UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN Y FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

Mapa de Rendimiento Sistematizado para Agricultura de Precisión aplicado sobre Cultivos de Maíz

Tesis presentada como requisito parcial
para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Información

presenta

Carlos Alberto MARTÍNEZ FÉLIX.

Directores:
Dr. Guadalupe Esteban VAZQUEZ BECERRA.
Dr. Jesús Roberto MILLÁN ALMARAZ.

Culiacán, Sinaloa, México. Agosto de 2017

«Uno, recuerda mirar hacia las estrellas y no abajo hacia tus pies. Dos, nunca renunciar al trabajo. El trabajo te da sentido y propósito y la vida esta vacía sin el. Tres, si tienes la suficiente suerte de encontrar el amor, recuerda que esta allí y no lo lances lejos.»

– Stephen Hawking

Resumen

Cada vez más se hace necesario el uso racional de los insumos agrícolas como lo son: plaguicidas, fertilizantes, enmiendas, semillas, etc; así como también su aprovechamiento exacto, por lo tanto se ha hecho necesario el uso de las tecnologías de la información para resolver o ayudar a mejorar la dosificación variable de fertilizantes nitrogenados sobre parcelas agrícolas que se presentá en la actualidad. Los sistemas aplicados en la *Agricultura de Precisión* involucran tecnologías claves, como son los *Sistemas de Posicionamiento Global* (GPS), la electrónica, entre otros, cuya función es recopilar datos en tiempo real sobre lo que sucede o sucedió en un cultivo agrícola. El presente trabajo de investigación consistió en un análisis y desarrollo técnico-metodológico de un prototipo electrónico aplicado para el monitoreo meteorológico (Humedad y Temperatura) sobre cultivos de *maíz*[1] integrando GPS, *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) y técnicas de percepción remota como los índices de vegetación, entre estos últimos destacan el *Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*, *Indice de Vegetación de Rango Amplio Dinámico (WDRVI)* y el *Indice de Vegetación de Clorofila (CVI)*, para aplicar dichos indicadores de vegetación se obtuvieron imágenes del área de estudio de la plataforma satelital LandSat 8 con una resolución espacial de 30 metros. Los resultados del procesamiento multiespectral de imágenes satelitales generados con una resolución temporal de 30 días contemplando las etapas vegetativas del maíz de la temporada de riego otoño-invierno, se integraron en un SIG en conjunto con la información generada por el prototipo electrónico diseñado y ensamblado para uso agrícola, este prototipo incorpora un modulo GPS con una precisión espacial de $\sim 5m$, y un sensor de humedad y temperatura, además mantiene comunicación serial inalámbrica mediante bluetooth con un smartphone compatible con Android, para lo cual se diseño y desarrollo una aplicación móvil para guardar la información recibida por el prototipo electrónico para su posterior procesamiento. El resultado de integrar la información *insitu* con un SIG fue la obtención de un mapa de humedad y temperatura mediante técnicas de interpolación el cual, ademas, contiene zonas de interés georeferenciadas con coordenadas de latitud y longitud. Estos mapas en conjunto con el procesamiento multiespectral de imágenes permitió monitorear el comportamiento y la salud vegetal del cultivo de maíz en etapas tempranas de crecimiento (V12) el cual permitirá al agricultor aplicar dosis variables de fertilizantes nitrogenados repercutiendo favorablemente en el rendimiento final del cultivo.

[1]El maíz es el principal producto agrícola del estado de Sinaloa, con una producción anual de 5 millones de toneladas aproximadamente.

Agradecimientos

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (*CONACyT*) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de maestría.
- Al Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra por su apoyo, estímulo, enseñanza y confianza brindada. Por su amistad y gran calidad humana.
- Al Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz por su amistad, comentarios y conocimientos que ayudaron a mejorar las ideas de esta investigación.
- A la Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado por su confianza, amistad y colaboración otorgada.
- Al Dr. Arturo Yee Rendón por su confianza, amistad y motivación en la superación profesional.
- Al Dr. Inés Fernando Vega López un excelente científico, por su aceptación y motivación a seguir estudiando.
- Al Dr. Juan Martín Aguilar Villegas por su sociabilidad y apoyo en la construcción de esta tesis.
- A mis amigos de estudios que juntos compartimos experiencias: Angela Melgarejo, Edgar Lao, Martín Carrillo, Michel Guzmán, Luis Dario, Juan Campos, Lizbeth Zamudio, Yedid Zambrano y Rosario Acuña.

Para mi querida madre Lucía Félix por su apoyo incondicional durante mi proceso de formación como mejor ser humano y…para mi novia Angela Melgarejo por su correspondencia y los momentos felices que me ha regalado desde que la conocí.

Índice general

Resumen II

Agradecimientos III

1. Introducción 1
1.1. Planteamiento del Problema 2
1.2. Objetivos 3
1.3. Agricultura de Precisión 3
1.3.1. Definición de Agricultura de Precisión 4
1.3.2. Agricultura de Precisión en México 4
1.3.3. Ventajas y Desventajas de la Agricultura de Precisión 5
1.4. Agricultura en Sinaloa 5
1.4.1. Ubicación, accesibilidad y comunicaciones de Sinaloa 5
1.4.2. Condiciones físicas naturales de Sinaloa 6
1.4.3. Datos Agrícolas en Sinaloa 6
1.4.4. Panorama Actual de Sinaloa en la Agricultura 7

2. Marco Teórico 8
2.1. Sistemas de Posicionamiento Global 8
2.1.1. Segmento Espacial 8
2.1.2. Segmento de Control 9
2.1.3. Segmento de Usuario 9
2.1.4. Medición de la Distancia 9
2.1.5. Fuentes de Error en el GPS 10
2.1.6. Corrección Diferencial 10
2.1.7. Dilución o Pérdida de la Precisión Posicional 11
2.1.8. Factores Ambientales 11
2.1.9. GPS y Agricultura de Precisión 11
2.2. Percepción Remota 12
2.2.1. Sensores 12
2.2.2. Principio Físico de la Percepción Remota 13
2.2.3. El Espectro Electromagnético 15
2.2.4. Conceptos Básicos de Percepción Remota 15
2.2.5. Firmas Espectrales 17
2.2.6. Interacción de la Vegetación en el Espectro Electromagnético 19
2.2.7. Indices de Vegetación 22
2.3. Sistemas de Información Geográfica 25
2.3.1. Representación de los Datos SIG 26
2.3.2. Uso de los SIG para la Producción Agrícola 28
2.4. Mapas de Rendimiento 29
2.4.1. Beneficios Económicos de los Mapas de Rendimiento 31
2.4.2. Variabilidad de los Mapas de Rendimiento 31

2.5. La Planta de Maíz 32
2.5.1. Características Generales de la Planta 33
2.5.2. Etapas de Crecimiento del Maíz 33
2.5.3. Fertilización 36
2.5.4. Requerimientos Climáticos 38
2.6. Electrónica en Agricultura de Precisión 38
2.6.1. Comunicación Serial 39
2.6.2. App Inventor 2 40

3. Materiales y Métodos 43
3.1. Delimitación del Polígono 44
3.1.1. Área de Estudio 45
3.1.2. Banderilleo Satélital 46
3.1.3. Procesamiento de las Mediciones GPS 47
3.2. Prototipo Electrónico 54
3.2.1. Arduino UNO 54
3.2.2. Entorno de Programación para Arduino 56
3.2.3. Modulo Bluetooth JY-MCU 57
3.2.4. Sensor de Humedad y Temperatura SHT-31 59
3.2.5. Módulo GPS SKM-53 61
3.2.6. Diseño del Circuito Electrónico 64
3.2.7. Diseño del Circuito Impreso 66
3.2.8. Programación del Arduino 68
3.3. Aplicación Móvil 70
3.3.1. Entorno de Diseño para App Inventor 2 70
3.3.2. Entorno de Programación para App Inventor 2 72
3.4. Procesamiento de las Imágenes Satelitales 75
3.4.1. Imágenes Satelitales LandSat 75
3.4.2. Calibración Radiométrica y Corrección Atmosférica . 78
3.4.3. Cálculo de los Indices de Vegetación 81
3.4.4. Cálculo del Indice de Área Foliar 83
3.5. Procesamiento de los Datos del Prototipo Electrónico 85

4. Resultado y Análisis 88
4.1. Banderilleo Satélital del Área de Estudio 88
4.1.1. Resultado de las Mediciones GPS 88
4.2. Desarrollo del Prototipo Electrónico 90
4.2.1. Fabricación del Prototipo Electrónico 90
4.2.2. Desarrollo de la Aplicación Móvil 93
4.3. Análisis Multiespectral de las Imágenes Satelitales 96
4.4. Análisis Estadístico y Validación de Resultados 105

5. Conclusiones 119

A. Anexos 121
A.1. Costos de Fertilizantes y Tecnologías para Agricultura Moderna 121
A.2. Estadísticas del Estudio Temporal 122
A.3. Programa para Arduino 123
A.4. Programa para Procesar los Datos del Prototipo Electrónico 126
A.5. Código de App Inventor para la Aplicación Móvil 127

Bibliografía **129**

Índice de figuras

2.1. Onda Electromagnética propuesta por (Huygens y Maxwell). 14
2.2. Espectro Electromagnético (Freedman y Zemansky, 2009). . 16
2.3. Relación entre flujo incidente y reflejado (Chuvieco, 1995). . 17
2.4. Firmas Espectrales mas comunes (Chuvieco, 1995). 18
2.5. Superficies especulares y lambertianas (Chuvieco, 1995). . . 19
2.6. Firma Espectral que presenta la vegetación con buen estado de salud (http://s438316481.onlinehome.us). 20
2.7. Fundamento Espectral en los que se basan los Indices de Vegetación (https://giulliana-mv.blogspot.mx/2016/). 22
2.8. Capas que integran un Sistema de Información Geográfica (https://www.nationalgeographic.org/). 26
2.9. Modelo Raster de Datos (http://desktop.arcgis.com). 27
2.10. Modelo Vectorial de Datos (http://desktop.arcgis.com). . . . 28
2.11. Ejemplo de un Mapa de Rendimiento (Bragachini y Mendez, 2006). 30
2.12. Etapas Fenológicas VE y V1 (http://www.perezcastro.es). . 34
2.13. Etapas Fenológicas V2, V3 . . . Vn (http://www.perezcastro.es). 35
2.14. Etapas Fenológicas VT, R0 y R1 (http://www.perezcastro.es). 35
2.15. Etapas Fenológicas R2, R3 . . . R6 (http://www.perezcastro.es). 36
2.16. Diagrama de Comunicación Serial (http://www.dtic.upf.edu). 40
2.17. Interfaz de Diseño (ai2.appinventor.mit.edu/). 41
2.18. Interfaz de Programación (ai2.appinventor.mit.edu/). 42

3.1. Esquema Metodológico. 44
3.2. Imagen Satélital del Área de Estudio (Cortesía de Google Earth). 45
3.3. Estación Base GPS. 47
3.4. Estación Móvil GPS. 47
3.5. Ventana Principal TopCon Tools. 48
3.6. Ventana Configuración TopCon Tools. 48
3.7. Ventana de Control de Calidad TopCon Tools. 49
3.8. Lista de Tipos de Archivos Reconocibles por TopCon Tools. . 50
3.9. Vista Tabular que muestra información detallada de las mediciones GPS. 50
3.10. Vista de Mapa que muestra información gráfica de las mediciones GPS. 51
3.11. Menu de Procesamiento de Datos. 51
3.12. Ventana Principal UNERINEX. 52
3.13. Diagnóstico del Ajuste. 53
3.14. Resultado del Ajuste. 53
3.15. Arduino UNO. 54
3.16. Pines de Comunicación Serial. 56
3.17. Interfaz de Programación 57

3.18. Modulo JY-MCU. 59
3.19. Sensor SHT-31. 60
3.20. Diagrama de Funcionamiento del Sensor. 61
3.21. Modulo GPS SKM-53. 62
3.22. Diseño del Circuito Electrónico. 64
3.23. Diseño Mecánico del Shield. 66
3.24. Shield para Arduino. 67
3.25. Diseño de la Aplicación Móvil 71
3.26. Flujo de la Corrección de Imágenes Satelitales. 79
3.27. Calibración Radiométrica ENVI. 80
3.28. Corrección Atmosférica ENVI. 81
3.29. Álgebra de Bandas en ENVI. 82
3.30. Calculo del NDVI. 82
3.31. Vecindad de IDW del punto seleccionado (Manual de ArcGIS). 86

4.1. Resultado del Ajuste de las Mediciones. 89
4.2. Polígono del Área de Estudio utilizando DGPS. 89
4.3. Prototipo en fase de pruebas. 90
4.4. Shield o PCB del Prototipo. 91
4.5. Prototipo con Módulos Instalados. 92
4.6. Prototipo Electrónico Etapa Final. 93
4.7. Aplicación Móvil etapa Final. 94
4.8. Archivo con la Información. 95
4.9. Archivo con la Información Procesada. 95
4.10. Resultado del análisis multiespectral para Diciembre. 96
4.11. Mapas de Humedad y Temperatura para Diciembre. 97
4.12. Suelo del Área de Estudio durante el mes de Diciembre. . . . 98
4.13. Resultado del análisis multiespectral para Enero. 98
4.14. Mapas de Humedad y Temperatura para Enero. 99
4.15. Vegetación del Área de Estudio durante el mes de Enero. . . 100
4.16. Resultado del análisis multiespectral para Febrero. 101
4.17. Mapas de Humedad y Temperatura para Febrero. 102
4.18. Vegetación del Área de Estudio durante el mes de Febrero. . 103
4.19. Resultado del análisis multiespectral para Marzo. 103
4.20. Resultado del análisis multiespectral para Mayo. 104
4.21. Análisis de Regresión Humedad y Temperatura. 106
4.22. Análisis de Regresión NDVI y Humedad. 107
4.23. Análisis de Regresión NDVI y Temperatura. 108
4.24. Análisis de Regresión WDRVI y Humedad. 109
4.25. Análisis de Regresión WDRVI y Temperatura. 110
4.26. Análisis de Regresión CVI y Humedad. 111
4.27. Análisis de Regresión CVI y Temperatura. 112
4.28. Análisis de Regresión NDVI y CVI. 113
4.29. Análisis de Regresión WDRVI y CVI. 114
4.30. Análisis de Regresión IAF y CVI. 115
4.31. Mapa de rendimiento estimado para el cultivo de maíz. . . . 116
4.32. Gráfica del desarrollo de la calidad de la vegetación para el cultivo de maíz durante el ciclo de siembra y cosecha otoño - invierno 2017. 117
4.33. Puntos de Control e información generados por el prototipo cargados en Google Earth. 118

