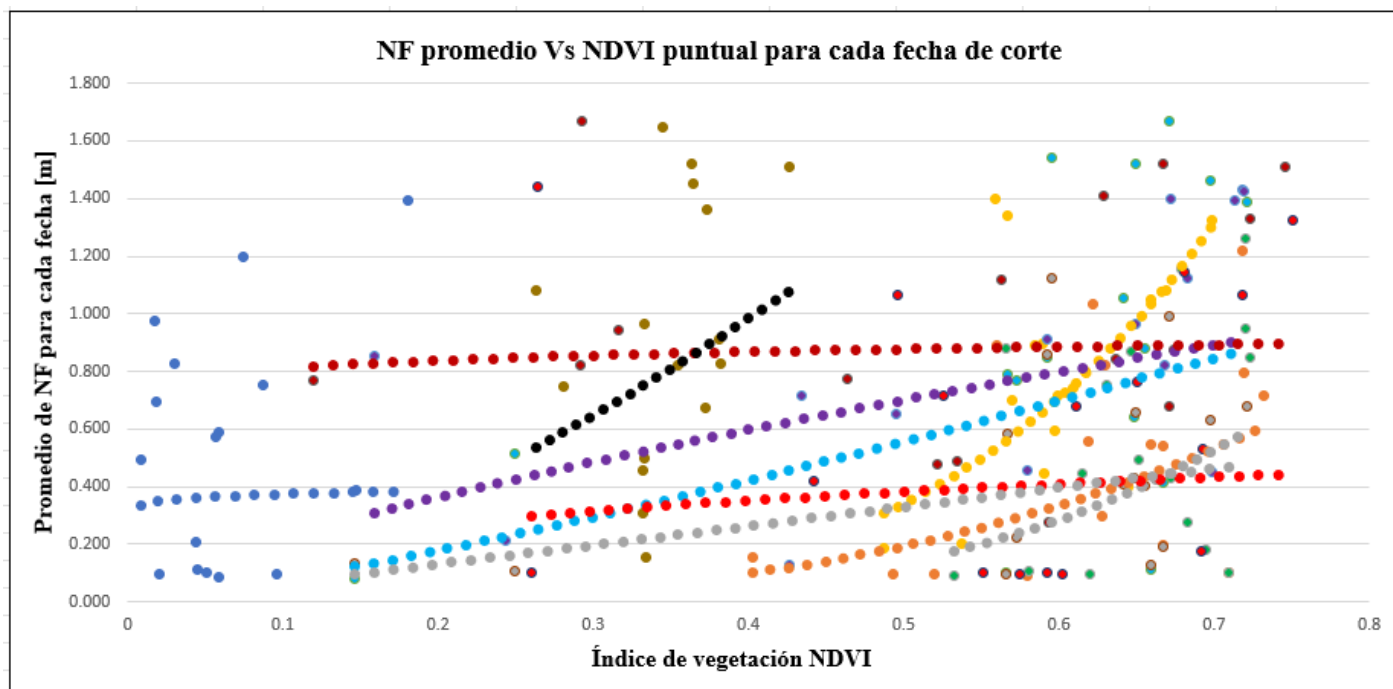


Figura 30. Promedio de NF Vs NDVI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

Como se puede observar en la Figura anterior para el índice NDVI, el comportamiento de las líneas de tendencia es muy diferente y los rangos donde estas se encuentran tampoco son similares, ya que básicamente se desarrollan en toda el área del gráfico; no existe un comportamiento representativo que marque una tendencia general. Más adelante en el Cuadro 9 se detallan las ecuaciones y los valores de R^2 obtenidos para este índice.

Ahora, estas líneas de tendencia fueron construidas con los promedios de las mediciones de niveles freáticos para cada fecha de corte y el índice que arrojaba la imagen satelital, siendo estos datos muy puntuales de ambas variables, ya que para la primera se utilizaron máximo 4 datos, mientras que para la segunda solo el dato del índice calculado. Este comportamiento se repitió con todos los demás índices y se vio reflejado en los valores de R^2 obtenidos, como se presenta a continuación en los Cuadros 9 y 10:

Cuadro 9. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.

Fecha de corte	Índices analizados					
	NDVI		GNDVI		NDMI	
	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
Sep 10, 2021	$y = 1.9406x^{3.9035}$	0.168	$y = 0.6658x^{0.2151}$	0.053	$y = 49.836x^{2.9364}$	0.148
Sep 15, 2021	$y = 1.5474x^{2.9993}$	0.212	$y = 0.7882x^{0.9402}$	0.224	$y = 1.0612x^{0.7987}$	0.074
Sep 20, 2021	$y = 2.2265x^{4.0344}$	0.143	$y = 3.4062x - 1.1927$	0.182	$y = 1.6774x + 0.0858$	0.088
Sep 25, 2021	$y = 5.5181x^{4.0219}$	0.199	$y = 17.526x^{4.2845}$	0.350	$y = 8.6559x^{1.8901}$	0.235
Sep 30, 2021	$y = 1.1513x^{0.7172}$	0.311	$y = 1.561x^{0.8642}$	0.364	$y = 1.3011x^{0.3758}$	0.217
Oct 5, 2021	$1.7124x - 0.1339$	0.252	$y = 2.2543x - 0.1742$	0.242	$y = 4.9681x - 0.5432$	0.350
Oct 10, 2021	$y = 0.4936x^{0.3702}$	0.001	$y = 0.3529x^{-0.119}$	0.002	$y = 1.5223x^{0.8867}$	0.194
Oct 15, 2021	$y = 0.6631x^{1.0086}$	0.183	$y = 0.9574x^{1.1852}$	0.131	$y = 1.3902x^{0.9637}$	0.339
Oct 25, 2021	$y = 0.9087x^{0.0505}$	0.012	$y = 1.0054x^{0.1459}$	0.038	$y = 1.0528x^{0.1222}$	0.029
Oct 30, 2021	$y = 3.7325x^{1.4555}$	0.128	$y = 18.451x^{2.4424}$	0.302	$y = 40.276x^{4.015}$	0.231

Cuadro 10. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.

Fecha de corte	Índices analizados					
	NDRE		GCI		SAVI	
	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
Sep 10, 2021	$y = 0.7138x^{0.255}$	0.061	$y = 0.5674x^{0.2171}$	0.058	$y = 0.4042x^{0.0423}$	0.023
Sep 15, 2021	$y = 0.757x^{0.9269}$	0.273	$y = 0.2488x^{0.7157}$	0.239	$y = 0.4165x^{0.6761}$	0.192
Sep 20, 2021	$y = 3.1961x - 1.0978$	0.264	$y = 0.4202x - 0.351$	0.191	$y = 1.6992x - 1.105$	0.137
Sep 25, 2021	$y = 8.8819x^{3.4429}$	0.288	$y = 0.1826x^{2.278}$	0.340	$y = 1.0825x^{4.0345}$	0.200
Sep 30, 2021	$y = 1.6281x^{0.9728}$	0.445	$y = 0.5675x^{0.594}$	0.416	$y = 0.8615x^{0.7195}$	0.312
Oct 5, 2021	$y = 5.6039x - 2.0783$	0.536	$y = 0.8931x - 1.0566$	0.503	$y = 4.0591x - 3.155$	0.442
Oct 10, 2021	$y = 0.437x^{0.1118}$	0.007	$y = 0.3949x^{-0.003}$	0.000	$y = 0.3802x^{-0.114}$	0.002
Oct 15, 2021	$y = 0.9302x^{1.1628}$	0.249	$y = 0.2404x^{0.7909}$	0.128	$y = 0.4405x^{1.0075}$	0.182
Oct 25, 2021	$y = 1.0262x^{0.175}$	0.052	$y = 0.8391x^{0.1309}$	0.059	$y = 0.8902x^{0.0502}$	0.012
Oct 30, 2021	$y = 11.227x^{2.167}$	0.251	$y = 1.2926x^{1.8128}$	0.306	$y = 2.076x^{1.4604}$	0.130

Como se puede observar en los dos Cuadros anteriores, la mayoría de los valores de R^2 muestran correlaciones que van desde nulas hasta positivas muy bajas, con algunos esporádicos de correlaciones positivas bajas, por lo que se puede concluir que no existe correlación aceptable entre los niveles freáticos encontrados y los índices de vegetación para las fechas de medición. Esto puede discutirse desde dos perspectivas relacionadas entre sí; el

manejo de los datos tan puntuales tal vez no fue el mejor y la sensibilidad de los mismos datos. Como se ha mencionado, la medición de los niveles freáticos en los pozos de observación se realizaba diariamente, mientras que las imágenes satelitales y el cálculo de los índices se realizaba para periodos de 5 días, lo cual supone un desfase entre ambos pares de datos; las imágenes se tomaban en y para un día específico, por lo que el dato del promedio de las mediciones realizadas antes de ese día y el mismo, podían no representar realmente el comportamiento de cada lote.

4.4.2 Rangos de datos de Nivel Freático vs Promedios de Índices de Vegetación

Al cambiar el manejo de los datos en búsqueda de una correlación aceptable, se obtuvieron mejores resultados que en el primer análisis, los cuales son presentados a continuación para cada índice.

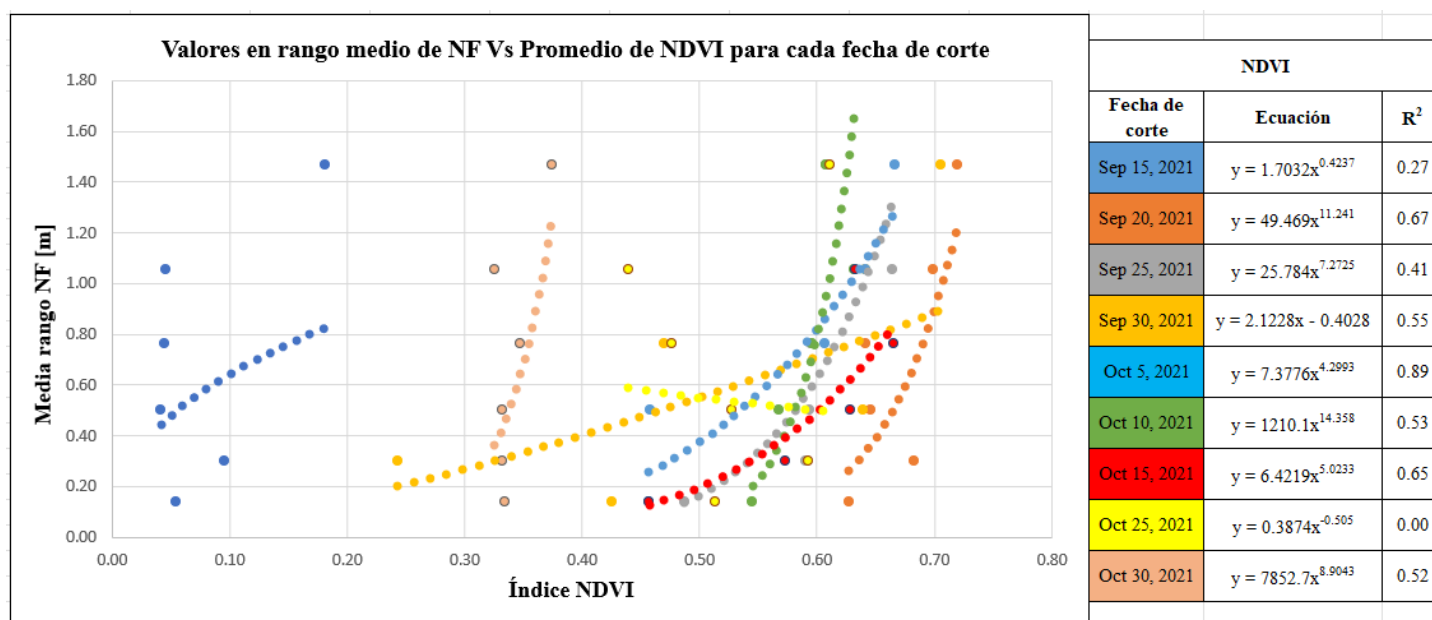


Figura 31. Media de rango de NF Vs Promedio de NDVI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