A.1. Programa Parte 1. 128
A.2. Programa Parte 2. 128

Índice de tablas

2.1. Tipos de Variabilidad (Mantovani y Magdalena, 2014). . . . 31
2.2. Etapas Fenológicas del Maíz. 34
2.3. Periodos de Crecimiento. 35
2.4. Cantidades Optimas de Fertilización. 36
2.5. Fertilizantes de Cobertura. 37

3.1. Características GeoMax Zenith 25 (Internet). 46
3.2. Especificaciones Técnicas de Arduino UNO. 55
3.3. Pines Modulo JY-MCU. 59
3.4. Características del Sensor SHT-31. 60
3.5. Pines del sensor SHT-31. 61
3.6. Pines del Modulo GPS. 62
3.7. Características del Modulo GPS. 63
3.8. Conexión módulo bluetooth JY-MCU. 65
3.9. Conexión modulo GPS SKM53. 65
3.10. Conexión sensor SHT31. 65
3.11. Características LandSat 8. 76
3.12. Ecuaciones introducidas al software ENVI 5.3. 83

4.1. Coordenadas Geográficas del Polígono 90
4.2. Cálculo económico del rendimiento estimado para el cultivo de maíz. 117

A.1. Precios Fertilizantes Agrícolas (MXN). 121
A.2. Comparación de Costos de Tecnologías para Agricultura de Precisión en México vs el prototipo electrónico (Fecha de Cotización de Costos: 09/05/2017. 121
A.3. Estadísticas de Diciembre. 122
A.4. Estadísticas de Enero. 122
A.5. Estadísticas de Febrero. 122
A.6. Estadísticas de Marzo. 122
A.7. Estadísticas de Mayo. 123

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día la tecnología ha alcanzado un nivel que le permite al productor agrícola medir, analizar, y manejar la variabilidad de insumos agrícolas dentro de las parcelas que era conocida previamente pero que no se podía manejar. La habilidad de manejar variaciones en la productividad dentro de la parcela y maximizar los rendimientos han sido siempre los deseos de los productores, especialmente de aquellos con limitación en el recurso del suelo. Por lo que es factible desarrollar una tecnología, mediante un mapa de rendimiento capaz de ofrecer resultados óptimos en la agricultura en general a un bajo costo comparado con otras tecnologías del mercado, esto, con el fin de optimizar el uso de fertilizantes para evitar contaminación e incrementar los beneficios económicos, además de un análisis de la salud del cultivo mediante imágenes satélitales.

Así mismo, en México, algunos agricultores tienen la tecnología para aprovechar sus recursos agrícolas, ya que el costo de adquirir estas tecnologías agrícolas que proporcionan información sobre el estado de salud del cultivo es relativamente alto, por lo que los beneficios que puede proporcionar no están al alcance de la mayoría de los agricultores. A medida que pasa el tiempo, algunos insumos agrícolas como productos químicos, fertilizantes o soluciones para el control de plagas y semillas se encarecen, esto impacta en la economía del agricultor, por lo tanto, el costo del producto final está aumentando cada año. Además, el uso excesivo de fertilizantes o productos químicos tiene consecuencias graves en la agricultura, ya que la contaminación por nitratos (Rivera y Gavi, 2002) afecta la fertilidad del suelo deshabilitando grandes hectáreas de tierra destinadas para la agricultura y requieren del uso de productos químicos para la rehabilitacion del suelo a largo plazo y muy caros.

Actualmente, existen tratamientos para recuperar el estado químico óptimo del suelo para la agricultura, de igual modo, estos excesos de fertilizantes pueden llegar al manto acuífero contaminando el agua subterránea a través de un proceso llamado lixiviación de nitratos. Hoy en día la tecnología ha sido capaz de incursionar en el campo de la agricultura de diversas maneras, por ejemplo, con técnicas de percepción remota es posible monitorear el cambio en la salud o vigor vegetal en el cultivo (Maresma y Ariza, 2016), permitiendo al agricultor obtener la información necesaria para tomar decisiones en etapas críticas de crecimiento para que el cultivo tenga un desarrollo saludable y consecuentemente se obtenga un alto rendimiento al final de la temporada.

Estas técnicas para obtener información en conjunto con otros tipos de tecnologías (Albarenque y Velez, 2011) están ayudando lentamente a que la

agricultura de precisión se este adoptando en México, ya que se ha demostrado en otros países los beneficios que esto puede otorgar (Martini y Bianchini, 1999; García y Flego, 2014; Albarenque y Velez, 2011), esto está llevando a los agricultores del país a optar por nuevas tecnologías para optimizar los procesos de siembra y cosecha de sus productos para reducir costos y al mismo tiempo obtener productos de mejor calidad. La agricultura de precisión implica la capacidad de recolectar, interpretar y aplicar insumos agrícolas en función de los datos recopilados sobre el terreno, transformando estos datos o información en conocimiento y rentabilidad. Estos sistemas no sólo permiten un manejo agronómico más eficiente, sino que también aumentan la precisión del trabajo y la eficiencia del equipo. Todo esto parece traer grandes ventajas a la agricultura moderna, sin embargo, todavía es necesario desarrollar nuevos métodos y tecnología para que la información que proporciona sea cada vez más precisa y rentable.

1.1. Planteamiento del Problema

Actualmente existen en el mercado diversas tecnologías que facilitan el análisis de la salud vegetal de los cultivos, tal es el caso del *GreenSeeker*, el cual es un dispositivo de mano que incorpora un sensor óptico activo que captura la reflectancia de la vegetación en distintas bandas del espectro electromagnético para determinar la salud vegetal del cultivo en etapas vegetativas tempranas mediante indices de vegetación como el *Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*, lo cual permite la dosificación variable de fertilizantes nitrogenados en la parcela agrícola.

Sin embargo, esta tecnología es relativamente nueva por lo que será necesaria la capacitación del agricultor para el uso de la misma, además, se ha demostrado que el uso de este dispositivo en particular mejora considerablemente la dosificación del uso de fertilizantes nitrogenados, especialmente para el cultivo de maíz, por lo que esta tecnología podría ser adoptada por mas agricultores en los próximos años, sin embargo, este dispositivo tiene una limitación debido a su sensor activo que emite luz en la longitud roja e infrarroja del espectro electromagnético, su resolución espectral se encuentra limitada por lo que solo se pueden calcular muy pocos indices de vegetación, de ahí, el hecho de que sólo utiliza el NDVI.

Además, actualmente con el uso frecuente de drones aéreos tales como cuadricopteros y octocopteros, así como vehículos aéreos no tripulados (UAV) están siendo cada vez más utilizados para el campo de la agricultura en México, en donde existen empresas que ofrecen servicios para el monitoreo de la vegetación las cuales usan drones que cuentan con cámaras de mayor resolución espectral permitiendo realizar análisis mas robustos, por lo tanto estos servicios son cada vez más contratados por los agricultores, sin embargo debido al costo de estos servicios solo están siendo aprovechados por muy pocos agricultores, dejando a la mayoría de ellos sin la tecnología capaz de mejorar la producción que tendrá su parcela al final del ciclo de cosecha.

La diferencia de esta investigación con respecto a otras tecnologías del mercado como el GreenSeeker radica principalmente en las técnicas de percepción remota, ya que se utilizaron más índices de vegetación para realizar

un análisis más robusto del estado de salud del cultivo, donde se ha demostrado en otras investigaciones (Maresma y Ariza, 2016; Maresma y Ariza, 2016; Gitelson y Merzlyak, 1994; Kemerer y Bella, 2007; Vincini y Frazzi, 2011; Broge y LeBlanc, 2001), el uso de otros índices de vegetación además del NDVI para detectar problemas en el cultivo de maíz en etapas tempranas de crecimiento, usualmente en la etapa vegetativa V12 y menor, índices como el *Indice de Vegetación de Rango Amplio Dinámico (WDRVI)* el cual es una variación del NDVI y el *Indice de Vegetación de Clorofila (CVI)* cuyo objetivo es detectar el contenido relativo de clorofila presente en la vegetación.

1.2. Objetivos

Objetivo General:

- Desarrollar un mapa de rendimiento para un campo agrícola así como un dispositivo electrónico para la captura en tiempo real de los datos obtenidos del área de estudio mediante SIG, GPS y la aplicación de índices de vegetación tales como el NDVI, WDRVI y CVI.

Objetivos Específicos:

- Obtención e integración de la georeferencia de la parcela con mediciones GPS para la generación del mapa de rendimiento.
- Realizar un dispositivo electrónico que sea capaz de sensar la temperatura y humedad del área de estudio además de transmitir los datos a una aplicación de teléfono móvil o celular.
- Diseñar y programar una aplicación para Android para recibir los datos enviados por el dispositivo electrónico y almacenarlos para su posterior consulta.
- Analizar y procesar imágenes satélitales de la zona de estudio para realizar un mapa que muestre la salud vegetal del campo agrícola en distintos puntos de interés.

1.3. Agricultura de Precisión

La Agricultura de Precisión se concibió desde Estados Unidos de América (USA) como un circulo que se retroalimentaba año a año y donde el único objetivo culminaba con la realización de dosis variable de insumos, es decir, que se incorporo la idea de utilizar la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad natural y/o inducida presente dentro del lote (García y Flego, 2014).

Dentro de esta tecnología se cuenta con herramientas claves dentro del sistema, como lo son el *GPS*, la percepción remota y la electrónica, medios para recopilar datos en un *GIS* en tiempo real sobre lo que sucede o sucedió en un cultivo.

Antes de contar con herramientas para implementar la agricultura de precisión, se consideraban los lotes como una unidad productiva, tomando datos promedio de productividad y de características físicas y químicas

del suelo, tratando grandes áreas de la misma manera, el productor pasaba menos tiempo en el campo y cubría mas hectáreas por día.

Hoy en día la tecnología ha alcanzado un nivel que le permite al productor medir, analizar, y manejar la dosificación variable de insumos dentro de las parcelas agrícolas lo cual años antes era una tarea muy difícil de realizar. La habilidad de manejar variaciones en la productividad dentro de la parcela y maximizar los rendimientos han sido siempre los deseos de los productores, especialmente de aquellos con limitaciones en el recurso del suelo.

1.3.1. Definición de Agricultura de Precisión

El concepto sobre el que se basa la agricultura de precisión es aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar exacto. Es el uso de la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente dentro de un lote. Las tecnologías de la agricultura de precisión permiten satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones. Se presenta como principal ventaja que el análisis de resultados de los ensayos se puede realizar por sectores diferentes dentro de un mismo lote, y de esta manera ajustar el manejo diferencial dentro de los mismos. Por ejemplo, los rendimientos de dos cultivos pueden ser idénticos si se usan los promedios, pero diametralmente opuestos en una situación de loma y en una de superficie baja en un determinado lote, este dato solo podrá obtenerse mediante la realización de un mapa de rendimiento. Del mismo modo , podrán analizarse, el tipo y la dosis de fertilizante a aplicar, la densidad de semilla, la fecha de siembra, el espaciamiento entre hileras, etc. El uso de las tecnologías de la agricultura de precisión puede ayudar a mejorar los márgenes, a través de un aumento del valor del rendimiento *(cantidad o calidad)*, de una reducción en la cantidad de insumos, o de ambos simultáneamente.

1.3.2. Agricultura de Precisión en México

Si bien es cierto que la importancia de la sostenibilidad en la agricultura está creciendo en México ya que el sector está sujeto al incremento de los gastos de producción, la fluctuación de los gastos y/o precios del producto y los requerimientos de la seguridad alimentaria, así como la demanda de los consumidores por productos de mejor calidad y más sanos. Hacer frente a este reto requiere de las empresas agrícolas reducir los gastos, incrementar la producción y volverse más efectivas. En México la agricultura de precisión esta tomando cada vez mas auge ya que los costos de los insumos[1] agrícolas se van incrementando con el paso del tiempo, esto esta llevando a los agricultores del país a optar por nuevas tecnologías modernas para optimizar los procesos de siembra y cosecha de sus productos para reducir los costos y al mismo tiempo ofrecer productos de mejor calidad. Sin embargo, estas tecnologías actualmente son muy costosas y solo aquellos productores con grandes ingresos económicos pueden aplicarlas.

[1] Fertilizantes, Semillas, Composta, Maquinaria, Combustible y Agua entre otros.

1.3.3. Ventajas y Desventajas de la Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión proporciona la capacidad de recopilar, interpretar y aplicar información especifica de las parcelas, transformando datos e información en conocimiento y rentabilidad. Estos sistemas no solo posibilitan una gestión gastronómica mas eficaz, sino que además permiten aumentar la precisión de las labores y la eficiencia de los equipos (García y Flego, 2014). Todo esto parece traer grandes ventajas a la agricultura moderna, sin embargo, también existen factores que desfavorecen la adopción de esta tecnología en México como se muestra a continuación:

–Factores que favorecen la adopción:

- Gestión optimizada de las explotaciones.
- Reducción de la aplicación de pesticidas y fertilizantes.
- Menor impacto medioambiental.
- Productos con mayor valor nutritivo.
- Obtención de información mas precisa y de trazabilidad, muy importante en las zonas con carencias de nitrógeno.