Como se ha mencionado anteriormente, el NDVI determina la vigorosidad en la planta basándose en la actividad fotosintética, por ende, los valores de este índice dan un indicio de qué tan sano se encuentra un cultivo determinado, en este caso, la caña de azúcar. En la Figura anterior se observa como varias líneas de tendencia se agrupan en el rango del

índice de 0.45 hasta 0.7 aproximadamente, lo que indica que en las fechas correspondientes agrupadas para esas mediciones las plantas se encontraban bastante sanas, lo que coincide también con la edad de desarrollo del cultivo para dichas fechas. Además, este agrupamiento dado, deja ver un comportamiento general del índice ya que este es muy marcado como se puede observar en las líneas de tendencia. Centrándose más en los valores de R^2 obtenidos para dichas líneas de tendencia anteriores, se pueden observar valores de correlaciones positivas moderadas (0.4-0.69), por lo que se puede decir que son valores bastante aceptables hablando en términos agrícolas, lo que da indicio de un buen manejo y relación entre datos.

Por otra parte, se muestran algunas líneas de tendencia que están fuera del rango mencionado anteriormente y que se salen de lo esperado tanto en comportamiento como en valores del índice, indicando vegetación poco sana. Esto pudo haberse dado por “errores” en la toma de las imágenes y por ende en el cálculo del índice; ya que cuando llovía las plantas de caña tenían tendencia a acostarse, lo que provocaba que el suelo o los tallos ocuparan el lugar del follaje de las plantas en la imagen satelital, pudiendo provocar errores en los cálculos.

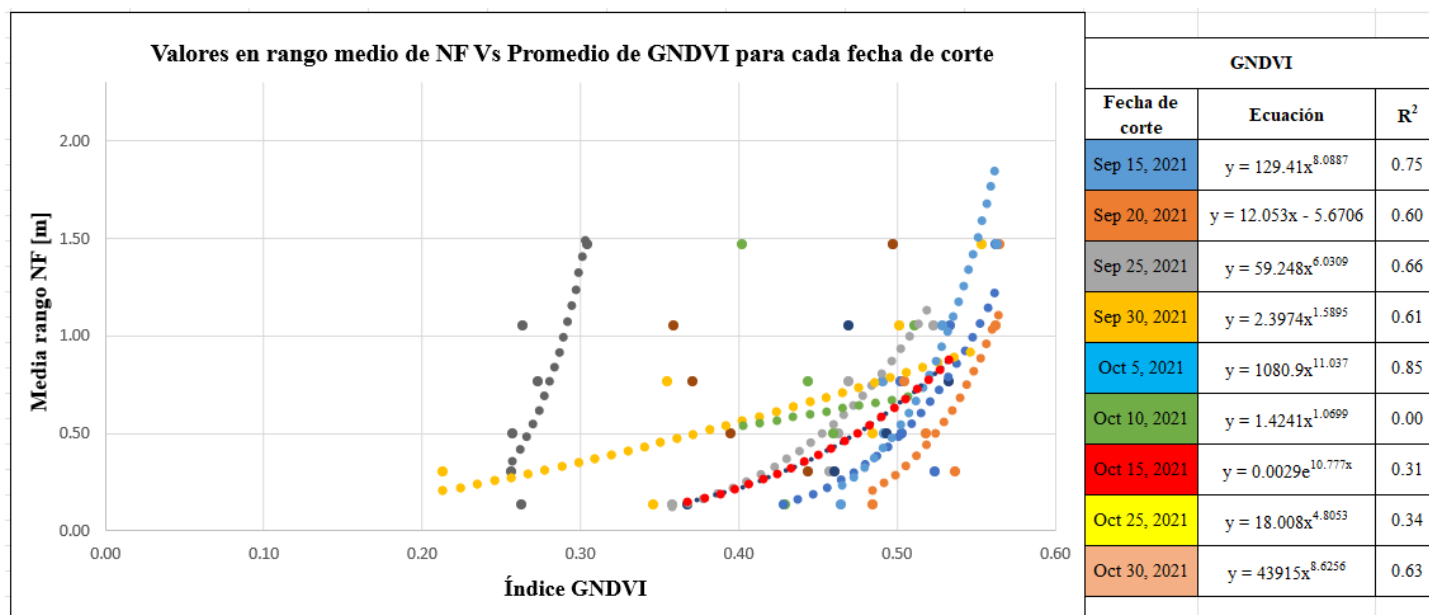


Figura 32. Media de rango de NF Vs GNDVI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R^2 .

Según la teoría, el GNDVI determina el verdor o la actividad fotosintética de las plantas y se ajusta mejor a etapas avanzadas del cultivo, por lo que, para este caso, los valores obtenidos deberían ajustarse de buena manera a la realidad este, ya que las mediciones se realizaron meses antes de la corta de la caña, lo cual indica una edad avanzada esta. Como se observa en la Figura anterior, se repite un comportamiento similar al ocurrido en el NDVI, ya que también se presenta un agrupamiento de la mayoría de las líneas de tendencia obtenidas para un rango del índice; en este caso de 0.4-0.6, mostrando buenos procesos fotosintéticos en las hojas de las plantas, lo cual se asocia a su vez con un buen vigor de estas.

Ahora, de igual manera las líneas de tendencia muestran un comportamiento similar con valores de R^2 que en su gran mayoría muestran correlaciones positivas moderadas, siendo estos bastante aceptables.

Sin embargo, estas correlaciones y datos mostrados para el GNDVI no son concluyentes, ya que, aun siendo bastante aceptables, los valores de R^2 no son los mejores o los óptimos. Existen valores que hacen que este indicador se vea afectado, disminuyendo también directamente el índice y por ende la correlación, y son las plantas ubicadas en el sector Abandonos y Las Salimas, ya que como se ha mencionado anteriormente, estos lotes se encontraban la mayoría del tiempo con bastante presencia de agua, afectando directamente el desarrollo correcto o esperado de las plantas.

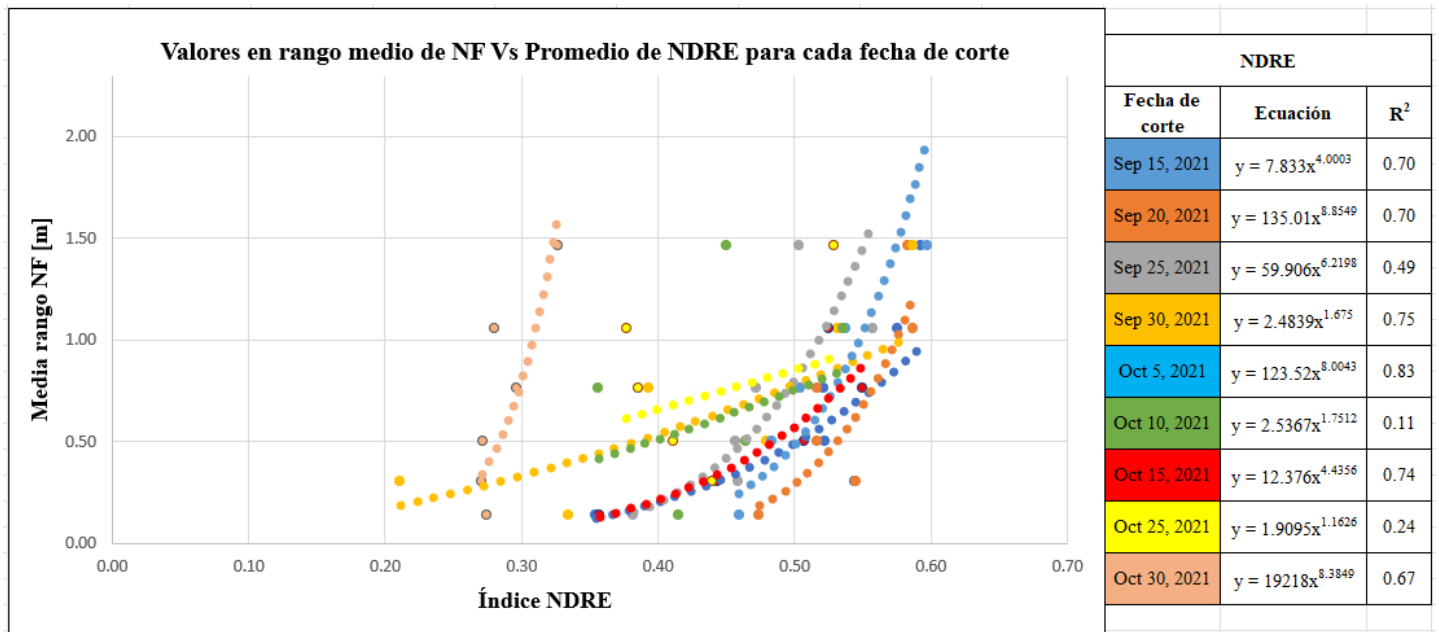


Figura 33. Media de rango de NF Vs NDRE (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R².

Al analizar la Figura anterior, se observa que se repite el mismo patrón mostrado en los índices anteriores, tanto en el comportamiento de las líneas de tendencia como en el agrupamiento similar de estas, en este caso desde 0.40 aproximadamente hasta 0.60 en los valores del NDRE. La teoría indica que valores bajos de este índice se ven asociados directamente con el estrés hídrico, mientras que valores altos lo contrario. La mayoría de los valores presentados muestran que las plantas durante el periodo de análisis estaban exentas de sufrir estrés hídrico, ya que no se presentaron valores bajos o críticos, lo cual es coincidente con las precipitaciones que se presentaron en el periodo de medición (invierno o época lluviosa).

Centrándose propiamente en los valores de R² obtenidos, se puede observar que la mayoría muestran correlaciones positivas altas (0.7-0.89) y algunos se encuentran en el rango de positiva moderada. Esto deja descubierto que si existe una buena correlación entre los valores de la media del rango del nivel freático con los índices encontrados para dichos rangos.