–Factores que desfavorecen la adopción:

- No es factible para todos los agricultores, es mas probable que se limite a los que tengan una escala grande de producción.
- El costo de los equipos es percibido por los agricultores como alto, sin que estos analicen sus ventajas.
- Problemas de integración con la maquinaria existente.
- Se requiere capacitación para la implantación de los sistemas.
- Poca cultura de innovación en el sector.
- Resistencia en el sector a pagar por información.

1.4. Agricultura en Sinaloa

Sinaloa es un estado de contrastes, cambios y paradojas, desde la diversidad de climas y paisajes, a su evolución histórica y la riqueza de culturas. Esta condición multifacética probablemente ha propiciado el liderazgo de esta región que ostenta la primera posición en producción alimentaria en México. De hecho su capital, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional.

1.4.1. Ubicación, accesibilidad y comunicaciones de Sinaloa

El estado de Sinaloa abarca una superficie de 58,328 km^2 ubicados en el noroeste de México, colindando al norte con Sonora y Chihuahua; al sur con Nayarit y el océano Pacífico; al este con Chihuahua, Durango y Nayarit, y al oeste con el Golfo de California.

Sinaloa tiene acceso por aire, tierra o mar, y salida hacia el océano, la Península de Baja California, a la Sierra Tarahumara o al desierto. Cuenta con 1,195 km de vías férreas, cuatro aeropuertos, tres de ellos internacionales, y dos puertos importantes (Mazatlán y Topolobampo) con potencial para manejar cargas pesadas a Estados Unidos y Asia.

1.4.2. Condiciones físicas naturales de Sinaloa

El clima predominante en el estado de Sinaloa es cálido subhúmedo, pero en total se presentan nada menos que 15 tipos de climas, desde cálidos a semifríos, registrando una temperatura media anual de 25^oC y una precipitación pluvial promedio de 830 mm. El estado se encuentra dividido en tres grandes zonas (montañosa, pie de sierra y llanura costera), los tipos de suelo predominantes son regesol, vertisol, litosol y feozem haplico. En cuanto a disponibilidad de agua, Sinaloa abarca dos regiones hidrológicas llamadas Sinaloa y Presidio San Pedro. Los escurrimientos superficiales de las sierras de Chihuahua y Durango y la distribución de los volúmenes de agua de los ríos a lo largo del estado definen la hidrografía en Sinaloa. El escurrimiento medio anual es 17,704 millones de metros cúbicos, en una área de cuencas de 92,013 km^2, seis de las cuales cuentan con sistemas para la generación de energía eléctrica. El estado de las cuencas en cuanto a disponibilidad es variado con el 40 % en déficit, el 40 % en abundancia y el 20 % en equilibrio. Con respecto a aguas subterráneas, se han identificado 13 acuíferos, subexplotados, clasificados como costeros, que generan una recarga anual de 1,137 millones de metros cúbicos. En total, en el estado de Sinaloa existe una disponibilidad de 487 millones de metros cúbicos de agua en la entidad, producto de la diferencia entre la recarga total de los 13 acuíferos y la extracción.

1.4.3. Datos Agrícolas en Sinaloa

Las zonas agrícolas constituyen el 33.63 % de la superficie estatal con un total de 1,269,627 hectáreas cultivadas en 2015 de las cuales 41 % cuenta con infraestructura de riego y el 59 % restante es agricultura de temporal (Reho, 2015).

La agricultura de riego se localiza principalmente del centro al norte del Estado en los municipios de Ahome, El Fuerte, Guasave, Angostura, Navolato, Culiacán y Elota; mientras que la agricultura de temporal se localiza principalmente en la franja comprendida entre Sierra Madre y la costa, en la región centro-norte en los municipios de Culiacán, Elota, Mocorito y Sinaloa.

En Sinaloa se practica la agricultura más tecnificada del país, lo que le permite lograr una gran productividad. Entre los principales productos agrícolas destacan pepino, tomate, calabaza, berenjena, chile, legumbres, mango, melón, sandía, maíz, fríjol, soya, cártamo, trigo, papa y sorgo (Reho, 2015).

1.4.4. Panorama Actual de Sinaloa en la Agricultura

Sinaloa es el líder nacional en la producción de alimentos, empleando a más de 165 mil personas en dicho sector. La cercanía al mercado de Estados Unidos, así como la experiencia e instrumentación tecnológica en la industria alimentaria, propician el desarrollo de Sinaloa. Este Estado se caracteriza por la producción y procesamiento de alimentos con extraordinaria calidad. Esto hace factible la instalación de industrias manufactureras de clase mundial.

La industria manufacturera se compone de pequeñas y medianas empresas, cuya actividad se orienta al procesamiento de productos primarios. En el rubro agroalimentario destacan las industrias empacadoras de alimentos, congeladoras y procesadoras de vegetales, ingenios azucareros, y embotelladoras.

Sinaloa ofrece a los inversionistas la capacidad logística, el prospecto de producción y una plataforma humana para hacer negocios en los mercados de alimentos procesados, industria automotriz y tecnologías de información y comunicación por mencionar algunos, de acuerdo con (Sinaloa en Cifras, SAGARPA) algunos datos interesantes sobre la agricultura en Sinaloa son los siguientes:

- Agricultura mas tecnificada de México, lo que le permite lograr una gran productividad.
- Numero uno en producción de tomate, Chile morrón y pepino.
- 38 % de la producción de hortalizas del país.
- Primer lugar nacional en producción de granos.
- Primer lugar en maíz blanco con producción superior a 5 millones de toneladas, con lo que puede abastecer hasta 8 meses del año a la industria nacional de la tortilla.
- Siete de cada diez tortillas de maíz consumidas en México, se elaboran con maíz producido en Sinaloa.
- Expo Agro Sinaloa es la segunda mas grande de Latinoamérica y una de las principales de México
- Cuenta con la procesadora de frutas mas grande de Latinoamérica, con capacidad para procesar 450 toneladas de mango por día.
- Con 64 empresas socialmente responsables, el 12 % a nivel nacional, ocupa el segundo lugar del país en este rubro.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Sistemas de Posicionamiento Global

En la década de 1980 la armada de los Estados Unidos de América (USA) puso en funcionamiento un sistema de navegación basado en las emisiones de un reducido grupo de satélites, este sistema llamado TRANSIT fue el antecedente del actual GPS. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) por sus siglas en inglés, es un sistema de radio-navegación basado en satélites, creado y operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el cual fue declarado completamente operacional el 27 de Abril de 1995 (Martini y Bianchini, 1999). El sistema fue concebido originalmente como un auxiliar para la navegación para las fuerzas militares de los Estados Unidos, pero hoy en día el GPS sirve también para fines industriales, comerciales y civiles. El servicio está disponible, en forma gratuita, las 24 horas del día y bajo cualquier condición meteorológica, para describir mejor el sistema se lo puede dividir en tres partes principales:

- Segmento Espacial.
- Segmento de Control.
- Segmento de Usuario.

A continuación se procederá a describir detalladamente los segmentos principales del GPS.

2.1.1. Segmento Espacial

Este segmento consiste de una constelación de 24 satélites NAVSTAR con una órbita de 20,200 km de altura sobre la superficie terrestre, cada satélite órbita la tierra 2 veces al día, o sea una vez cada 12 horas. Los 24 satélites se dividen en 6 órbitas con 4 satélites cada una. Esta distribución particular garantiza que por lo menos 4 satélites estarán en línea de vista de un receptor de GPS en cualquier parte del mundo durante todo el día (Hofmann y Lichtenegger, 1997). Por supuesto que no se pueden ver los satélites en su órbita, pero los receptores deben ser capaces de dar seguimiento a la señal satélital enviada a la tierra, los satélites cuya señal puede ser recibida son aquellos que están por sobre el horizonte.

Cada satélite esta equipado con emisores de ondas de radio que transmiten con una frecuencia de entre 1200-1500 MHz. Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000.000 m/s) en el vacío, y disminuyen su velocidad cuando atraviesan la atmósfera terrestre. Los satélites también están equipados con relojes atómicos, que mantienen el tiempo en base a

vibraciones naturales periódicas dentro de los átomos. Estos relojes increíblemente precisos son un componente crítico que hacen posible el uso de satélites para navegación y mapeo. Cada satélite cuenta con cuatro relojes, 2 de cesio y 2 de rubidio, a pesar de que uno sería suficiente, de esta forma se evita el riesgo de rotura o pérdida de precisión por alguno de los relojes.

2.1.2. Segmento de Control

Los satélites son seguidos y monitoreados por varias estaciones ubicadas estratégicamente alrededor del mundo. Esta red de estaciones de monitoreo se denomina generalmente segmento de control del GPS, y consta de 4 estaciones de monitoreo y una estación de control principal ubicada en la Base de la Fuerza Aérea Falcon en Colorado Springs, Colorado. Las estaciones de monitoreo miden las señales de ondas de radio que son transmitidas continuamente por los satélites y pasan esa información a la estación de control principal. Ésta usa la información para determinar la órbita exacta de los satélites y para ajustar sus señales de navegación, por ejemplo: error de reloj, correcciones, estado del satélite, etc.

2.1.3. Segmento de Usuario

Las unidades o receptores GPS son el segmento de usuario, que determinan la posición del usuario por medio de las señales recibidas. Los GPS de uso civil no requieren licencia para operar ya que no transmiten señales de radio, solamente las reciben. Hay una gran gama de receptores con distintas precisiones y por ende precio, cada uno se adapta a un uso en particular.

2.1.4. Medición de la Distancia

El principio básico de la medición de la distancia es el principio de "velocidad por tiempo". El sistema GPS funciona tomando el tiempo que tarda una señal de radio emitida por un satélite hasta llegar al receptor, y de esa forma calcular la distancia, sabiendo que las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300.000.000 m/s). Si se conoce el tiempo exacto en que salió la señal del emisor y el tiempo de llegada al receptor, se puede calcular por diferencia el tiempo de viaje de la señal y por ende la distancia. De aquí se deduce que los relojes deben ser bastante precisos en tiempos pequeños, porque la señal de un satélite que esté perpendicular al receptor sólo tarda $0{,}06$ de segundo en llegar.

Para poder calcular el tiempo de viaje de la señal de radio, tanto el satélite como el receptor generan códigos sincronizados. Esto es que ambos generan el mismo código al mismo tiempo, entonces cuando llega una onda al receptor este determina el tiempo transcurrido desde que éste generó el mismo código, la diferencia de tiempo es lo que tardó la onda en llegar.

Tanto el satélite como el receptor generan un juego de códigos digitales que responden a un criterio binario. Ese juego de códigos digitales llevan el nombre de pseudoaleatorios y están diseñados de forma tal que puedan ser fácilmente comparados, en forma rápida y sin ambigüedades. La secuencia pseudoaleatorios se repite en el orden de los milisegundos.

2.1.5. Fuentes de Error en el GPS

A pesar de que el desarrollo del GPS se basó en tecnología muy sofisticada y con gran inversión de dinero, su precisión se ve degradada por una serie de fuentes de error. Algunas fuentes de error son inherentes al sistema e inevitables y otras son manejables por el usuario. A continuación se listan las fuentes de error mas comunes:

- Relojes de Satélites.
- Errores de Órbita.
- Atmósfera Terrestre.
- Multitrayectoria.
- Geometría Satélital.
- Receptores de GPS.
- Disponibilidad Selectiva (S/A).

Los errores debido a la multitrayectoria aparecen cuando la señal "rebota" antes de llegar al receptor, o sea que la señal llega a la antena del receptor por más de una trayectoria o camino. Parte de la onda llega en forma directa y parte realiza una trayectoria diferente, por ende causando diferencias en el tiempo de viaje. Hoy en día hay algunas antenas como por ejemplo de anillos circulares o *Choke Ring* diseñadas para minimizar este efecto.

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos agregaba un error intencional al sistema para restringir el uso a fuerzas hostiles en tiempo de guerra, esto lo lograban introduciendo ruido digital a los relojes de los satélites. Esta *Disponibilidad Selectiva* (SA) no afecta la precisión de los receptores militares de GPS pero si a los de uso civil, los errores introducidos cambian constantemente en magnitud y dirección, esta era la mayor fuente de error de los receptores de uso común. A partir del 1 de Mayo de 2000, el gobierno estadounidense eliminó la disponibilidad selectiva, aumentando considerablemente la precisión de los receptores de uso común.

2.1.6. Corrección Diferencial

Todos estos errores enunciados anteriormente reducen la precisión del GPS, resultando en un error de entre 5 y 20 m (previo a la eliminación de la disponibilidad selectiva el error ascendía hasta los 100 m). Esto puede resultar útil para algunas actividades pero no para algunos usos en la agricultura por la precisión que se requiere en las posiciones. Por ende se requiere un método para mejorar sustancialmente la precisión, el método más usado hoy en día es la corrección diferencial (DGPS Sistema de Posicionamiento Global Diferencial). El sistema funciona usando un receptor de referencia (que puede ser una antena Beacon o un satélite geoestacionario) ubicado en un lugar de coordenadas exactamente conocidas. Esta estación de referencia recibe las mismas señales que los receptores comunes, pero al conocer su posición exacta puede calcular el error que transmite cada satélite en magnitud y sentido, en ese momento. La diferencia entre la distancia real desde

el receptor de referencia y cada satélite se denomina distancia de corrección diferencial, este error es transmitido a través de señales de radio al móvil en tiempo real, mediante este sistema de corrección se logran precisiones submétricas, que oscilan en los 30 cm. Esta precisión ya es suficiente para su aplicación en la Agricultura de Precisión.

Como ya se explicó anteriormente cuantos mas satélites esté recibiendo un receptor más precisa será su posición ya que se disminuye el área de incertidumbre de su posición posible. El mínimo de satélites para ubicar un receptor en tres dimensiones es de 4, cada satélite que se agregue a las mediciones mejora la precisión. El máximo teórico de satélites que se pueden recibir es 12, pero generalmente los que se encuentran demasiado cerca del horizonte no se reciben. En la práctica se suele trabajar con un máximo de 8, lo que resulta en una muy buena precisión, se recomienda trabajar con por lo menos cuatro o más.

2.1.7. Dilución o Pérdida de la Precisión Posicional

PDOP es una medida sin unidades que indica cuando la geometría satelital provee los resultados mas precisos. Cuando los satélites están distribuidos por el espacio, el valor PDOP es bajo y las posiciones computadas son más precisas. Cuando los satélites están agrupados el valor PDOP es alto y las posiciones imprecisas. Para obtener precisiones submétricas el PDOP debe ser de cuatro o menos.

2.1.8. Factores Ambientales

Como ya se sabe la señal GPS es reflejada por objetos cercanos, particularmente por objetos metálicos, creando resultados falsos o erróneos. Este fenómeno es conocido como multitrayectoria. La precisión óptima se obtiene recolectando datos lejos de superficies reflectoras, como edificios, galpones o árboles, algunos receptores poseen distintas formas de minimizar el efecto de la multitrayectoria, para lograr precisiones menores a 1 m + 1ppm de la distancia entre el receptor y la estación de referencia se deben cumplir las siguientes condiciones:

- El número de satélites disponibles deben ser mayor a 5
- La dilución de la precisión (PDOP) debe ser menor a 4
- La relación señal/ruido (S/N) debe ser mayor a 6
- La elevación mínima debe ser mayor a 7.5^o
- Un ambiente libre de obstáculos para la multitrayectoria.

2.1.9. GPS y Agricultura de Precisión

Para los fines de la Agricultura de Precisión, no es necesario tener un conocimiento profundo del funcionamiento del GPS. Los conceptos básicos contemplados en este capítulo ayudan a comprender las bases del sistema para poder diferenciar aquellos receptores que se adaptan a los requerimientos para el uso en la Agricultura de Precisión y además para entender

los datos sobre precisión y funcionamiento que muestran los receptores en el display de la maquinaria agrícola cuando están en uso.

A veces se presentan problemas con la correcta recepción de la señal y estos son atribuidos a una falla en el funcionamiento del sistema; sin embargo, puede suceder que estas fallas se deban a problemas de conexión de los equipos o al mal estado de los conectores, enchufes o cables. Por lo tanto, cuando se presenten problemas de recepción de señal se debe inmediatamente verificar el estado de mantenimiento de toda la instalación.

Otro punto a tener en cuenta cuando se utiliza el GPS para el mapeo de rendimiento y sobre todo en banderilleros satelitales es colocar la antena en el centro de la máquina para que todas las pasadas contiguas se realicen a la misma distancia, y además ésta debe estar ubicada en la parte más alta de la maquinaria o tractor y lejos de toda fuente de error o vibración que puedan interferir con la recepción de la señal. Frecuentemente se ubica la antena sobre sistemas que causan vibraciones en el equipo, provocando una sensible disminución del cociente S/N y por ende se degrada la precisión del equipo.

2.2. Percepción Remota

La *Percepción Remota* ha ganado mucho interés como una herramienta potencial de manejo para agricultura de precisión. Imágenes de satélites o fotografías aéreas pueden permitir al productor ver rápidamente los cultivos en su campo y decidir cuales áreas necesitan un manejo posterior, sin dejar la comodidad de su hogar. La parte visual, fundamental en el campo de estudio, es fácil desde que esta al alcance la tecnología para ver objetos desde grandes distancias. Sin embargo, interpretar lo que vemos y tomar decisiones sobre esas interpretaciones es todavía bastante complicado. Aunque la percepción remota ha sido usada en aplicaciones agronómicas desde la década de 1930, esta práctica sufre todavía un gran desarrollo como una herramienta de manejo para la producción vegetal.

A partir de la descripción anterior se puede deducir que la *Percepción Remota* es la ciencia y arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos obtenidos con un sensor remoto que no esta en contacto físico con ese objeto, área o fenómeno bajo estudio. El sensor remoto puede estar a pocos metros o a varios kilómetros, dependiendo del sistema usado y de la información deseada[1].

2.2.1. Sensores

Se conoce como sensor a cualquier dispositivo que permite convertir una magnitud física en una señal eléctrica que, posteriormente, puede manejarse para suministrar información o para ser tratada directamente por un ordenador. Actualmente, para el caso de la agricultura de precisión, existen en el mercado y en el campo sensores cuyo objetivo es determinar en cada momento y posición de la maquinaria, su velocidad de avance, la temperatura en un determinado lugar, el estado de cualquiera de sus mecanismos o

[1] Fotografías Aéreas, Imágenes Satélitales, etc.

también la cantidad de grano instantáneamente cosechado por la maquinaria, así como la fertilidad del suelo en una zona del campo o la calidad de vegetación del cultivo.

Cualquier maquinaria agrícola, o para uso doméstico, incluye numerosos sensores que proporcionan información al usuario, dentro de sistemas para la medida electrónica de magnitudes mecánicas, lo innovador en la *Agricultura de Precisión* es que se utilizan dispositivos que permiten determinar, en tiempo real, algunas de las características agrónomicas de las micro-parcelas por las que se desplazan las máquinas sobre el campo. Por ejemplo, algunos sensores utilizados para su uso en el campo agrícola se encargan de determinar el caudal instantáneo de grano que llega a la tolva de una cosechadora la cual se encuentra trabajando en situación normal, los cuales permiten estimar el rendimiento de grano por hectárea teniendo en cuenta la temperatura y la humedad del grano trillado.

2.2.2. Principio Físico de la Percepción Remota

Para comprender mejor la definición de esta ciencia es necesario estudiar y entender el fenómeno físico en la que se basa la percepción remota para lo cual se debe de identificar los tres principales elementos que contiene un sistema de percepción remota, de acuerdo con (Chuvieco, 1995) existen tres elementos indispensables para que en la percepción remota exista un flujo, estos elementos son: *sensor*, *objeto observado* y el *flujo energético* en donde este ultimo permite poner los dos primeros en relación. Además de esta interacción, existen tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto son: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.

La reflexión es la interacción mas importante de la percepción remota, pues este fenómeno se deriva directamente de la energía solar, y esta a su vez es la principal fuente de energía del planeta. Cuando la luz solar llega a la superficie terrestre, esta refleja la energía dependiendo del tipo de superficie presente sobre ella. Este flujo de energía reflejado llega nuevamente al sensor satélital y después lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras para ser procesado. Cabe mencionar que, entre la superficie terrestre y el sensor se interpone la atmósfera, la cual dispersa y absorbe parte de la señal original. De forma similar, la percepción remota puede basarse en la energía emitida por las propias superficies, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente la energía reflejada de la superficie terrestre.

Así, de esta forma, el flujo energético entre la superficie terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética, en donde la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por medio de tres procesos: convección, conducción y radiación, de estos tres, el fenómeno mas importante para la percepción remota y este caso de estudio es la radiación, pues constituye la base para esta ciencia.

Para comprender mejor como funciona la radiación electromagnética se debe de entender las propiedades de ésta, las cuales se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio propuestas por los científicos Huygens y Maxwell, y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero descritas por Planck y

Einstein. Actualmente, es posible que ambas teorías sean correctas y tengan cierta relación entre si, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

Si analizamos primero la teoría ondulatoria propuesta por Huygens y Maxwell, esta nos propone que la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre si, en la cual estas fuerzas son eléctrico y magnético (***Figura*** 2.1). Las características de este flujo energético pueden describirse mediante dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F). La longitud de onda hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda mientras que la frecuencia designa el numero de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo determinada. Ambos elementos están inversamente relacionados, es decir, a mayor longitud de onda menor frecuencia y viceversa, por lo que sera suficiente con indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado, así de este modo, llegamos a la siguiente ecuación propuesta por Huygens y Maxwell:

$$C = \lambda F \tag{2.1}$$

donde C indica la velocidad de la luz, λ expresa la longitud de onda y F la frecuencia (Herzios, ciclos por segundo).

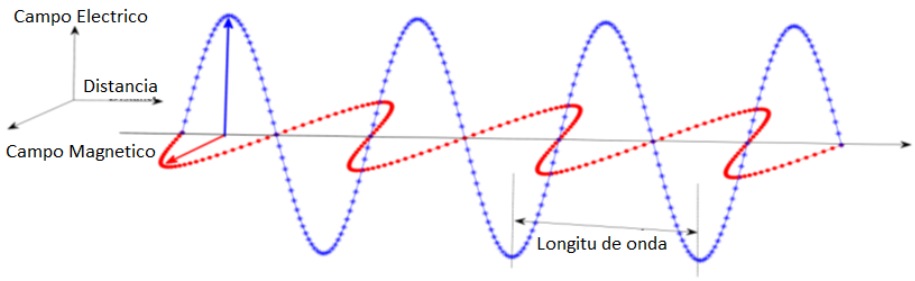


Figura 2.1: Onda Electromagnética propuesta por (Huygens y Maxwell).

Gracias a la teoría cuántica, podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia (Max Planck):

$$Q = hF \tag{2.2}$$

donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), F la frecuencia y h la constante de Planck. Sustituyendo en la *ecuación* 2.1 podemos así mismo expresar:

$$Q = h(c/\lambda) \tag{2.3}$$

lo que significa que a mayor longitud de onda o menor frecuencia el contenido energético sera menor o mayor. Con esto podemos deducir que la radiación en longitudes de onda largas es mas difícil de detectar que aquella contenida en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran mas sofisticados medios de detección.

2.2.3. El Espectro Electromagnético

Con base en lo deducido de las formulas descritas anteriormente, se puede describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. A la forma en que se organizan estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se le denomina espectro electromagnético (Chuvieco, 1995). El espectro electromagnético comprende varias bandas, desde las longitudes de onda mas cortas en donde residen los rayos gamma y rayos X hasta las mas extensas utilizadas en telecomunicaciones.

Desde el punto de vista de la percepción remota, es necesario mencionar una serie de bandas espectrales (***Figura*** 2.2), las cuales son las mas utilizadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, aun así la terminología mas común (Chuvieco, 1995) es la siguiente:

- **Espectro Visible** (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestro ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0.4 a 0.5 μm); verde (0.5 a 0.6 μm), y rojo (0.6 a 0.7 μm), en razón de los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.

- **Infrarrojo Cercano** (0.7 a 1.3 μm). A veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- **Infrarrojo Medio** (1.3 a 8 μm). En donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

- **Infrarrojo Térmico** (8 a 14 μm). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.

- **Microondas** (a partir de 1 mm). con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.2.4. Conceptos Básicos de Percepción Remota

Una vez analizados los fundamentos del espectro electromagnético, sera necesario establecer una relación entre este y la percepción remota. Para que pueda establecerse una relación entre ambos, es necesario que se produzca una observación remota de la superficie terrestre para que un sensor alejado de esta ultima detecte un flujo energético proveniente de ella. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta. Convendrá, entonces, definir las unidades de medida comúnmente empleadas en la percepción remota, con el objetivo de ser mas rigurosos a la hora de abordar posteriormente los procesos de adquisición de datos, de acuerdo con (Chuvieco, 1995) estas unidades son las siguientes:

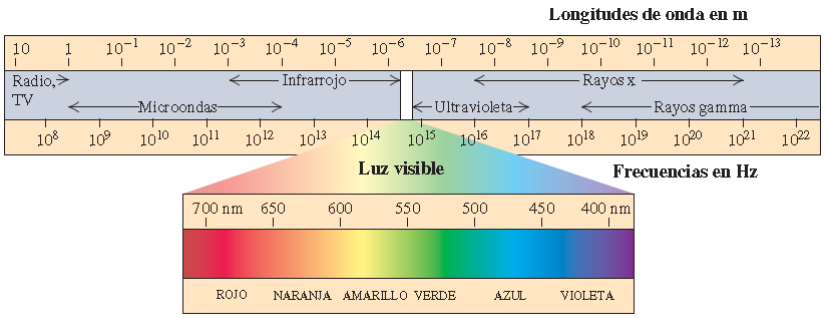


Figura 2.2: Espectro Electromagnético (Freedman y Zemansky, 2009).

- **Energía Radiante** (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones.
- **Densidad Radiante** (W). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen.
- **Flujo Radiante** (ϕ). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo.
- **Emitancia o Excitancia Radiante** (M). Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo.
- **Irradiancia Radiante** (E). Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien esta indica la energía emitida, mientras que la irradiancia refiere a la incidente.
- **Intensidad Radiante** (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata este de un ángulo tridimensional, que refiere a la sección completa de la energía transmitida.
- **Radiancia** (L). Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en percepción remota porque describe lo que mide el sensor.
- **Radiancia Espectral** (L_λ). Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, esta es la medida mas cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia también puede completarse con el calificativo de espectral para referir a una determinada longitud de onda.
- **Emisividad** (ε). Relación entre la emitancia de una superficie (M), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura (M_n).
- **Reflectividad** (ρ). Relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.

- **Absortividad** (α). Relación entre el flujo incidente y el que se absorbe una superficie.
- **Transmisitividad** (τ). Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Hasta aquí se han considerado los conceptos básicos y el origen de la radiación, mas importante aun es entender como este flujo interacciona con la superficie terrestre (***Figura*** 2.3). De acuerdo con (Chuvieco, 1995) la radiación que esta recibe se descompone o deriva en tres términos principales:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \tag{2.4}$$

Este es, el flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido. Por lo que resulta conveniente expresar esta formula en unidades relativas. Para ello, basta dividir cada termino de la expresión anterior:

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \tag{2.5}$$

Así, podemos concluir que la suma de la reflectividad, absortividad y transmisitividad ha de ser igual a uno. De esta forma la relación entre las tres magnitudes no es constante con la longitud de onda, por lo tanto, en términos mas rigurosos, debería expresarse como:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \tag{2.6}$$

La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa, tal como se muestra en la (***Figura*** 2.3).