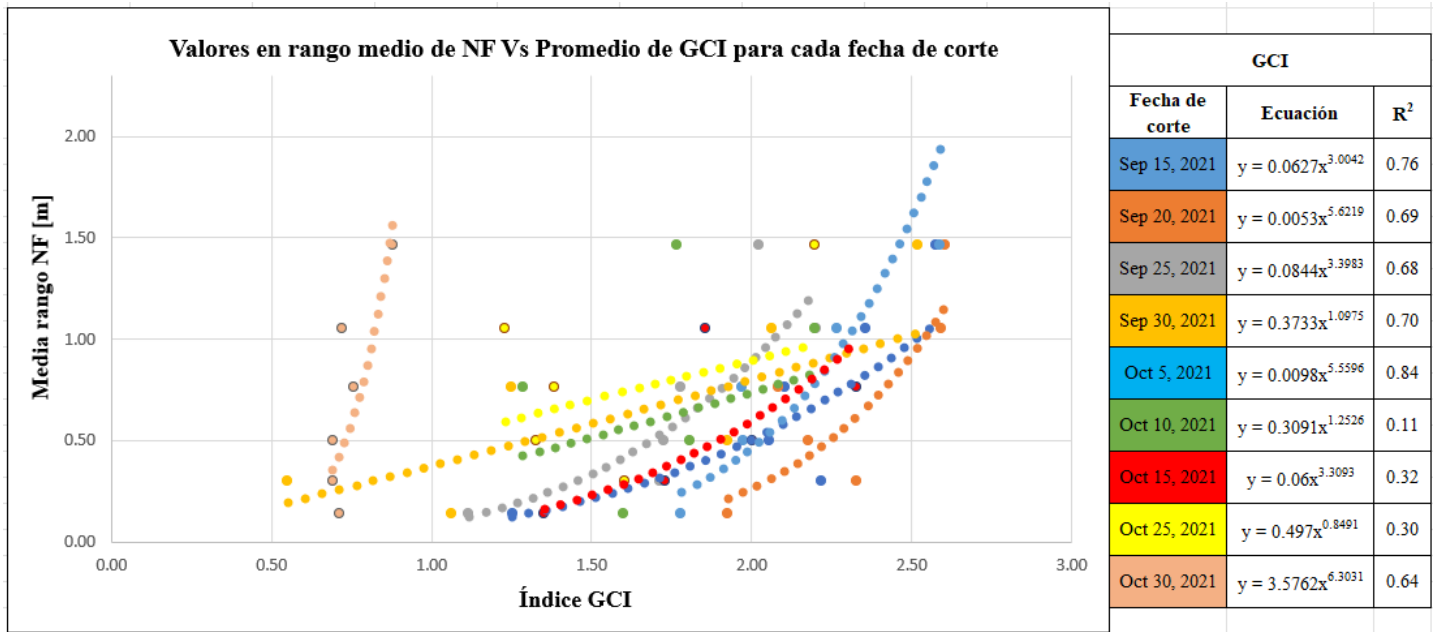


Figura 34. Media de rango de NF Vs GCI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R².

El GCI refleja el estado fisiológico de la vegetación, los valores disminuyen en plantas estresadas, por lo tanto, puede usarse como un evaluador de la rigurosidad de estas, sirviendo también como complemento para el NDVI. Para este caso, se ve de igual forma un agrupamiento de varias líneas de tendencia, pero para un rango mayor (1.0-2.5). Estos valores para este rango determinan plantas con una vigorosidad de media a buena, tal como ha sucedido con los índices anteriores.

Para este índice también se encontraron correlaciones aceptables, ya que la mayoría de los valores de R² se encontraban entre 0.4-0.69 y 0.7-0.89, lo que supone correlaciones positivas moderadas y altas, lo que indica nuevamente una relación bastante aceptable entre los datos analizados y el manejo brindado (media de rango de nivel freático y promedios de índice para un área determinada por los pozos de observación).

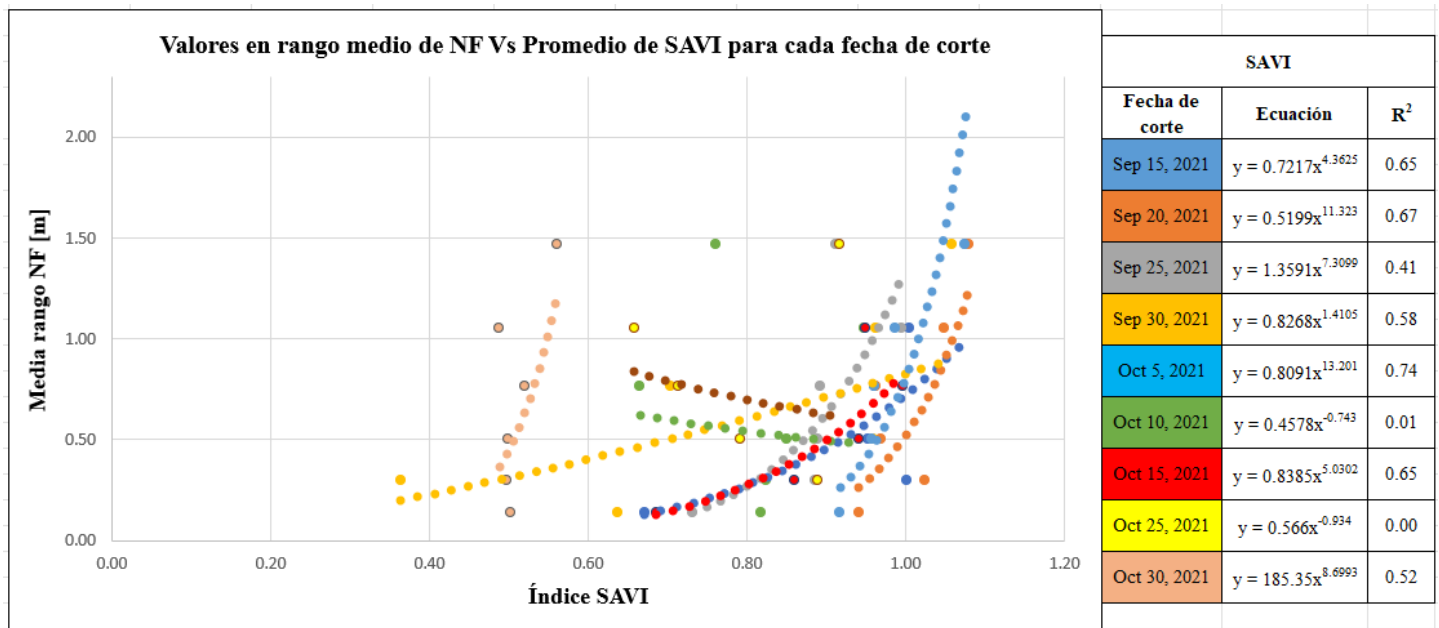


Figura 35. Media de rango de NF Vs SAVI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R².

El índice SAVI muestra resultados mitigando el impacto del suelo y su brillo, por ende, este sirve como un buen complemento para el NDVI, ya que permite obtener resultados más precisos para analizar de esta manera el vigor o estado de la planta. Como se observa en la Figura anterior, se da un agrupamiento de las líneas de tendencia mayormente entre valores del índice de 0.65 hasta 1.05 aproximadamente; estos valores permiten determinar una buena vigorosidad de las plantas. Sin embargo, se presentan algunos valores fuera de este comportamiento, lo cual puede deberse también a los índices calculados para los lotes de los sectores Abandonos y Las Salimas.

Al analizar los valores obtenidos de R², se puede observar que la mayoría indican correlaciones positivas altas entre los datos estudiados, siendo estos valores más que aceptables, permitiendo decir que si existe una relación directa entre la media de los rangos de nivel freático manejados y en este caso el índice SAVI.

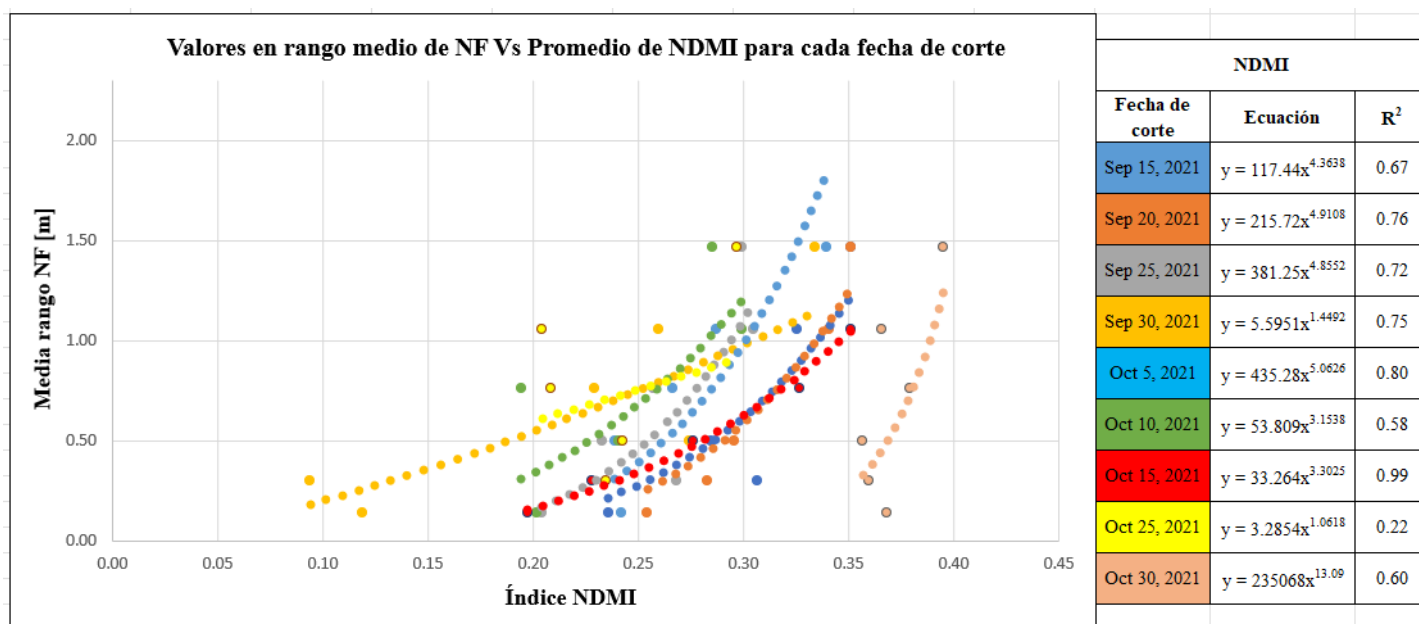


Figura 36. Media de rango de NF Vs NDMI (Análisis 2) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia, ecuaciones y R².

Para el NDMI se puede observar un comportamiento similar al ocurrido con los demás índices, ya que hay un agrupamiento de varias líneas de tendencia para un rango determinado de valores para el índice, en este caso de 0.20 hasta 0.35 mayormente. Ahora, según la teoría, estos valores del índice obtenidos para el periodo de estudio representan áreas con cobertura media y estrés hídrico bajo. Estos niveles bajos de estrés hídrico detectados pueden deberse a la aplicación de madurante en los lotes, ya que como bien se sabe este producto induce a la planta hacia esta condición, con la finalidad de su producción de azúcar aumente. Sin embargo, lo anterior no puede relacionarse directamente con valores específicos de profundidad de nivel freático, ya que como se observa, hay un rango considerable que va desde casi los 0 metros hasta 1.5.