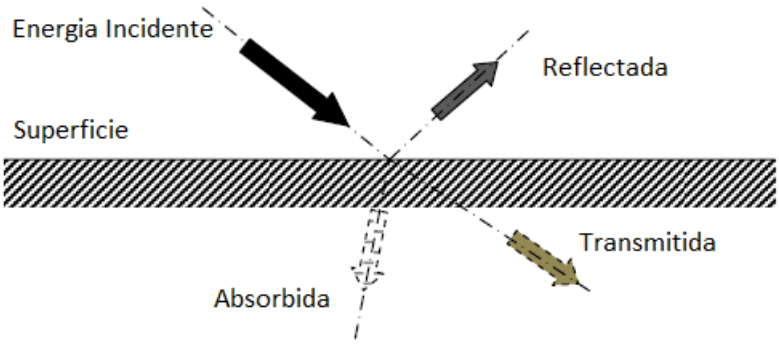


Figura 2.3: Relación entre flujo incidente y reflejado (Chuvieco, 1995).

2.2.5. Firmas Espectrales

Con base en lo descrito anteriormente sobre la interacción de la radiación electromagnética con la superficie terrestre se pueden analizar distintas firmas espectrales dependiendo de la superficie que se este analizando. Estas huellas o firmas espectrales muestran dicha interacción en función

de la reflectividad y la longitud de onda, a partir de experimentos de laboratorio, se han obtenido unas firmas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres (***Figura*** 2.4).

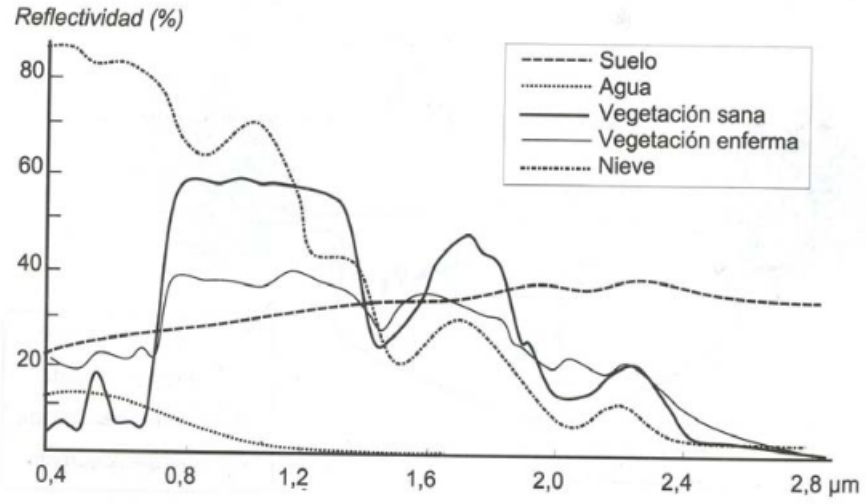


Figura 2.4: Firmas Espectrales mas comunes (Chuvieco, 1995).

Como puede observarse en el gráfico anterior, algunas firmas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho mas selectivo. Por ejemplo, la nieve presenta una reflectividad alta y constante, pues refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda debido a sus propiedades. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, tanto mas según nos situamos en longitudes de onda mayores. Por otra parte, la vegetación presenta un comportamiento muy cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible y mas elevados en el infrarrojo cercano, siempre y cuando se trate de vegetación sana. Cabe mencionar que el flujo de energía recibido por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos, de los cuales los mas comunes son las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de la observación.

En cuanto a las condiciones de observación, se debe tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del angulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el flujo energético incidente con la posición del sensor. Esta geometría de observación esta estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie. Así, pueden distinguirse dos tipos de cubiertas: aquellas que reflejan la energía con el mismo angulo del flujo incidente llamadas *especulares*, y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones llamadas *lambertianas* (Chuvieco, 1995) (***Figura*** 2.4). La mayor parte de las cubiertas tienen a comportarse de modo intermedio entre ambas situaciones, en función de sus características y de la longitud de onda en la que se trabaje.

Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho mas la energía incidente que si se trata de longitudes de onda mayores, en donde esas mismas partículas pueden no impedir un

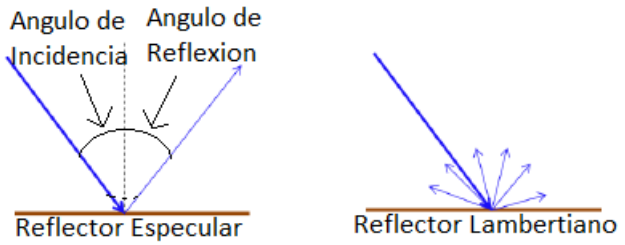


Figura 2.5: Superficies especulares y lambertianas (Chuvieco, 1995).

comportamiento especular. Así podemos deducir que, el comportamiento de una cubierta en el espectro visible esta influido no solo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican lo que podríamos llamar su comportamiento espectral teórico, según (Chuvieco, 1995) algunos de esos factores son:

- Angulo de iluminación solar, muy dependiente de la fecha del año y del momento de paso del satélite.
- Modificaciones que el relieve introduce en el angulo de iluminación.
- Influencia de la atmósfera, especialmente en lo que se refiere a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda.
- Variaciones medio ambientales en la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta, estado fenológico, etc.
- Angulo de observación, relacionado con la órbita del satélite y con las características del sensor.

Todos estos factores demuestran la complejidad que puede entrañar la caracterización de un tipo de cubierta a partir de sensores remotos, sin embargo, como esta investigación estará enfocada a la vegetación se analizaran estas características en la siguiente sección.

2.2.6. Interacción de la Vegetación en el Espectro Electromagnético

En este trabajo de investigación y en general la caracterización espectral de la vegetación es uno de los factores principales dentro de la percepción remota para poder analizar de forma concisa y precisa el comportamiento de la vegetación el cual es uno de los objetivos a alcanzar. Pese a su gran importancia, aun ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor remoto como se menciono anteriormente. En primer lugar, se debe considerar la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico o de crecimiento, forma de la hoja y contenido de humedad. Ademas se debe tener en cuenta las características morfológicas[2] de la planta que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un

[2] Altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc.

tercer grupo de factores serian los derivados de la situación geográfica[3] de la planta (Chuvieco, 1995).

De acuerdo con Curran (1980), el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a los 0.55 μm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

Estas características espectrales se relacionan principalmente con la acción de los pigmentos foto-sintéticos y del agua que almacenan las hojas. En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos. Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los 0.445μm, mientras la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los 0.645μm. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los 0.55μm, en donde el efecto absorbente es menor. Por esta causa aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa.

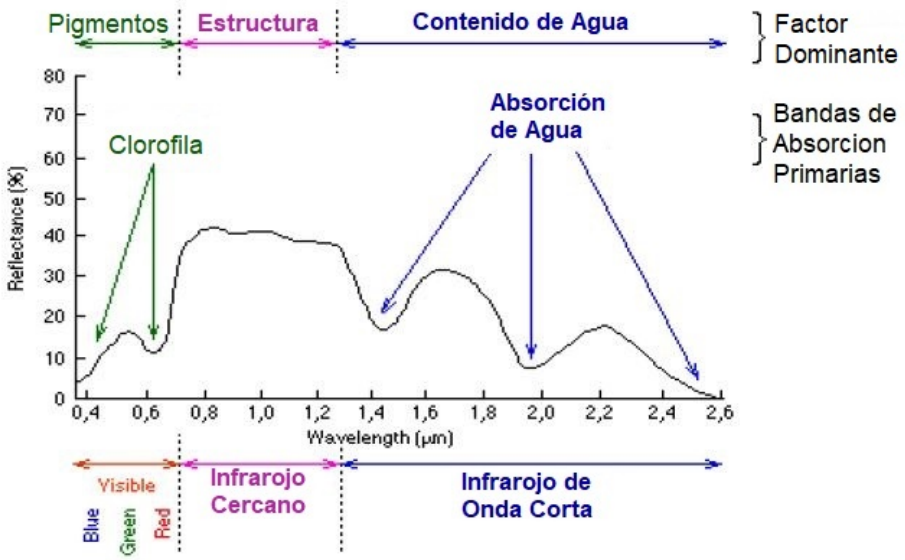


Figura 2.6: Firma Espectral que presenta la vegetación con buen estado de salud (http://s438316481.onlinehome.us).

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y por lo tanto su color amarillento. En algunas especies resulta destacada la acción de otro pigmento, la antocianina, el cual es un buen reflector de la porción roja del espectro, que causa ese color en épocas de senescencia.

En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto, la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, ejerce un papel protagonista, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente

[3]Pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de la plantación, etc.

en esta banda del espectro (Harris, 1987). Por ello, la hoja ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano, en claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible, especialmente con la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.

A partir de la longitud de onda de 1.4 μm el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. Las medidas de laboratorio (Curran, 1980) muestran una notable diferencia en esta región del espectro entre las hojas secas y las infiltradas con agua. Entre estas bandas donde la absorción del agua es mas clara, se sitúan dos picos relativos de reflectividad, en torno a 1.6 μm y 2.2 μm. Esto es muy interesante, ya que, la observación en esta región del espectro es de gran interés para conocer el estado de vigor de la hoja, en función de su contenido de humedad.

Como observación, el sensor remoto no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos adicionales que complican el esquema previo. Algunos de ellos son: el angulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor, las características del suelo que sustenta la vegetación, la geometría de la cubierta vegetal, su estado fenológico[4], etc.

Como una previa conclusión, es evidente que estas ideas nos sirven para centrar el estudio científico de la vegetación a partir de sensores espaciales. De ellas, resulta evidente que el contrate mas nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente en el rojo (en torno a los 0.645 μm), y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm). De ahí que podemos concluir, como principio básico, que cuanto mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor sera el vigor de la vegetación, y mas clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta. Caso contrario, cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrara en un comportamiento espectral mas o menos alejado de la conclusión anterior.

La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofilica y a ofrecer una menor absortividad en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en la banda del verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja. La firma espectral se hace mas plana y menos cromática (Murtha, 1978).

Este comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de indices de vegetación, que se basan en el contraste entre las bandas roja e infrarrojo cercano del espectro. Los cuales se construyen a partir de la combinación lineal entre estas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multiespectral (Huete, 1987). De distintos métodos, todos ellos tienden a presentar de forma mas nítida las características de la vegetación, facilitando su aislamiento de otras cubiertas y la detección de su estado vital, mas adelante se definirán y analizarán

[4]El Maíz cuenta con 12 etapas fenológicas o de crecimiento.

estos índices de vegetación, profundizando mas en aquellos en los cuales se basara esta investigación.

2.2.7. Indices de Vegetación

De acuerdo con (Chuvieco, 1995) la mayoría de los índices de vegetación se realizan mediante operación de cocientes, y tal como su nombre lo indica, un cociente o *ratio* implica efectuar una división, pixel a pixel, entre los valores digitales almacenados en dos o mas bandas de la misma imagen. El empleo de estos cocientes se utilizan en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de estas cubiertas (***Figura*** 2.7).

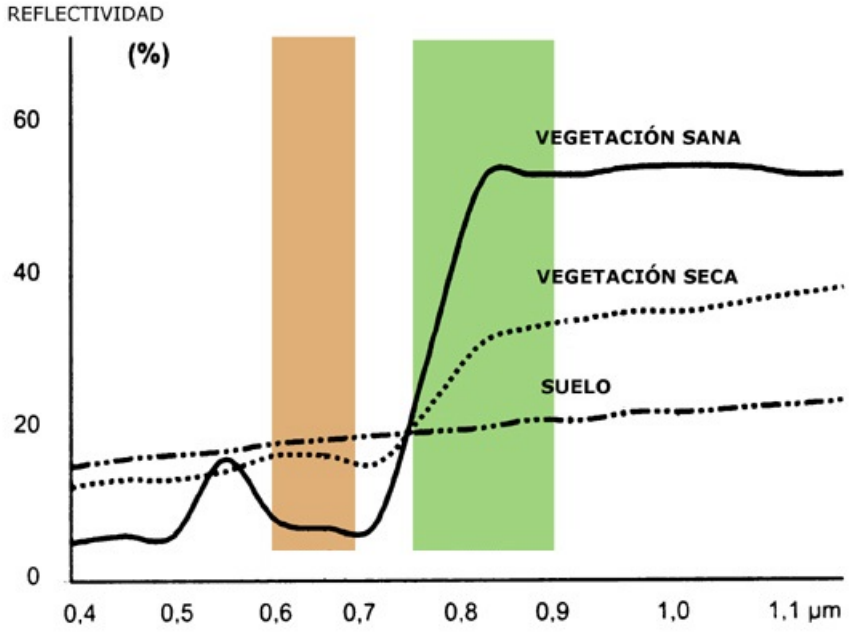


Figura 2.7: Fundamento Espectral en los que se basan los Indices de Vegetación (https://giulliana-mv.blogspot.mx/2016/).

Como se mencionó anteriormente, la signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas visibles y mas aun en la banda roja (entre los 0.6 y 0.7 μm) y las comprendidas en el infrarrojo cercano (0.7 y 1.1 μm). Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben, esto para realizar la función clorofílica, en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano. El contraste con la vegetación enferma, y sobre todo con los suelos, es bastante evidente en estas dos bandas. Por lo tanto, se puede enunciar, que cuanto mayor sea el contraste entre los valores digitales de la banda infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentara la cubierta observada. Bajo valores de

contraste indican una vegetación enferma o en decadencia, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño.

En este concepto se apoya la mayor parte de los indices de vegetación, en los que se combinan la banda roja e infrarrojo cercano del espectro. A continuación, se mencionan algunos indices de vegetación mas utilizados para la agricultura moderna, destacando entre ellos el NDVI, WDRVI y el CVI propuestos para esta investigación:

- **Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**. Este indice es uno de los utilizados en estudios de vegetación en la actualidad e indica el verdor de la hoja (Pask y Mullan, 2013). Se utiliza para tomar decisiones en agricultura de precisión como por ejemplo para la detección de malezas, fumigación con herbicidas, tasa y momento de aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, etc. Se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$NDVI = \frac{\varphi_{NIR} - \varphi_{RED}}{\varphi_{NIR} + \varphi_{RED}} \tag{2.7}$$

  El valor resultante de dividir pixel a pixel los valores de reflectancia con la ecuación anterior esta acotado entre -1 y +1, con un umbral crítico en torno a 0.2, en el cual a partir de este valor hay un buen desarrollo vegetal, por el contrario, valores inferiores a 0.2 indican vegetación enferma y suelo desnudo, a medida que se acerca al 0 indica suelo húmedo o agua (Rivera y Gavi, 2002).