Si se analizan los valores de R², los obtenidos para este índice fueron los mejores; ya que la gran mayoría representan correlaciones positivas moderadas y correlaciones positivas altas. Además, se da un caso especial con la línea de tendencia resultante para el 15 de octubre, mostrando una correlación positiva muy alta. Lo anterior demuestra que existe una relación bastante fuerte entre los valores de profundidad de nivel freático y el NDMI con el manejo de datos realizado.

4.4.3 Selección del índice representativo del estudio

Según lo visto anteriormente, la línea de tendencia obtenida para los valores de nivel freático y el NDMI del 15 de octubre de 2021, representa la de mejor ajuste para todo el periodo de estudio, ya que posee un valor de R^2 de 0.99 (correlación positiva muy alta). Por ende, esta ecuación obtenida podría tomarse como una forma o método de predicción de la profundidad de niveles freáticos [m] en función del NDMI.

El modelo Nivel Freático = $33.264(\text{NDMI})^{3.3025}$ sería la recomendación para utilizarse como método predictivo de la profundidad del nivel freático en función del Índice de Diferencia Normalizada de Humedad para los meses específicos donde se realizó el estudio. Para darle validez a la ecuación o hacerla más precisa y pueda utilizarse para cualquier mes del año, podría replicarse el estudio, pero para todo el año, haciendo el mismo manejo de datos de nivel freático e índices, con la finalidad de ajustar mejor dicha ecuación.

4.4.4 Análisis general de las correlaciones encontradas

Al observar las Figuras de cada uno de los índices analizados y al compararlas con las del primer análisis, se ve una notable mejoría en los valores de correlación R^2 , suponiendo inicialmente para este ajuste en el manejo de datos mejores resultados. En los Cuadros 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos a maneja de resumen, a partir de los cuales se realizará la discusión de estos.

Cuadro 11. Ecuaciones y valores de R^2 encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.

Fecha de corte	Índices analizados					
	NDVI		GNDVI		NDMI	
	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
Sep 15, 2021	$y = 1.7032x^{0.4237}$	0.268	$y = 129.41x^{8.0887}$	0.753	$y = 117.44x^{4.3638}$	0.671
Sep 20, 2021	$y = 49.469x^{11.241}$	0.672	$y = 12.053x - 5.6706$	0.604	$y = 215.72x^{4.9108}$	0.764
Sep 25, 2021	$y = 25.784x^{7.2725}$	0.411	$y = 59.248x^{6.0309}$	0.661	$y = 381.25x^{4.8552}$	0.719
Sep 30, 2021	$y = 2.1228x - 0.4028$	0.554	$y = 2.3974x^{1.5895}$	0.614	$y = 5.5951x^{1.4492}$	0.754
Oct 5, 2021	$y = 7.3776x^{4.2993}$	0.894	$y = 1080.9x^{11.037}$	0.850	$y = 435.28x^{5.0626}$	0.799
Oct 10, 2021	$y = 1210.1x^{14.358}$	0.534	$y = 1.4241x^{1.0699}$	0.004	$y = 53.809x^{3.1538}$	0.581
Oct 15, 2021	$y = 6.4219x^{5.0233}$	0.650	$y = 0.0029e^{10.777x}$	0.313	$y = 33.264x^{3.3025}$	0.988
Oct 25, 2021	$y = 0.3874x^{-0.505}$	0.000	$y = 18.008x^{4.8053}$	0.337	$y = 3.2854x^{1.0618}$	0.223
Oct 30, 2021	$y = 7852.7x^{8.9043}$	0.522	$y = 43915x^{8.6256}$	0.631	$y = 235068x^{13.09}$	0.597

Cuadro 12. Ecuaciones y valores de R² encontrados para los índices analizados (Análisis 1) para cada fecha respectiva de corte.

Fecha de corte	Índices analizados					
	NDRE		GCI		SAVI	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
Sep 15, 2021	$y = 7.833x^{4.0003}$	0.697	$y = 0.0627x^{3.0042}$	0.760	$y = 0.7217x^{4.3625}$	0.648
Sep 20, 2021	$y = 135.01x^{8.8549}$	0.696	$y = 0.0053x^{5.6219}$	0.693	$y = 0.5199x^{11.323}$	0.672
Sep 25, 2021	$y = 59.906x^{6.2198}$	0.487	$y = 0.0844x^{3.3983}$	0.683	$y = 1.3591x^{7.3099}$	0.414
Sep 30, 2021	$y = 2.4839x^{1.675}$	0.746	$y = 0.3733x^{1.0975}$	0.696	$y = 0.8268x^{1.4105}$	0.582
Oct 5, 2021	$y = 123.52x^{8.0043}$	0.834	$y = 0.0098x^{5.5596}$	0.838	$y = 0.8091x^{13.201}$	0.742
Oct 10, 2021	$y = 2.5367x^{1.7512}$	0.113	$y = 0.3091x^{1.2526}$	0.112	$y = 0.4578x^{-0.743}$	0.011
Oct 15, 2021	$y = 12.376x^{4.4356}$	0.738	$y = 0.06x^{3.3093}$	0.315	$y = 0.8385x^{5.0302}$	0.651
Oct 25, 2021	$y = 1.9095x^{1.1626}$	0.242	$y = 0.497x^{0.8491}$	0.300	$y = 0.566x^{-0.934}$	0.002
Oct 30, 2021	$y = 19218x^{8.3849}$	0.668	$y = 3.5762x^{6.3031}$	0.643	$y = 185.35x^{8.6993}$	0.517

Al observar los dos cuadros resumen anteriores, se puede notar que una gran mayoría de datos de R² se encuentran en el rango de correlación positiva moderada (0.4 – 0.69) y que, además, existe presencia notable de datos en el rango de correlación positiva alta (0.7 – 0.89).

Por otro lado, en las clasificaciones de rangos más bajas se encuentran pocos datos. Estos valores más bajos pueden tener origen en varios factores; tal vez las mediciones de niveles freáticos en ciertos lotes no eran “totalmente representativos” o ajustados a la realidad del mismo, ya que muchos de estos suelos se encontraban saturados por la presencia de la época lluviosa y al relacionarse con los índices no concordaban uno con el otro. También puede haber ocurrido el caso contrario a lo anterior; que las imágenes descargadas para las fechas específicas donde se encuentran estos datos se hayan visto afectadas por factores ambientales como la nubosidad y/o intensidad de luz solar a la hora de la toma de la imagen.

La cantidad de correlaciones en el rango encontrado y su respectivo porcentaje en el total de los datos obtenidos de correlaciones obtenidas se presenta a detalle en el siguiente cuadro:

Cuadro 13. Porcentajes de clasificación de datos de R².

Significado	Valor	Cantidad de correlaciones	Porcentaje [%]
Correlación positiva muy baja	0.01 - 0.19	6	11.1
Correlación positiva baja	0.2 - 0.39	7	13.0
Correlación positiva moderada	0.4 - 0.69	27	50.0
Correlación positiva alta	0.7 - 0.89	13	24.1
Correlación positiva muy alta	0.9 - 0.99	1	1.9
	Sumatoria	54	100.0

Manejando los datos más a detalle, se obtiene que el 50% de los datos de R² muestran que existe una correlación positiva moderada, siendo estos mayoría en la totalidad de los mismos. Además, el segundo grupo más grande de datos (24.1%) está en una correlación positiva alta, mientras que la minoría está en las clasificaciones de correlaciones bajas.

Por lo tanto, se puede decir que con este manejo de datos si se presenta una correlación aceptable de los índices de vegetación con los niveles freáticos separados en rangos. En términos agrícolas y sobre todo en temas de drenaje, correlaciones con R² cercanos a 0.6 se consideran buenos debido a la gran cantidad de factores que tienen incidencia en el comportamiento de los suelos y la metodología con la cual se realizan los estudios en ellos. Además, el manejo de datos por rangos es una práctica muy común en la parte agrícola de los Ingenios, ya que en estos se usan estimados para el manejo de las diferentes fincas en términos de riego y drenaje; esto permite tener una idea del comportamiento que se presenta en grandes extensiones de terreno con mediciones realizadas de forma estratégica dependiendo de lo requerido. Además, en temas de riego y drenaje, como se dijo anteriormente, se manejan rangos también a la hora del diseño de distintas obras, tomando muchas veces los datos que se encuentran en los extremos de los rangos, sirviendo estos como los valores más críticos de diseño.

Este acomodo de datos realizado también cobra sentido, ya que, se debían promediar los datos de niveles freáticos para hacerlos calzar con las imágenes y su disponibilidad cada 5 días, debido a que el hacerlo de esta manera asegura estar mostrando un comportamiento general y representativo de los lotes donde estaban ubicados los pozos porque está tomando todos los datos involucrados.

4.5 Isóbatas e Isohypsas

Tal como se mencionó en la metodología, se elaboraron dichos mapas de interés para la zona de estudio en periodos de medición de aproximadamente 15 días, obteniendo las siguientes Figuras:

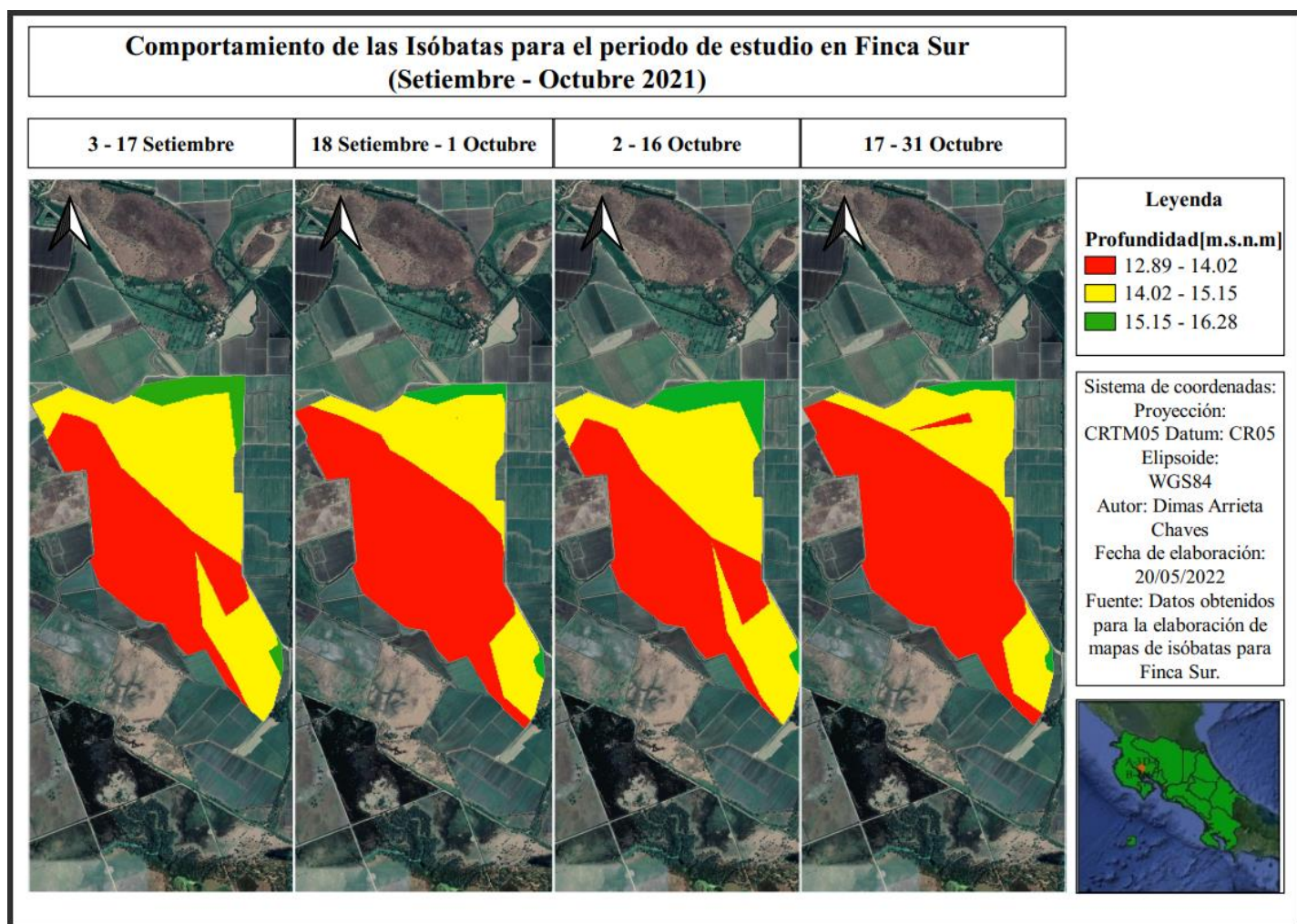


Figura 37. Comportamiento de Isóbatas para Finca Sur.

En la Figura anterior se muestra el comportamiento obtenido de las isóbatas para periodos de 15 días y realizadas consecuentemente con los promedios de las mediciones realizadas para dichas fechas. Se puede observar un comportamiento bastante similar en los 4 periodos, donde predominan profundidades sobre el nivel del mar de 12.89 m – 14.02 m y de 14.02 m – 15.15 m. Se realizó esta categorización dejando aproximadamente un metro de diferencia entre cada una para que fueran divisiones equivalentes.

Para tener una idea más clara de las profundidades de los niveles freáticos tomando como referencia el nivel del suelo, se presenta la siguiente Figura.

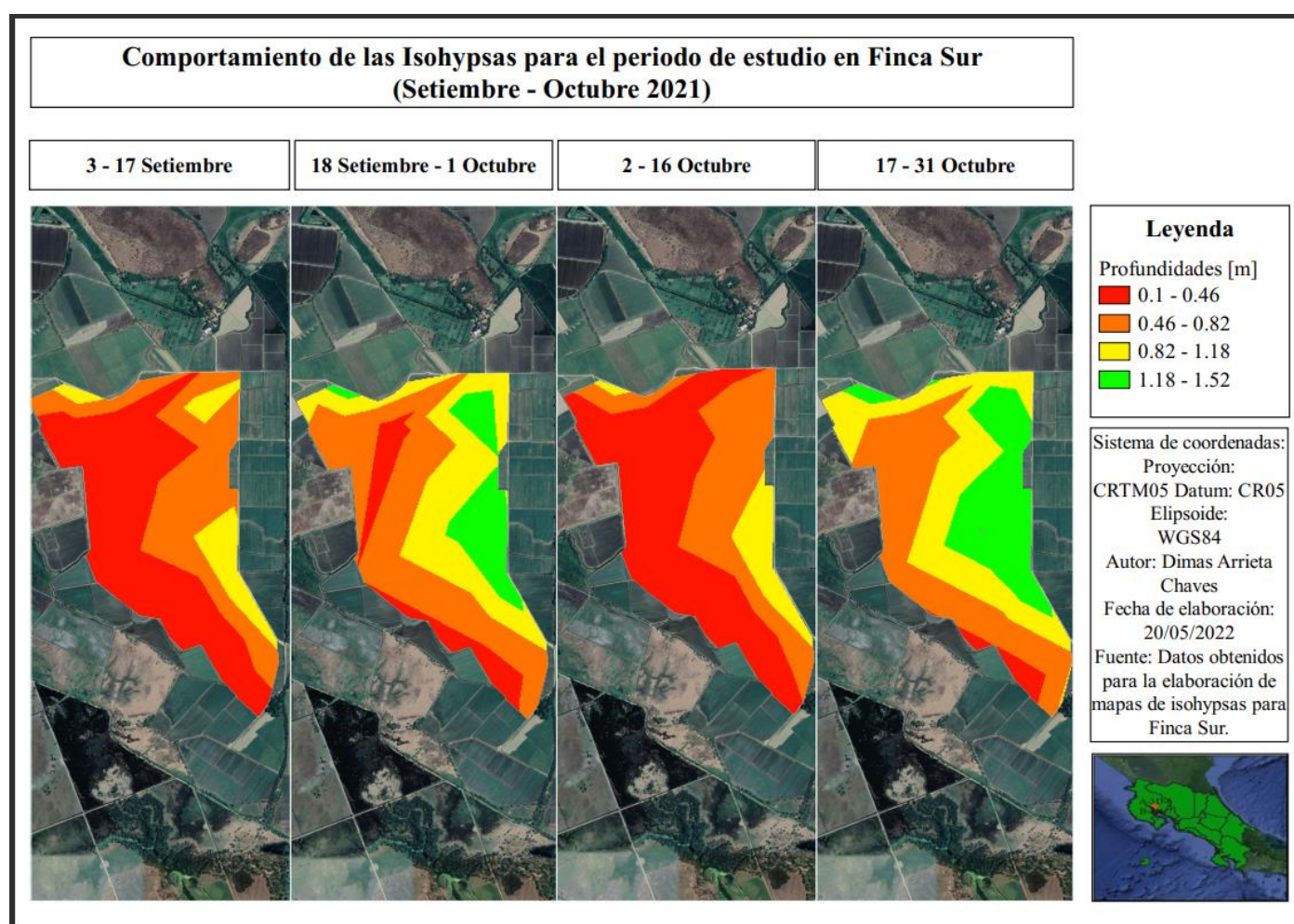


Figura 38. Comportamiento de Isohypsas en Finca Sur.

En la Figura anterior se puede apreciar de una mejor manera el comportamiento de las profundidades del nivel freático para el periodo de estudio y específicamente para los rangos de fechas manejados con la finalidad de dar representatividad. Como se puede

observar, del 3 al 17 de setiembre predominan niveles casi superficiales (0.1 – 0.46 metros), esto era esperable ya que para dichas fechas aún se presentaban lluvias correspondientes a la época de invierno. En el siguiente rango (18 de setiembre – 1 octubre) se puede observar que las profundidades aumentaron un poco, debido al “veranillo” presentado en dicho periodo, teniendo en una buena parte ya profundidades de nivel freático más altas. Para el último rango se nota una mejoría notoria, ya que para este rango de fechas el invierno ya había salido por completo, por lo que se tienen mayores profundidades.

Las zonas donde se observan niveles freáticos superficiales, corresponden a aquellas cercanas a los sectores de las Salimas y Abandonos, lo que confirma los problemas de drenaje en los lotes cercanos a la zona como incidencia de la situación del Canal de la Bajura.

4.6 Valoración ambiental y económica

Debido al tipo de proyecto desarrollado y por el tipo de resultados obtenidos, no fue necesario hacer análisis profundos en materia ambiental ni económica. Ya que para el desarrollo del mismo solo se hicieron pozos de observación (los tubos de PVC utilizados serían reutilizados por la empresa en otras labores de riego y drenaje) y su complemento fue la descarga y manejo de imágenes satelitales mediante software libre (Google Earth Engine). No se incurrió en modificaciones considerables al ambiente ni en gastos como tal, ya que los materiales y herramientas utilizadas eran propiedad de la empresa.

Además, la construcción de un modelo predictivo del nivel freático como el elaborado supone un beneficio tanto ambiental como económico, ya que este sirve para darse una idea bastante exacta de la profundidad del nivel freático sin tener que realizar ningún tipo de medición en campo y sin tener que invertir en equipo o personal destinado para el monitoreo de los niveles.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- No existe influencia directa de las mareas ni de las precipitaciones sobre las profundidades de los niveles freáticos de los lotes en estudio.
- El cálculo de los diferentes índices de vegetación se pudo realizar con éxito gracias a la programación realizada en Google Earth Engine, siendo esta una herramienta útil para el cálculo de dichos valores para determinadas áreas de interés puntuales.
- Con el manejo de datos realizados, se encontraron correlaciones positivas moderadas y positivas altas para los índices estudiados, en los rangos de valores de R^2 de 0.40-0.69 y 0.70-0.89. Demostrando así un buen manejo de datos bajo el principio de representatividad para los lotes estudiados.
- El índice donde se obtuvieron las mejores correlaciones fue el NDMI, extrayendo de este la ecuación con mayor valor de R^2 de todo el estudio (0.99), siendo esta una herramienta para la predicción de la profundidad del nivel freático en función de dicho índice.
- El comportamiento detectado para el análisis de los mapas de isóbatas e isohypsas fue el esperado; las curvas que representan profundidades eran más profundas en los lotes sin problemas de drenaje, mientras que para las áreas más críticas (lotes cerca del Canal de la Bajura en sectores Abandonos y las Salimas) las curvas se encontraban mucho más cerca de la superficie.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar la medición y el estudio de los niveles freáticos para todos los meses del año en los lotes o áreas de interés, esto con la finalidad de tener datos actualizados mes a mes y poder analizar el comportamiento de dichos niveles en todas las estaciones del año. Además de poder construir mapas (isóbatas e isohypsas) que sirvan para el análisis posterior y puedan servir como herramientas para la toma de decisiones.
- Para garantizar un ajuste más preciso de la ecuación encontrada como método de predicción del nivel freático en función del NDMI, se recomienda extender el estudio

para todos los meses del año, tanto para las mediciones de nivel freático como para el cálculo del índice. Esto para asegurar que dicha ecuación abarque todo un ciclo completo de la caña y así poder utilizarla posteriormente en cualquier momento.