- **Indice de Vegetación de Rango Amplio Dinámico (WDRVI)**. Este indice es una variación del NDVI, surge de la necesidad de mejorar la sensibilidad de saturación que presenta el NDVI cuando el Indice de Área Foliar (IAF) de un área de vegetación es mayor a 2 (Gitelson, 2004), se calcula con la siguiente ecuación:

$$WDRVI = \frac{\alpha \cdot \varphi_{NIR} - \varphi_{RED}}{\alpha \cdot \varphi_{NIR} + \varphi_{RED}} \tag{2.8}$$

  En donde la variable α es un peso que se multiplica con la banda NIR de la imagen satélital y puede tomar valores en un rango de 0.1 a 0.2 los cuales permiten resaltar las características biofísicas de la vegetación, para el caso particular del maíz se utilizara $\alpha = 0{,}1$ el cual permite establecer una mejor relación entre el cultivo de maíz y el IAF (Maresma y Ariza, 2016).

- **Indice Red-Edge de Diferencia Normalizada (NDRE)**. Este indice es una variación del NDVI donde en vez de utilizar la banda del rojo se utiliza la banda red-edge ubicada en el espectro electromagnético entre el rojo y el infrarrojo entre las longitudes de onda de 0.68 μm y 0.73 μm (Gitelson y Merzlyak, 1994).

$$NDRE = \frac{\varphi_{NIR} - \varphi_{RED_EDGE}}{\varphi_{NIR} + \varphi_{RED_EDGE}} \tag{2.9}$$

- **Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)**. Este indice es una variante mas del *NDVI* que utiliza la banda del

verde en lugar de la del rojo (Kemerer y Bella, 2007), su formula es la siguiente:

$$GNDVI = \frac{\varphi_{NIR} - \varphi_{GREEN}}{\varphi_{NIR} + \varphi_{GREEN}} \tag{2.10}$$

Este indice se ha mostrado muy útil para estimar el rendimiento del cultivo de arroz inundado, en el que se dispone de parcelas fertilizadas con purín porcino y nitrógeno mineral a distintas dosis dando coeficientes de determinación bastante elevados.

- **Indice de Vegetación Proporcional (RVI)**. Es uno de los primeros índices de vegetación en aparecer y como su nombre lo indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando este basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano.

$$RVI = \frac{\varphi_{NIR}}{\varphi_{RED}} \tag{2.11}$$

Este índice es capaz de resaltar la vegetación, disminuyendo otras superficies como suelo, hielo, agua, etc, también puede indicar la cantidad de vegetación y disminuye los efectos de la atmósfera y la topografía (Jordan, 1969).

- **Indice de Vegetación Proporcional Red-Edge (RVI$_{RE}$)**. Este indice es una variación del *RVI* en donde se cambia la banda del rojo por la banda red-edge (Gitelson y Merzlyak, 1994), su ecuación es la siguiente:

$$RVI_{RE} = \frac{\varphi_{NIR}}{\varphi_{RED_EDGE}} \tag{2.12}$$

Las propiedades de la banda red-edge permiten resaltar los cambios de la absorción de luz por medio de la clorofila de la vegetación.

- **Indice de Vegetación de Clorofila (CVI)**. Este indice esta optimizado para predecir la concentración de clorofila en la vegetación (Vincini y Frazzi, 2011) y se calcula con el producto de la banda infrarroja por el cociente de las bandas roja y verde:

$$CVI = \varphi_{NIR}(\frac{\varphi_{RED}}{\varphi_{GREEN}})^2 \tag{2.13}$$

En años recientes se ha demostrado que el estudio y medición del contenido de clorofila de la hoja para determinar el estado de nutrición en la planta permite determinar la aplicación de fertilizantes nitrogenados en función de la clorofila presente en la vegetación (Maresma y Ariza, 2016).

- **Indice de Vegetación Triangular (TVI)**. Este índice es calculado como el área de un triángulo definido por la máxima reflectancia de la banda verde, la absorción de clorofila mínima, y el espacio espectral del

infrarrojo cercano, esta basado en el hecho que la absorción de la clorofila causa un decremento en la reflectancia del rojo y la abundancia de esta causa un incremento en la reflectancia del infrarrojo:

$$TVI = 0{,}5[120(\varphi_{RED_EDGE} - \varphi_{GREEN}) - 200(\varphi_{RED} - \varphi_{GREEN})] \tag{2.14}$$

La idea general de este índice es describir la radiancia absorbida por los pigmentos en función de la diferencia relativa entre la reflectancia banda roja e infrarroja en conjunto con la magnitud de la reflectancia entre la región del verde, donde la absorción de la luz por la clorofila es relativamente significante (Broge y LeBlanc, 2001).

Estos son algunos de los indices mas utilizados en la actualidad en agricultura de precisión, algunos tienden a tener variaciones en sus modelos matemáticos para estudiar fenómenos en específico, la selección del índice adecuado depende del estudio que se desee hacer, para esta investigación en especifico se utilizara el *NDVI* para estimar una predicción para el uso de fertilizantes nitrogenados.

2.3. Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés *Geographic Information System*) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión (Sivakumar y Roy, 2004).

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía (***Figura*** 2.8).

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma, de acuerdo con (Sivakumar y Roy, 2004) las principales cuestiones que puede resolver un Sistema de Información Geográfica, ordenadas de menor a mayor complejidad, son:

- **Localización**: Preguntar por las características de un lugar concreto.
- **Condición**: El cumplimiento o no de unas condiciones impuestas al sistema.
- **Tendencia**: Comparación entre situaciones temporales o espaciales distintas de alguna característica.
- **Rutas**: Cálculo de rutas óptimas entre dos o más puntos.

- **Pautas**: Detección de pautas espaciales.
- **Modelos**: Generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas.

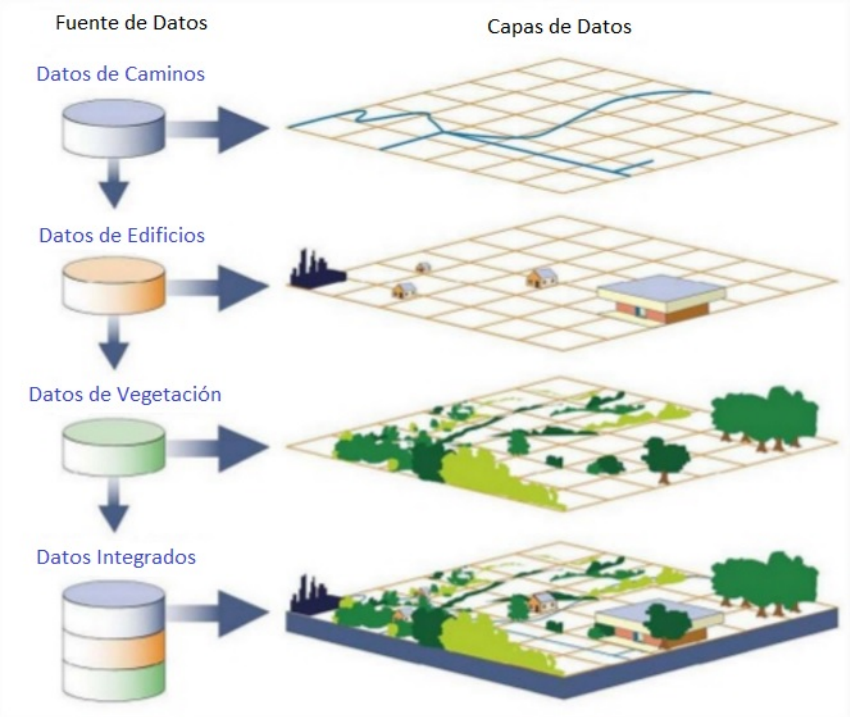


Figura 2.8: Capas que integran un Sistema de Información Geográfica (https://www.nationalgeographic.org/).

Por ser tan versátiles, el campo de aplicación de los Sistemas de Información Geográfica es muy amplio, pudiendo utilizarse en la mayoría de las actividades con un componente espacial. La profunda revolución que han provocado las nuevas tecnologías ha incidido de manera decisiva en su evolución.

Las modernas tecnologías SIG trabajan con información digital, para la cual existen varios métodos utilizados en la creación de datos digitales. El método más utilizado es la digitalización, donde a partir de un mapa impreso o con información tomada en campo se transfiere a un medio digital por el empleo de un programa de Diseño Asistido por Ordenador (DAO o CAD) con capacidades de georreferenciación.

Dada la amplia disponibilidad de imágenes orto-rectificadas (tanto de satélite y como aéreas), la digitalización por esta vía se está convirtiendo en la principal fuente de extracción de datos geográficos. Esta forma de digitalización implica la búsqueda de datos geográficos directamente en las imágenes aéreas en lugar del método tradicional de la localización de formas geográficas sobre un tablero de digitalización.

2.3.1. Representación de los Datos SIG

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos

abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). Existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: raster y vectorial (Haining, 2003).

El formato *raster* presupone el dividir el espacio geográfico en elementos discretos, de forma regular, contigua y mutuamente exclusiva e indivisible. Es una representación en forma de malla y cada elemento adopta un valor único por cada atributo. Este formato tiene como ventajas una estructura de datos simple, facilidad de combinar capas con datos de sensores remotos y facilidad de análisis espacial entre otros. Como desventajas es que maneja grandes volúmenes de datos lo que ocasiona necesidad de adquirir grandes capacidades de almacenamiento (***Figura*** 2.9).

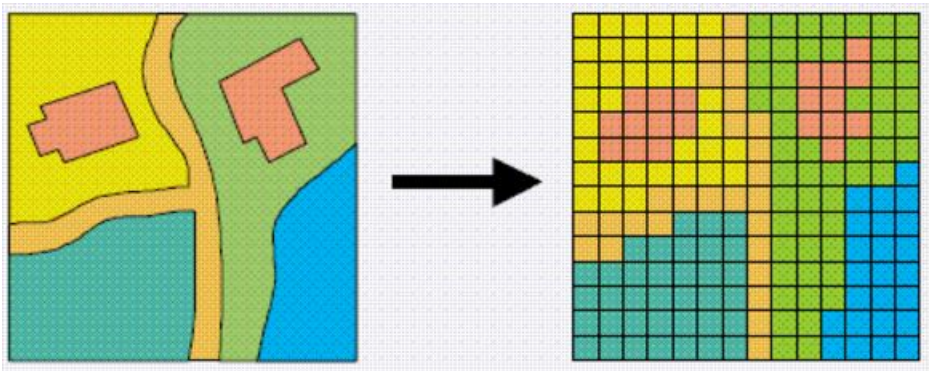


Figura 2.9: Modelo Raster de Datos (http://desktop.arcgis.com).

El formato *vectorial* asume un espacio continuo, de acuerdo a la geometría euclidiana, donde los objetos puntuales se representan por un par de coordenadas (x, y). Ademas, se utilizan *lineales* los cuales son segmentos que se conectan en vértices, y se representan con las coordenadas (x, y) de estos vértices, por último, los polígonos son áreas que quedan representadas por las líneas que los delimitan (***Figura*** 2.10).

Algunas ventajas del formato vectorial son la buena representación de estructura de datos, además estas son compactas por lo que no requieren de grandes cantidades de memoria y la topología puede ser descrita mediante redes de uniones. Sin embargo, también poseen desventajas las cuales son estructuras de datos complejas, dificultad de construir simulaciones, mayor sofisticación y precio de equipo y software.

Los SIG que se centran en el manejo de datos en formato vectorial son más populares en el mercado. No obstante, los SIG raster son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; también en estudios medioambientales donde no se requiere una excesiva precisión espacial[5].

Cabe mencionar que es mejor optar por el formato vectorial si se necesitan guardar datos de rasgos del terreno con límites abruptos o examinar las relaciones espaciales a lo largo de una red, además si se desea guardar una gran cantidad de atributos, para elaborar consultas a la base de datos sobre un área espacial grande y hacer mapas detallados de gran calidad.

[5]Contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas y análisis geológicos.

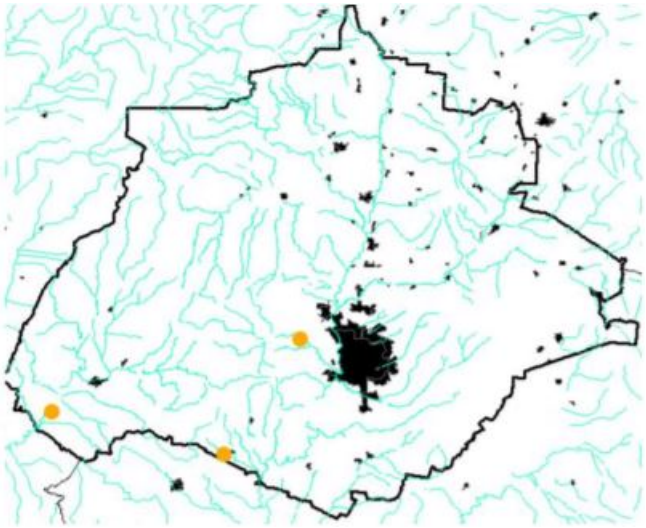


Figura 2.10: Modelo Vectorial de Datos (http://desktop.arcgis.com).

Por el contrario es mejor optar por el formato raster si se necesita modelar rasgos o fenómenos que varían sobre una superficie continuo o combinar una gran cantidad de capas de datos de manera rápido y económica o si se trabaja con imágenes satélitales.