- Las zonas que presentaban mayores problemas de drenaje y por consiguiente malos valores para los índices corresponden a la zona de Abandonos y Las Salimas, esto por el problema ocasionado por el Canal de la Bajura. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio de diseño de la zona, con el propósito de recomendar obras o estructuras hidráulicas que ayuden a solventar dichos problemas. Como solución temporal se recomienda la instalación de válvulas flap en las zonas que deberían servir como desagüe hacia el Canal de la Bajura, ya que en estas zonas es donde se origina la problemática descrita en la sección de introducción.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Andreu, A., Carpintero, E., & González, M. (2021). *Teledetección para la Agricultura*. 1–41.
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj11YqVg9LwAhUxElkFHYQzALoQFjAEegQIExAD&url=https%253A%252F%252Fwww.juntadeandalucia.es%252Fagriculturaypesca%252Fifapa%252Fservifapa%252Fregistro-servifapa%252Fbdac6055-21a9-4dd7-8c>
- Angulo, Á., Rodríguez, M., & Chaves, M. A. (2020). *CULTIVO CAÑA DE AZÚCAR REGIÓN : GUANACASTE*.
- Araujo, I. L., & Díaz, J. L. E. (2018). Evaluación del almacenamiento de carbono de la especie forestal “Eucalyptus Globulus Lamill” y su relación con los índices de vegetación en el bosque de Pallasca - Ancash, 2018. *Universidad César Vallejo*.
- Bautista, F., & Palacio, J. L. (2011). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. *Técnicas de Muestreo Para Manejadores de Recursos Naturales, January*.
<https://doi.org/10.22201/ciga.9786070221279p.2011>
- Bernabé, M. A., & López, C. M. (2012). *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*.
- Borja, C. D. (2020). *Análisis De La Variabilidad Espacio -Temporal Del Índice De Vegetación Mejorado (Evi) Y Su Relación Con Índices Atmosféricos Globales En El Páramo Ecuatoriano*. 99.
- Calo, F. (2018a). *¿Cuál es la diferencia entre el índice NDVI y GNDVI?* Página Web de Auravant. <http://soporte.auravant.com/soporte/cual-es-la-diferencia-entre-el-indice-ndvi-y-gndvi/>
- Calo, F. (2018b). *¿Qué es el índice GNDVI?* Página Web de Auravant. <http://soporte.auravant.com/soporte/que-es-gndvi/>
- Cruz, R. (1995). Drenajes. *El Cultivo de Caña*, 24.
http://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seridados/libro_el_cultivo_cana/libro_p211-233.pdf

- Díaz, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad Complutense De Madrid, Junio, 25*.
https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- EOS. (n.d.). *NDMI (Índice De Humedad De Diferencia Normalizada)*.
<https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/>
- González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016). Drones Aplicados a la Agricultura De precisión Drones Applied to precision Agriculture. *Publicaciones e Investigación, 10*, 23–37.
- Iniesto, M., & Núñez, A. (2013). Introducción a las Infraestructuras de Datos Espaciales. *Instituto Geográfico Nacional, 1–27*.
<http://www.ign.es/ign/resources/cartografiaEnsenanza/ideeEso/I-IDE/I-IDE/>
- IPGH. (2017). *Datos Geoespaciales Fundamentales. 15*.
<https://www.ipgh.org/assets/dgf.pdf>
- JMP Software Estadístico. (n.d.). *La prueba t de dos muestras*.
https://www.jmp.com/es_ar/statistics-knowledge-portal/t-test/two-sample-t-test.html
- Laguna, C. (2014). Correlación y regresión lineal. *Análisis Exploratoria de Datos*, 143–178.
<https://doi.org/10.2307/j.ctvc5pc9g.6>
- Lopez, D., & Torres, A. (2015). ¿Cuáles son los componentes del dato espacial? *Centro de Investigación En Geografía y Geomática*, 10–15.
- MAG. (1991). Cultivo de la caña. *Aspectos Técnicos Sobre Cuarentena y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica.*, 178. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/tec-cana.pdf>
- Martínez, S. (2020). *Características de las diferentes misiones de SENTINEL*.
<https://www.cursosteledeteccion.com/caracteristicas-de-las-diferentes-misiones-de-sentinel/>
- Mejía, J. D. (2020). *Análisis de la susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios*

mediante Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI) y clasificación del IDEAM: caso de estudio subregión Bajo Sinú – Córdoba. 1–23.
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/3452>

Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, 15.
[http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Indices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetacion%2C%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica* (Vol. 148).

Osteópatas Federación Científica Europea. (2019). Prueba “t” de Student. *Prueba “t” de Student*, 1–5. <https://www.scientific-european-federation-osteopaths.org/wp-content/uploads/2019/01/Prueba-t-de-Student.pdf>

Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SfrGxbO1DT0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=teledetección+espacial&ots=pFgj0w8iI_&sig=ArtrWoVbcbFdE_5APJcWfYxoATo#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SfrGxbO1DT0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=teledetecci%C3%B3n+espacial&ots=pFgj0w8iI_&sig=ArtrWoVbcbFdE_5APJcWfYxoATo#v=onepage&q&f=false)

Perilla, G., & Mas, J.-F. (2020). *Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube*.
<http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59929>

Ramos, D. (2020). *Los 6 Índices de Vegetación para completar el NDVI*.
<https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/>

Salgado, L. (n.d.). *Estudio de niveles freáticos y piezométricos*.

Santos, J., & Cocero, D. (2017). Los Sig Raster: Herramienta De Análisis Medio Ambiental Y Territorial. *Sistemas de Información Geográfica*, 60–256.

Suárez, M. (2011). *Coeficiente de correlación de Karl Pearson* (Vol. 3, Issue 2, pp. 54–67).
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>

Toribio, G. (2019). *NDVI, ¿Qué es y para qué sirve?*

<https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

Torres, M. (2017). Aplicaciones geomáticas en agricultura. *RiuNet*.
<http://hdl.handle.net/10251/88361>

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99–107. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292020000400099>

Villón, M. (2007). *Drenaje*. Editorial del Tecnológico de Costa Rica.

Watson, F., Gómez, N., & da Silva, R. P. (2022). Oil Palm Yield Estimation Based on Vegetation and Humidity Indices Generated from Satellite Images and Machine Learning Techniques. *AgriEngineering*, 4(1), 279–291. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010019>

Yara. (n.d.). *Gestión de suelos y agua en caña de azúcar*.
<https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/cana-de-azucar/gestion-de-suelos-y-agua-en-cana-de-azucar/>

7 ANEXOS

Anexo 1. Fotografías del área de estudio.



Figura 39. Río cercano a sector Salimas.



Figura 40. Estado de los drenes en Sector Salimas antes de la construcción de tapones y limpieza en los drenes de desagüe.



Figura 41. Estado de los drenes en Sector Salimas antes de la construcción de tapones y limpieza en los drenes de desagüe.



Figura 42. Estado de los drenes en sector Salimas luego de construcción de tapones y limpieza en los drenes de desagüe.

Anexo 2. Gráficas obtenidas del Análisis 1 (Promedios puntuales de mediciones de niveles freáticos Vs Índices de Vegetación)

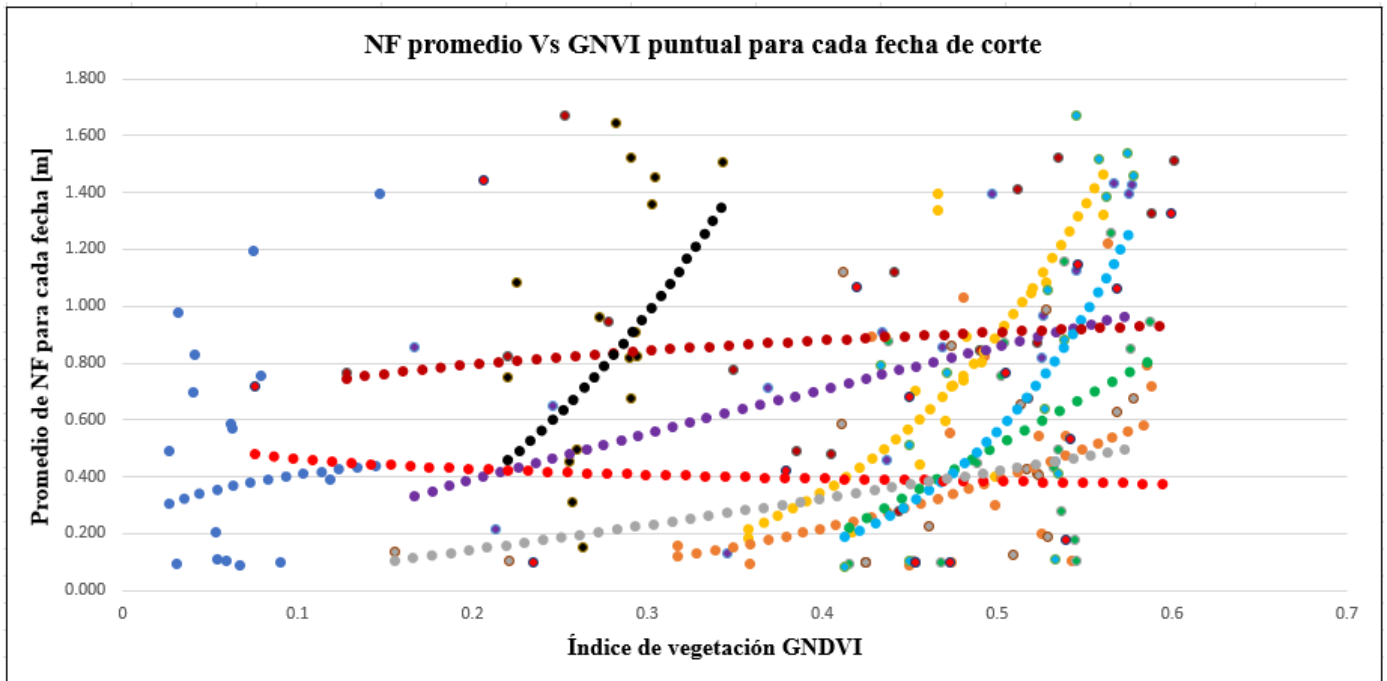


Figura 43. Promedio de NF Vs GNVI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

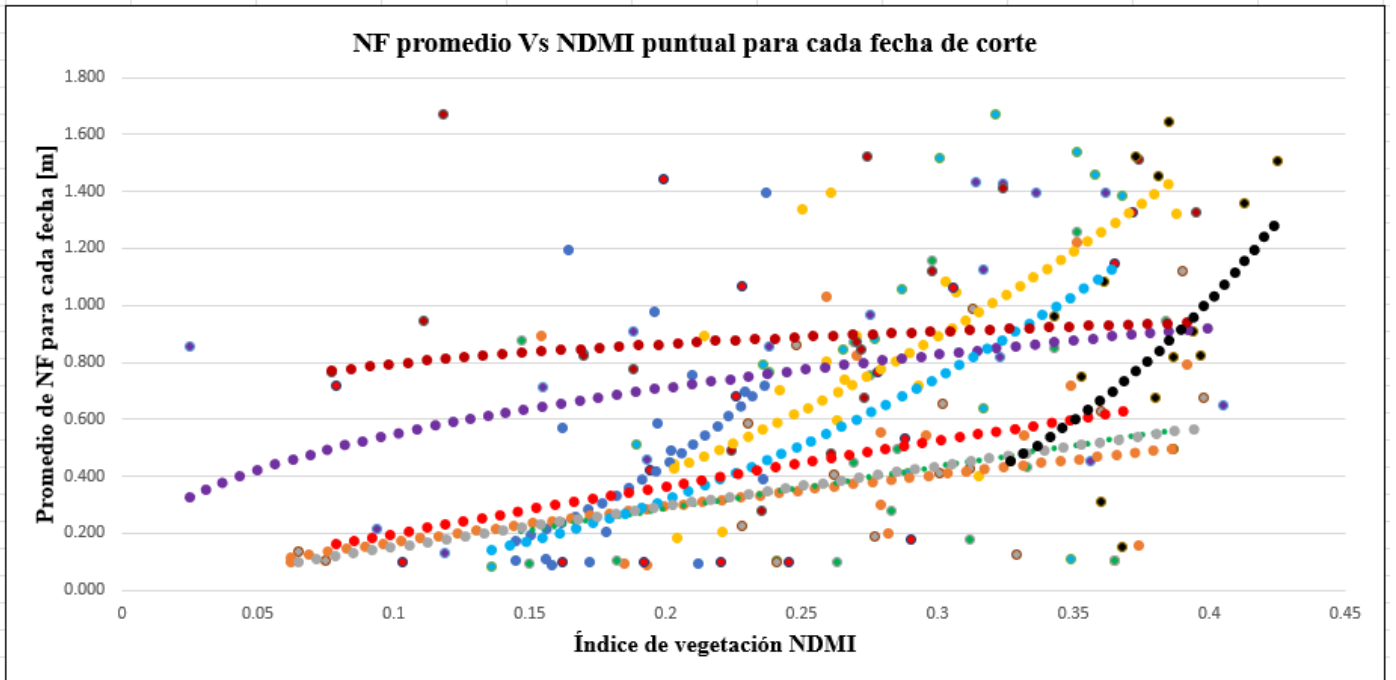


Figura 44. Promedio de NF Vs NDMI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

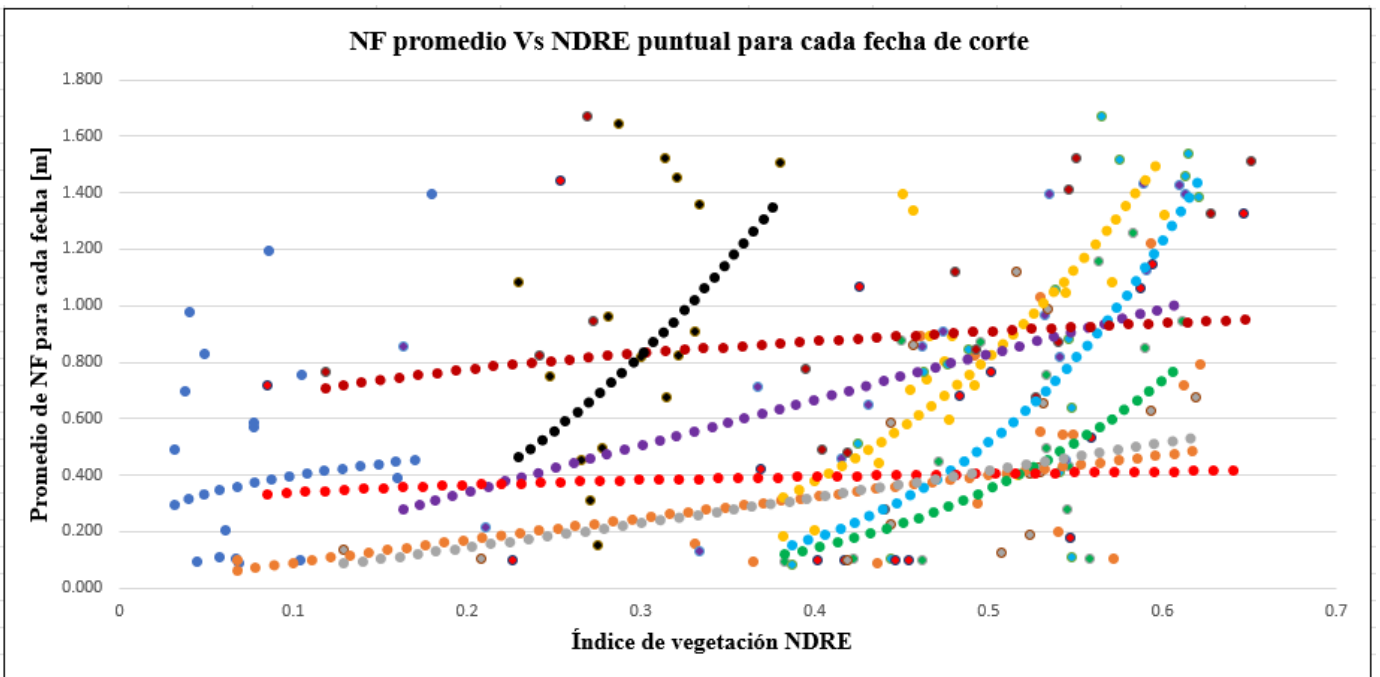


Figura 45. Promedio de NF Vs NDRE (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

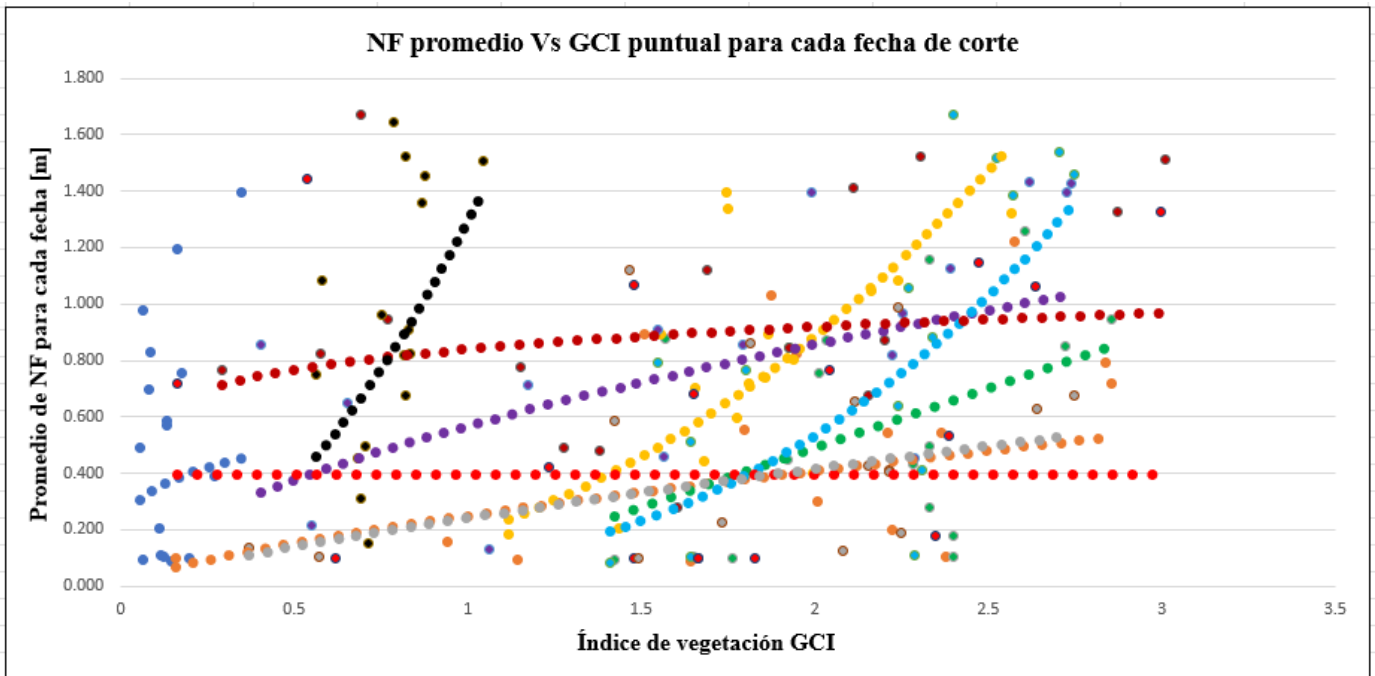


Figura 46. Promedio de NF Vs GCI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

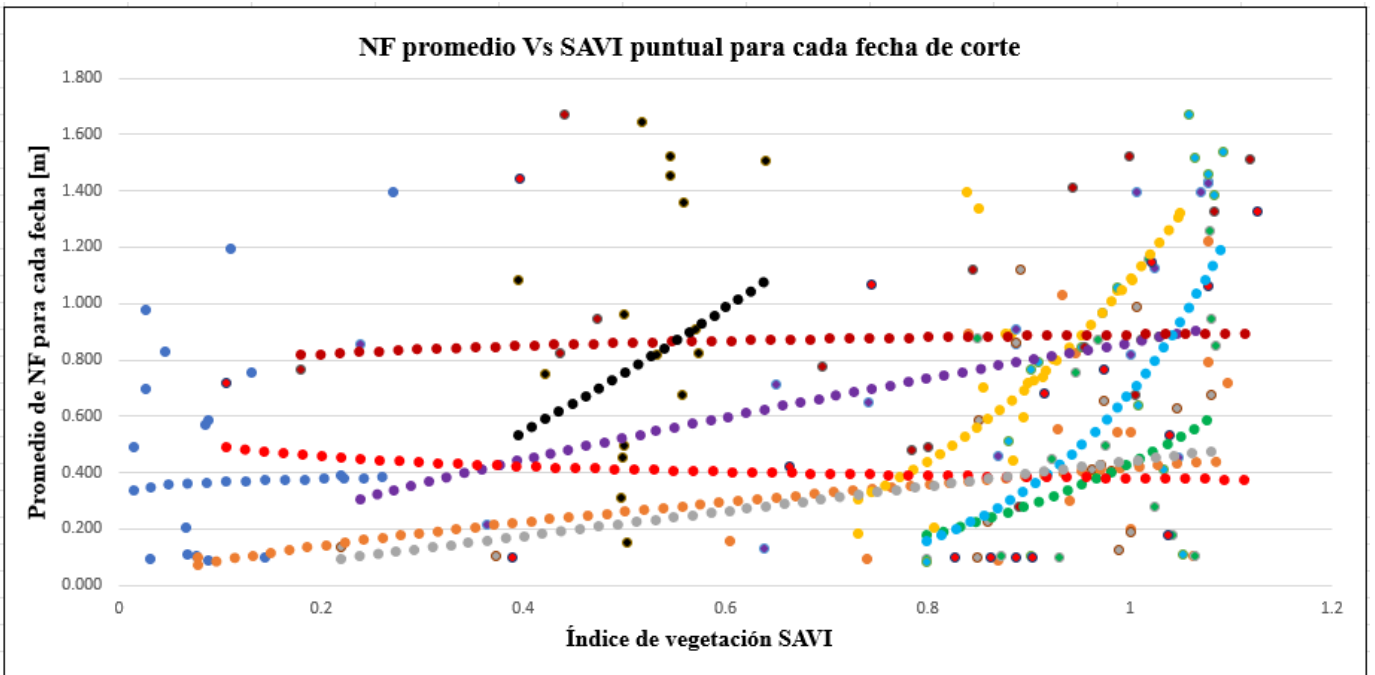


Figura 47. Promedio de NF Vs SAVI (Análisis 1) para cada fecha de corte con sus correspondientes líneas de tendencia.

Anexo 3. Tabla t-Student.