2.3.2. Uso de los SIG para la Producción Agrícola

Actualmente, las principales herramientas que posibilitan la aplicación de la agricultura de precisión son los: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Como ya fue presentado, los GPS constituyen receptores de señales satélitales que proporcionan al usuario datos sobre su posición geográfica y altitud, además de permitirle planificar mejor la ruta a seguir para efectuar las demostraciones y luego estimar la extensión de trayectos recorridos. Cuando se conecta el receptor a la maquinaria agrícola utilizada para la cosecha o en un lugar definido por el usuario, se puede registrar información sobre la localización geográfica de los datos muestreados, facilitando el georreferenciamiento y el posterior mapeo de la información relevada en el campo (Mantovani y Magdalena, 2014).

Los SIG son software compuestos por varios módulos dedicados al almacenamiento y procesamiento de datos con localización geográfica conocida (geoprocesamiento) que posibilita el análisis de patrones, integración y modelos espaciales, monitoreo, simulación de precisiones y presentación de gran cantidad de información en forma de mapas, gráficos, figuras y sistemas multimedia. No hay consenso sobre la definición de un SIG, pero es reconocida su importancia en la organización e integración espacial de informaciones de diferentes naturalezas, tornando posible relacionar con gran practicidad y relativa precisión una inmensa cantidad de datos, realizar cambios de escala y de proyección cartográfica, y relacionar bases de datos multidisciplinarios, lo cual facilita la solución de problemas reales y

concretos, así como la gestión adecuada del espacio geográfico (Landau, 2003).

La aplicación de técnicas de geoprocesamiento para el mapeo de la variabilidad espacial de las áreas de producción agrícola representa una herramienta potente para el tratamiento de los sistemas de producción, ya que contribuyen a la toma de decisiones para la intervención futura en áreas de baja productividad (Mantovani y Olivera, 2004), como por ejemplo: elegir el cultivo que se adapte más, mejorar las condiciones físicas del suelo para reducir su compactación, recomendar determinadas dosis de aplicación de fertilizantes, etc.

Utilizando las técnicas de geoprocesamiento (procesamiento informatizado de datos referenciados geográficamente), la información sobre cada lugar puede ser georreferenciada, lo que permite representar cartográficamente la variación espacial y/o temporal de las variables consideradas, así como la integración espacial de información georreferenciada proveniente de diversas fuentes como: datos recolectados en el campo con coordenadas geográficas conocidas, mapas temáticos diversos, mapas topográficos, imágenes georreferenciadas obtenidas mediante adquisición remota, modelos espaciales y simulación de escenarios, geoestadística, etc. Datos asociados a diferentes mapas temáticos pueden ser superpuestos espacialmente y comparados o integrados en diferentes secuencias, según los objetivos de cada trabajo.

La representación espacial de datos sobre el área de producción ha contribuido significativamente para la toma de decisiones y esfuerzos para manejar adecuadamente esas áreas, ya que apunta a producir y obtener información que favorezca el gerenciamiento adecuado de insumos y busca la forma de solucionar o mitigar conjuntamente cuestiones de tipo ambiental, social y económico (Martini y Mendez, 2003). En este sentido, la aplicación de técnicas de geoprocesamiento utilizando sistemas de información geográfica se ha transformado en una alternativa esencial para la integración espacial de los datos multidisciplinarios a ser considerados.

2.4. Mapas de Rendimiento

Un mapa de rendimiento agrícola, es un sistema capaz de brindar información relevante de la producción agrícola, donde los datos se representan utilizando puntos y un sistema de coordenadas X/Y (Cartesiano) referenciando las ubicaciones del mundo real (Albarenque y Velez, 2011).

Aunque el mapa de rendimiento de un ciclo o temporada es útil para interpretaciones de posibles causas de la variación del rendimiento, resulta de valor limitado para la toma de decisiones de estrategias de manejo sitio-específico en períodos de mediano o largo plazo. Aumentar el número de años utilizados para estudiar la variabilidad espacio-temporal y definir zonas de manejo, puede ser una solución para este problema. Datos de rendimiento de varios años, permiten identificar patrones de rendimiento y separar las causas naturales de la variación de aquellas debidas al manejo o errores de medición (Kleinjan y Carlson, 2007).

La variación debida al manejo incluye errores que típicamente se observan en parches pequeños, como las fallas de siembra, fallas en el establecimiento del cultivo, fertilización desuniforme, daños de herbicidas, daños

de enfermedades, entre otros. Los errores de medición incluyen errores de sensores de flujo y humedad de granos, errores debidos a la georreferenciación, al movimiento brusco de la cosechadora, errores debido al operario de la maquinaria, y errores del procesamiento de los datos (Albarenque y Velez, 2011). Un requisito indispensable previo a la utilización de un monitor de rendimiento es su correcta calibración, lo cual permite evitar algunos de los errores mencionados. Para que los mapas de rendimientos puedan utilizarse para caracterizar la variabilidad del rendimiento de los cultivos de manera adecuada deben removerse los errores que se generan, aun con un monitor calibrado.

Con base en lo descrito en los párrafos anteriores se puede llegar a la definición de un mapa de rendimiento para agricultura de precisión el cual es una representación espacial de datos de rendimiento registrados durante la cosecha de un cultivo (***Figura*** 2.11). Comúnmente la representación espacial se realiza utilizando un formato vectorial de puntos y coordenadas x, y, z (Bragachini y Mendez, 2006); asociadas a un sistema de proyección (latitud y longitud, WGS84) que referencia geográficamente los puntos de interés. La cantidad de información que se obtiene en cada punto del mapa de rendimiento depende del monitor que se utilice[6].

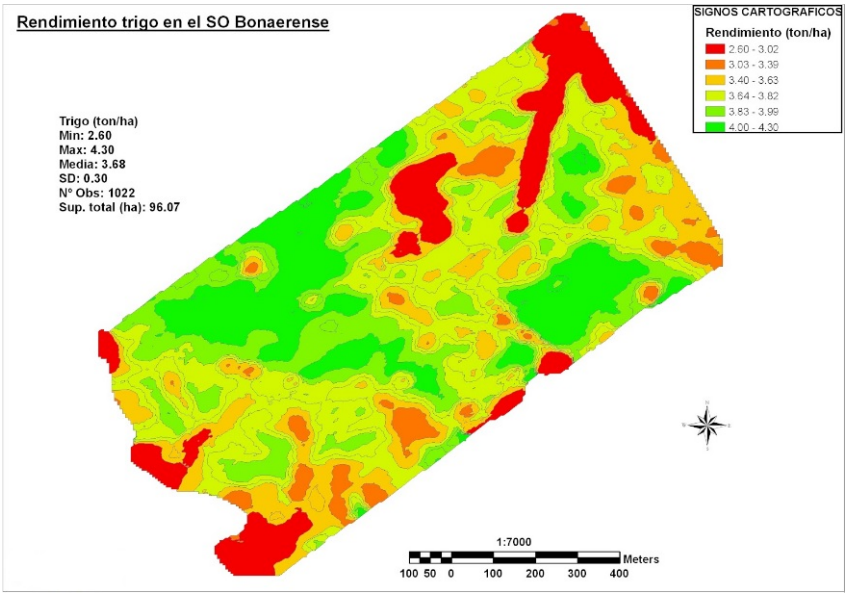


Figura 2.11: Ejemplo de un Mapa de Rendimiento (Bragachini y Mendez, 2006).

Los mapas de rendimiento se obtienen a partir de los datos recolectados por una cosechadora que incluye un sistema de posicionamiento global (GPS) junto con un sistema de sensores que permiten calcular la cantidad de grano cosechado por unidad de superficie. La información obtenida por los sensores y el GPS, es centralizada y almacenada en una consola que sirve de interfaz con el usuario.

Los mapas de rendimiento suelen utilizarse para caracterizar la variabilidad del rendimiento de los cultivos. Para esto se requieren mapas de

[6] Altura de cabezal, ancho de cosecha, distancia recorrida, velocidad de avance, flujo de granos, humedad de granos, pérdidas de cosecha, entre otros.

calidad que se generan utilizando monitores calibrados junto con un adecuado procesamiento de la información eliminando los datos erróneos. La remoción de los errores puede tener un impacto pequeño en la apariencia del mapa pero desde una perspectiva analítica, remover datos erróneos tiene un impacto significativo sobre la utilidad de los mapas para mejorar la precisión de las decisiones de manejo.

2.4.1. Beneficios Económicos de los Mapas de Rendimiento

Si bien es cierto que los mapas de rendimiento tienen ciertas desventajas estos pueden seguir aportando beneficios económicos gracias al planeamiento de la dosificación de insumos en áreas de interés de la parcela, por ejemplo, un productor que siembra 500 hectáreas anuales de maíz y desea conocer los 2 mejores tratamientos para su campo, podría sembrar franjas con los 7 mejores tratamientos de manera cruzada a la loma, media loma y bajo. Luego de evaluar el mapa elige los 2 mejores tratamientos de comportamiento promedio, sembrando el 50 % de su campo con el tratamiento A y el 50 % restante con el tratamiento B, eligiendo el tratamiento A de mejor comportamiento en el bajo para los mejores suelos y el tratamiento B para los suelos de menor potencial. Ese solo aspecto de manejo le significaría una mejora de 350 kg/ha de rendimiento que la alternativa tradicional de sembrar 500 ha probando 7 tratamientos, por lo tanto, se obtienen 1750 kg/ha por el total de ha de la parcela, si el costo del tratamiento es de \$6.6 $MXN \times Kg$ su retorno económico sera de \$11550 $MXN \times$ año, valor que paga la inversión de un monitor GPS y programas para confeccionar mapas de rendimiento en solo un año (Bragachini y Martini, 2000).

2.4.2. Variabilidad de los Mapas de Rendimiento

El mapeo de rendimiento es realmente valorable cuando la información lograda permite que el productor tome mejores decisiones de manejo (***Tabla*** 2.1).

Tabla 2.1: Tipos de Variabilidad (Mantovani y Magdalena, 2014).

Variabilidad Natural	Variabilidad Inducida
Relieve/ Pendiente	Densidad
Climática	Rotaciones
Relación suelo-clima	Fertilización
Propiedades físicas y químicas del suelo	Herbicidas
Infestación de malezas, insectos y enfermedades	Fechas de siembra

Para que los mapas de rendimiento puedan ser de utilidad concreta en el diagnóstico agronómico acertado, debe existir un profundo conocimiento de los alcances de la información georreferenciada y además de la cuantificación de la variabilidad del rendimiento de un cultivo que posee un lote, a partir de ello se pueden planificar ensayos en el gran cultivo que pueden ser analizados con alguna ventaja sobre los métodos tradicionales de

evaluación, de acuerdo con (Mantovani y Magdalena, 2014) estos pueden ser:

- El mapa de rendimiento ofrece una vista en planta, similar a una imagen aérea.
- Permite la obtención de mayor cantidad de resultados (promedios totales, parciales, datos puntuales, etc.)
- Permite analizar factores de manejo con testigos apareados cruzando la variabilidad (relieve, fertilidad) con una cantidad de información desde 180 hasta 1500 datos por hectárea, de ambos tratamientos en forma cruzada con otros factores.
- Permite el análisis de factores de manejo no planteados, que se manifiesten espontáneamente al realizar el mapa y al retroceder en la información con la planilla del cultivo del lote, encontrar la posible causa de manejo y cuantificarla.
- Permite realizar seguimientos a través del tiempo.
- Posibilita realizar correlaciones con otras bases de datos georreferenciadas.

Para esta investigación se procederá a realizar un mapa de rendimiento conformado por datos en tiempo real de humedad y temperatura de cada punto de interés de la parcela, los cuales a su vez se agregaran a imágenes satélitales procesadas con los indices de vegetación mas adecuados para generar un sistema de información geográfica capaz de ofrecer al agricultor la suficiente información para planificar la dosificación de fertilizantes en su parcela.

2.5. La Planta de Maíz

En función del área cultivada y el total de producción, el maíz ocupa el tercer lugar en el mundo después del trigo y el arroz. En virtud de la enorme variedad de tipos de maíz existentes, es cultivado en un amplio rango de condiciones climáticas. El maíz es uno de los cereales más eficientes en la conversión de energía solar, anhídrido carbónico, agua y minerales del suelo, en materia orgánica.

La tasa de crecimiento del cultivo está positivamente asociada con la cantidad diaria de radiación interceptada (Fischer y Palmer, 1984). De forma similar, la biomasa total acumulada hasta madurez fisiológica está relacionada con la radiación total interceptada (Andrade y Uhart, 1991).

Cuando la disponibilidad de agua y de nutrientes no son limitantes, y en ausencia de enfermedades e insectos, el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, dependen de la cantidad de radiación que pueda ser interceptada por los mismos. La temperatura es otro de los factores que también afecta la tasa de crecimiento del cultivo, actuando sobre las tasas de respiración y de fotosíntesis. No obstante, el mayor efecto de la temperatura es modificar la duración de las distintas etapas ontogénicas del cultivo.

2.5.1. Características Generales de la Planta

Para el maíz, las exigencias en temperatura[7], principalmente en las regiones templadas, son conocidas como exigencias en unidades de calor. Dicha nomenclatura fue adoptada debido al hecho de los mejores modelos bioclimáticos incluyen, de forma determinante, la disponibilidad térmica (Fassio y Carriquiry, 1998). Asimismo, la disponibilidad hídrica en el período de crecimiento es otra causa importante de variación en la productividad. La distribución de las lluvias interfiere con la disponibilidad hídrica en el suelo, siendo su efecto acentuado en condiciones de temperatura alta, donde la tasa de evapotranspiración es elevada. La arquitectura y la población de plantas determinan el área fotosíntetizante y el perfil de luz y CO_2 en el interior del cultivo, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La planta del maíz es de porte robusto de fácil desarrollo y de producción anual, el tallo es simple erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar los 4 metros de altura, es robusto y sin ramificaciones. Por su aspecto recuerda al de una caña, no presenta entrenudos y si una médula esponjosa si se realiza un corte transversal, el maíz es de inflorescencia monoica con inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta. En cuanto a la inflorescencia masculina presenta una panícula (vulgarmente denominadas espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos de polen (OECD, 2003). En cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen.