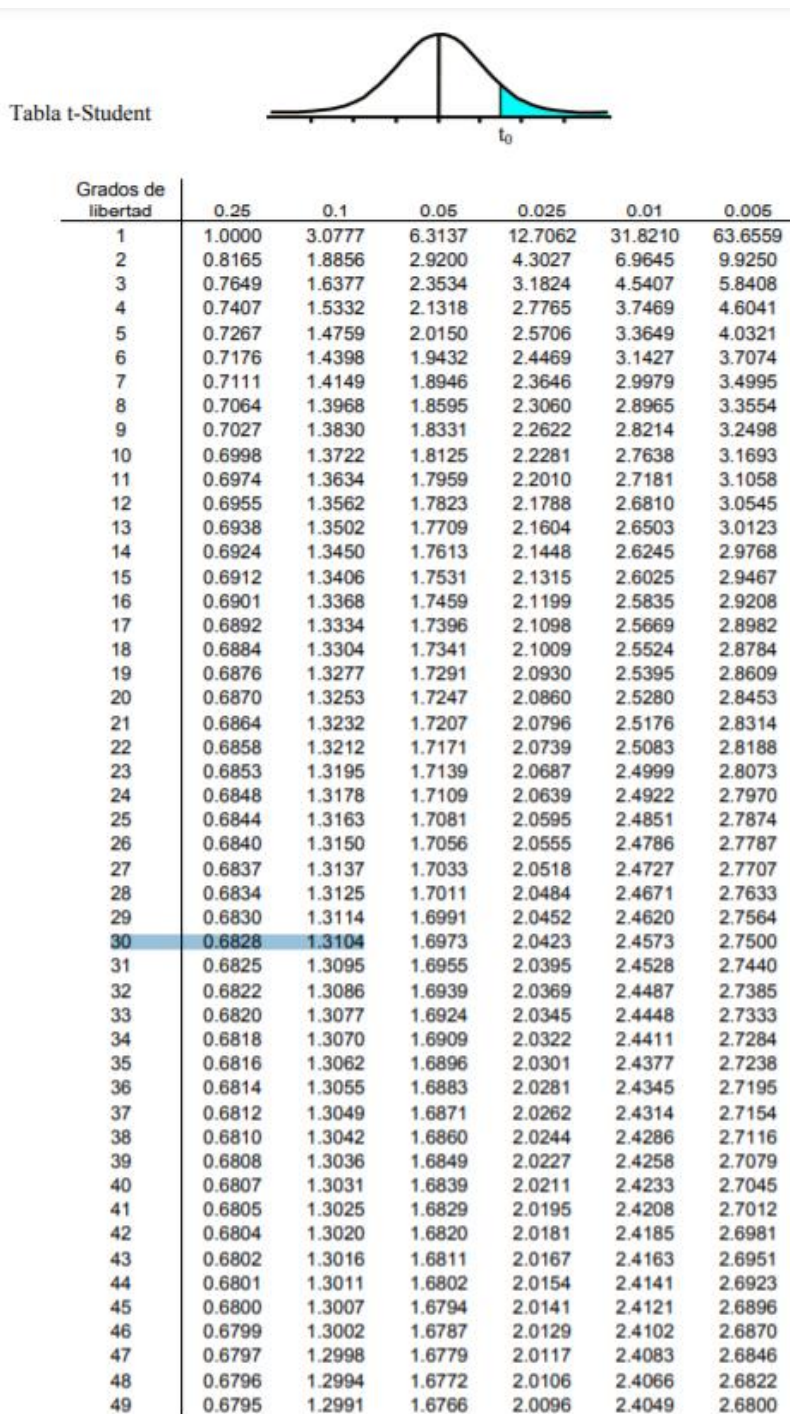


Figura 48. Valores de distribución para prueba T-Student. (Fuente: Universidad de Buenos Aires/Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Matemática, n.d.)

Anexo 4. Promedios de variación obtenidos para las fechas de medición de niveles freáticos en los meses de setiembre y octubre.

Promedio de Variacion (%) Nivel Freático de mediciones en la mañana Finca Sur															
ID Lote	Mediciones Septiembre								Mediciones Octubre						
	7-sep	9-sep	15-sep	17-sep	21-sep	23-sep	29-sep	1-oct	7-oct	13-oct	14-oct	15-oct	25-oct	26-oct	27-oct
1	-5.32%	-5.61%	-5.69%	-7.60%	4.67%	3.70%	-2.33%	-2.41%	2.23%	-6.82%	-8.78%	-6.37%	-2.37%	-2.87%	-2.45%
2	-7.67%	-8.51%	-4.99%	-8.10%	6.54%	4.96%	-2.87%	-3.28%	3.33%	-18.12%	-11.55%	-6.55%	-3.10%	-3.69%	-3.88%
3	-2.09%	-2.68%	-1.93%	-1.99%	2.80%	2.35%	-1.50%	0.00%	1.39%	-9.77%	-4.79%	-2.27%	0.00%	-1.60%	0.00%
4	-8.25%	-8.51%	-14.98%	-13.59%	8.13%	7.27%	-4.86%	-13.12%	7.54%	13.66%	-13.08%	-15.49%	-4.80%	-8.26%	-7.18%
5	-3.10%	-6.41%	-2.71%	-4.44%	2.79%	3.15%	-1.72%	-1.23%	1.59%	-15.87%	-8.05%	-4.17%	-1.45%	-2.05%	-2.56%
6	-5.10%	-6.24%	-7.69%	-9.87%	5.03%	4.83%	-2.75%	-3.19%	-16.33%	-13.57%	-11.58%	-7.50%	-2.97%	-2.74%	-2.56%
7	-5.15%	-4.97%	-3.47%	-4.66%	3.36%	4.23%	-2.63%	-3.42%	3.46%	-12.78%	-4.41%	-5.17%	-3.36%	-5.10%	-5.00%
8	-4.22%	-4.53%	-3.78%	-7.97%	4.49%	3.63%	-2.62%	-1.23%	1.57%	-5.40%	-3.89%	-4.08%	-1.84%	-2.00%	-2.08%
9	-3.59%	-4.39%	-2.58%	-3.59%	4.38%	3.62%	-1.64%	-1.48%	2.07%	-18.60%	-8.67%	-4.05%	-2.20%	-2.02%	-1.83%
10	-15.65%	-14.44%	-12.71%	-14.83%	6.53%	8.11%	-5.78%	-3.60%	11.44%	-12.69%	-19.44%	-16.04%	-3.20%	-5.04%	-15.74%
11	-13.85%	-17.35%	-13.38%	-21.88%	5.01%	4.99%	-2.85%	-6.07%	11.86%	-23.86%	-21.47%	-14.58%	-4.65%	-5.86%	-4.75%
12	-3.51%	-3.35%	-2.18%	-1.95%	2.94%	2.35%	-1.61%	-1.43%	1.66%	-3.17%	-2.25%	-3.03%	-1.36%	-1.71%	-1.84%
13	-4.22%	-3.16%	-3.77%	-2.65%	5.46%	4.51%	-2.11%	-2.60%	2.88%	-4.24%	-2.96%	-2.96%	-2.78%	-2.89%	-3.16%
14	-14.68%	-12.73%	-19.39%	-20.21%	12.44%	8.99%	-9.09%	-19.81%	-11.34%	-8.46%	-16.13%	-13.54%	-13.20%	-17.96%	-27.36%
15	-11.90%	-15.42%	-12.34%	-11.91%	5.50%	5.18%	-3.09%	-2.27%	4.05%	-7.04%	-8.04%	-9.11%	-3.09%	-3.16%	-2.94%
16	-8.98%	-2.79%	-9.95%	-10.16%	8.56%	13.64%	-13.51%	0.00%	3.03%	-18.44%	-22.68%	-15.02%	-6.22%	-8.72%	-20.00%
Total general	-4.59%	-5.17%	-4.30%	-5.50%	4.57%	4.16%	-2.60%	-2.16%	2.16%	-8.61%	-6.71%	-5.40%	-2.59%	-3.32%	-3.18%

Figura 49. Promedio de variación (%) del nivel freático para mediciones en la mañana de Finca Sur.

Promedio de Variacion (%) Nivel Freático de mediciones en la tarde Finca Sur															
ID Lote	Mediciones Septiembre								Mediciones Octubre						
	7-sep	9-sep	15-sep	17-sep	21-sep	23-sep	29-sep	1-oct	7-oct	13-oct	14-oct	15-oct	25-oct	26-oct	27-oct
1	5.32%	5.61%	5.69%	7.60%	-4.67%	-3.70%	2.33%	2.41%	-2.23%	6.82%	8.78%	6.37%	2.37%	2.87%	2.45%
2	7.67%	8.51%	4.99%	8.10%	-6.54%	-4.96%	2.87%	3.28%	-3.33%	18.12%	11.55%	6.55%	3.10%	3.69%	3.87%
3	2.09%	2.68%	1.93%	1.99%	-2.80%	-2.35%	1.50%	0.00%	-1.39%	9.77%	4.79%	2.27%	0.00%	1.60%	0.00%
4	8.25%	8.51%	14.98%	13.59%	-8.13%	-7.27%	4.86%	13.12%	-7.54%	-13.66%	13.08%	15.49%	4.80%	8.26%	7.18%
5	3.10%	6.41%	2.71%	4.44%	-2.79%	-3.15%	1.72%	1.23%	-1.59%	15.87%	8.05%	4.17%	1.45%	2.05%	2.56%
6	5.10%	6.24%	7.69%	9.87%	-5.03%	-4.83%	2.75%	3.19%	16.33%	13.57%	11.58%	7.50%	2.97%	2.74%	2.56%
7	5.15%	4.97%	3.47%	4.66%	-3.36%	-4.23%	2.63%	3.42%	-3.46%	12.78%	4.41%	5.17%	3.36%	5.10%	5.00%
8	4.22%	4.53%	3.78%	7.97%	-4.49%	-3.63%	2.62%	1.23%	-1.57%	5.40%	3.89%	4.08%	1.84%	2.00%	2.08%
9	3.59%	4.39%	2.58%	3.59%	-4.38%	-3.62%	1.64%	1.48%	-2.07%	18.60%	8.67%	4.05%	2.20%	2.02%	1.83%
10	15.65%	14.44%	12.71%	14.83%	-6.53%	-8.11%	5.78%	3.60%	-11.44%	12.69%	19.44%	16.04%	3.20%	5.04%	15.74%
11	13.85%	17.35%	13.38%	21.88%	-5.01%	-4.99%	2.85%	6.07%	-11.86%	23.86%	21.47%	14.58%	4.65%	5.86%	4.75%
12	3.51%	3.35%	2.18%	1.95%	-2.94%	-2.35%	1.61%	1.43%	-1.66%	3.17%	2.25%	3.03%	1.36%	1.71%	1.84%
13	4.22%	3.16%	3.77%	2.65%	-5.46%	-4.51%	2.11%	2.60%	-2.88%	4.24%	2.96%	2.96%	2.78%	2.89%	3.16%
14	14.68%	12.73%	19.39%	20.21%	-12.44%	-8.99%	9.09%	19.81%	11.34%	8.46%	16.13%	13.54%	13.20%	17.96%	27.36%
15	11.90%	15.42%	12.34%	11.91%	-5.50%	-5.18%	3.09%	2.27%	-4.05%	7.04%	8.04%	9.11%	3.09%	3.16%	2.94%
16	8.98%	2.79%	9.95%	10.16%	-8.56%	-13.64%	13.51%	0.00%	-3.03%	18.44%	22.68%	15.02%	6.22%	8.72%	20.00%
Total general	4.59%	5.17%	4.30%	5.50%	-4.57%	-4.16%	2.60%	2.16%	-2.16%	8.61%	6.71%	5.40%	2.59%	3.32%	3.18%

Figura 50. Promedio de variación (%) del nivel freático para mediciones en la tarde de Finca Sur.