En cambio, la inflorescencia femenina marca un menor contenido en granos de polen, alrededor de los 800 o 1000 granos y se forman en unas estructuras vegetativas denominadas espádices que se disponen de forma lateral. Las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas, paralelinervias, se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades, los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes. Las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta, en algunos casos sobresalen unos nudos de las raíces a nivel del suelo y suele ocurrir en aquellas raíces secundarias o adventicias, ademas, el maíz se adapta muy bien a todos tipos de suelo pero suelos con pH entre 6 a 7 son a los que mejor se adaptan. También requieren suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular.

2.5.2. Etapas de Crecimiento del Maíz

El desarrollo del cultivo consiste en una sucesión obligatoria de etapas o fases dadas en un orden riguroso e irreversible, correspondiendo a la iniciación de órganos nuevos, es un fenómeno puramente cualitativo. Llamamos ciclo de desarrollo al conjunto de fases que van desde la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto. Este ciclo comprende dos etapas bien definidas: desarrollo *vegetativo* y desarrollo *reproductivo*.

El sistema para clasificación de etapas o estadios utilizado por la Universidad de lowa (lowa State University of Science and Technology) que se presenta a continuación divide al desarrollo de la planta en vegetativo y

[7]Donde las temperaturas máxima y mínima pueden ser de 33^oC y 22^oC.

Figura 2.12: Etapas Fenológicas VE y V1 (http://www.perezcastro.es).

reproductivo. Las subdivisiones del estadio vegetativo (V) son designadas como V1 (***Figura*** 2.12), hasta V(n), siendo (n) la última hoja antes del panojamiento (VT) para el cultivar considerado (Ritchie y Hanway, 1986). El número de hojas varía de acuerdo al cultivar y el efecto ambiental (***Tabla*** 2.2).

Tabla 2.2: Etapas Fenológicas del Maíz.

Etapa	DAS	Características
VE	5	El coleoptilo emerge de la superficie del suelo.
V1	9	Es visible el cuello de la primera hoja.
V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.
Vn	-	Es visible el cuello de la hoja número n.
VT	55	Es completamente visible la última rama de la panícula.
R0	57	Antesis o floración masculina.
R1	59	Son visibles los estigmas.
R2	71	Etapa de ampolla.
R3	80	Etapa lechosa.
R4	90	Etapa masosa.
R5	102	Etapa dentada.
R6	112	Madurez fisiológica

Como datos adicionales el *DAS* es el número aproximado de días después de la siembra en tierras bajas tropicales. Para la etapa vegetativa *Vn* (***Figura*** 2.13) el factor n es igual al numero definitivo de hojas que tiene la planta por lo que n generalmente fluctúa entre 16 y 22, pero para la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo (Fassio y Carriquiry, 1998).

A partir de la etapa reproductiva *R0* (***Figura*** 2.14) el polen se comienza a arrojar, en la etapa *R2* los granos se llenan con un liquido claro y se puede ver el embrión, para la etapa *R3* los granos se llenan con un líquido lechoso

Figura 2.13: Etapas Fenológicas V2, V3 ... Vn (http://www.perezcastro.es).

Figura 2.14: Etapas Fenológicas VT, R0 y R1 (http://www.perezcastro.es).

blanco, continuando en la etapa *R4* los granos se llenan con una pasta blanca donde el embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano, por consiguiente en la etapa *R5* la parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una *línea de leche* cuando se observa el grano desde el costado, por ultimo en la etapa *R6* (***Figura*** 2.15) se forma una capa negra que es visible en la base del grano, la humedad del grano es generalmente de alrededor del 35 %. Las etapas de crecimiento anterior se pueden agrupar en cuatro periodos como se muestra a continuación (***Tabla*** 2.3):

Tabla 2.3: Periodos de Crecimiento.

Periodos	**Característica**
VE y V1	Crecimiento de las plántulas.
V2, V3 ... Vn	Crecimiento vegetativo.
VT, R0 y R1	Floración y fecundación.
R2, R3 ... R6	Llenado de grano y madurez.

La raíz del maíz muestra una estructura radicular compleja compara da con el sistema radicular más simple de otras plantas. En el primer caso, las raíces se forman endógenamente en el embrión y consisten de la raíz primaria y de las raíces escutelares que aparecen durante la germinación.

Las raíces escutelares seminales son una parte importante para la captación inicial de agua, nutrientes y para el establecimiento de la plántula en el suelo. Las raíces post-embrionarias se forman después de la germinación y continúan creciendo hasta formar un sistema radicular altamente ramificado en las plantas adultas.

Figura 2.15: Etapas Fenológicas R2, R3 ...R6 (http://www.perezcastro.es).

El sistema radicular post-embrionario está formado por raíces de corona o nodales (RC) y de raíces aéreas (RA) que surgen tardíamente en los nodos del tallo (Singh y Jordan, 2010). El sistema radical del maíz consiste de dos sistemas de raíces: (1) raíces seminales cuyo origen está presente en el embrión y (2) raíces adventicias que se originan del tallo después de la germinación (Kiesselbach, 1980).

2.5.3. Fertilización

El maíz necesita para su desarrollo unas ciertas cantidades de elementos minerales, las carencias en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral está en defecto o exceso. Se recomienda un abonado de suelo rico en *Fósforo (P)* y *Potasio (K)*, en cantidades de 0.3 kg de P en 100 Kg de abonado, también un aporte de *Nitrógeno (N)* en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo (Chandler y Nardmann, 2008).

El abonado se efectúa normalmente según las características de la zona de plantación, por lo que no se sigue un abonado riguroso en todas las zonas por igual, no obstante se aplica un abonado muy flojo en la primera época de desarrollo de la planta hasta que la planta tenga un número de hojas de 6 a 8. A partir de esta cantidad de hojas se recomienda una mezcla de abonado (***Tabla*** 2.4):

Tabla 2.4: Cantidades Optimas de Fertilización.

Fertilizante	**Cantidad**
Nitrógeno (N)	82 %
Fosforo (P_2O_5)	70 %
Potasio (K_2O)	92 %

Durante la formación del grano de la mazorca los abonados deben de ser mínimos, así que se deben de realizar para el cultivo de maíz un abonado de fondo en cantidades de $825Kg/ha$ durante las labores de cultivo.

Los abonados de cobertera son aquellos que se realizan cuando aparecen las primeras hojas de la planta (***Tabla*** 2.5):

Tabla 2.5: Fertilizantes de Cobertura.

Fertilizante	**Cantidad**
Nitrato Amónico de Calcio	$500kg/ha$
Rea	$295kg/ha$
Solucion Nitrogenada	$525kg/ha$

Es importante realizar un abonado ajustándose a las necesidades presentadas por la planta de una forma controlada e inteligente, si la planta de maíz carece de alguno de los tres fertilizantes principales mencionados anteriormente esta puede presentar ciertos problemas en su salud que puede afectar su crecimiento o calidad (Nardmann y Werr, 2009), a continuación se muestran algunos problemas que pueden surgir debido a la falta de estos fertilizantes:

- **Nitrógeno**: La cantidad de nitrógeno a aplicar depende de las necesidades de producción que se deseen alcanzar así como el tipo de textura del suelo, la cantidad a aplicar va desde 20 a 30 Kg de *N* por *ha*. Un déficit de N puede afectar a la calidad del cultivo, los síntomas se ven más reflejados en aquellos órganos fotosintéticos, las hojas, que aparecen con coloraciones amarillentas sobre los ápices y se van extendiendo a lo largo de todo el nervio, las mazorcas aparecen sin granos en las puntas.

- **Fósforo**: Sus dosis dependen igualmente del tipo de suelo presente ya sea rojo, amarillo o suelos negros, el fósforo da vigor a las raíces, su déficit afecta a la fecundación y el grano no se desarrolla bien.

- **Potasio**: Debe aplicarse en una cantidad superior a 80-100 ppm en caso de suelos arenosos y para suelos arcillosos las dosis son más elevadas de 135-160 ppm. La deficiencia de potasio hace a la planta muy sensible a ataques de hongos y su porte es débil, ya que la raíz se ve muy afectada, las mazorcas no granan en las puntas.

Otros elementos como el *Boro (B)*, *Magnesio (Mg)*, *Azufre (S)*, *Molibdeno (Mo)* y *Zinc (Zn)*, son nutrientes que pueden a parecer en forma deficiente o en exceso en la planta, las carencias del boro aparecen muy marcadas en las mazorcas con inexistencia de granos en algunas partes de ella.

Los primeros estadios de desarrollo del maíz son muy sensibles a la falta de agua y nutrientes por lo que la consolidación del cultivo demanda una buena inversión en insumos y labores culturales. Los suelos donde se cultiva el maíz, por lo general no tienen la capacidad para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento eficiente de las plantas o no otorgan el rendimiento adecuado, para ello se debe recurrir al empleo de fertilizantes. El estudio de los factores que determinan la capacidad de absorción de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo, el potasio y algunos micronutrientes es un tema de actualidad enfocado a incrementar la producción especialmente en suelos ácidos y alcalinos, los cuales representan la mayor superficie cultivable del planeta (Lopez y Werr, 2009).

2.5.4. Requerimientos Climáticos

El maíz debido a sus tipos ampliamente divergentes crece en un amplio rango de condiciones climáticas, no pudiéndose establecer límites precisos. Es cultivado en áreas tropicales, subtropicales y templadas y en altitudes que van desde el nivel del mar hasta varios miles de metros sobre el mismo, pero presenta un límite, producto de una combinación de temperaturas bajas con el período libre de heladas (Shaw, 1988), a continuación se muestran algunos factores climáticos que pueden influir en el crecimiento del maíz:

- **Temperatura**: Aunque el maíz es originario de los Trópicos, el crecimiento óptimo del cultivo ocurre a temperaturas de 24 a 30°C. Temperaturas nocturnas altas no favorecen el crecimiento del cultivo, sino que incrementan las tasas de respiración y de esta forma se reduce el peso seco acumulado durante el día por la fotosíntesis.

- **Radiación**: La energía solar utilizada por el maíz es la proveniente de longitud de onda entre 0.4 y 0.7 micras, la llamada radiación visible del espectro. Radiación alta y temperaturas excesivamente altas, pueden causar que la fotosíntesis del estrato superior de hojas cese por el fenómeno de fotoinhibición. La cantidad de radiación potencialmente interceptable en un período fenológico específico está determinada por la radiación incidente diaria, la que a su vez determina la tasa de crecimiento del cultivo, y por la temperatura, que define la duración del periodo. La cantidad de radiación interceptada en el período crítico de floración, define el número de granos, mientras que aquella interceptada durante el período de llenado de granos, define el peso de mil granos (Tollenaar, 1977).

- **Balance Hídrico**: La disponibilidad de agua de un suelo, depende de la profundidad y textura del mismo (el agua en suelos de tipo arenoso está retenida con menos fuerza que en suelos de tipo arcilloso). Es así que para evaluar las relaciones hídricas de las plantas es necesario evaluar cuantitativamente la humedad disponible en el suelo, las características de retención de agua y la demanda atmosférica.

Los balances hidricos presentan una alta variabilidad debido a que están determina dos en primer término, por las precipitaciones (muy variables en cantidad y momento de ocurrencia), y por las distintas capacidades de almacenaje de agua de los suelos. Cuando se proyecta para una serie de años, el balance hídrico promedio de una región tiene alto valor predictivo, no obstante, para un año y un momento particular tiene bajo valor predictivo.

2.6. Electrónica en Agricultura de Precisión

Una de las tecnologías que es promisoria para el mejoramiento del sector productivo a nivel predial es la agricultura de precisión. Esta herramienta asociada a las tecnologías de la información y basada en el posicionamiento satélital, consiste en obtener datos georreferenciados de los predios

para un mejor conocimiento sobre su variabilidad espacial a nivel de rendimiento y calidad (Mantovani y Magdalena, 2014). En general los sitios pueden presentar distintos tipos de variabilidad[8], mientras mayor sean los diferenciales de rendimiento existente en un sitio, mayor será el éxito de obtener resultados con una estrategia de aplicación variable de recursos[9].

En la actualidad las tecnologías asociadas a la aplicación variable de insumos son una realidad y pueden estar al alcance de todos. Estas herramientas de la agricultura de precisión corresponden a máquinas y equipos inteligentes que ejecutan tareas precisas con el apoyo de la informática, la electromecánica, el GPS, etc; las cuales integradas a los sistemas comunicacionales permiten una gestión oportuna de las acciones productivas.

Las maquinarias o equipos reciben en su computadora las órdenes de aplicación variable de insumos que están debidamente georreferenciadas, las cuales hacen que actuadores hidráulicos o electrónicos realicen la labor de aplicar los insumos en el lugar y la cantidad correcta. Este factor que permite generar registros de las acciones desarrolladas como certificación de calidad, sí son integradas a herramientas comunicacionales pueden ser evaluadas a tiempo real. Entre estas herramientas electrónicas se encuentran el monitor de rendimiento, el banderillero satelital y el sistema autopiloto.

2.6.1. Comunicación Serial

La *Comunicación Serial* consiste en el envío de un bit de información de manera secuencial, ésto es, un bit a la vez y a un ritmo acordado entre el emisor y el receptor. La comunicación serial en computadores ha seguido los estándares definidos en 1969 por el RS-232 (Recommended Standard 232) que establece niveles de voltaje, velocidad de transmisión de los datos, etc. Por ejemplo, este protocolo establece un nivel de -12v como un uno lógico y un nivel de voltaje de +12v como un cero lógico (por su parte, los microcontroladores emplean por lo general 5v como un uno lógico y 0v como un cero lógico) (Axelson, 2007).

Existen en la actualidad diferentes ejemplos de puertos que comunican información de manera serial (un bit a la vez). El conocido como *puerto serial* ha sido gradualmente reemplazado por el puerto USB (Universal Serial Bus) que permite mayor versatilidad en la conexión de múltiples dispositivos. Aunque en naturaleza serial, no suele referenciarse de esta manera ya que sigue sus propios estándares y no los establecidos por el RS-232. Existen dos tipos de comunicación, estas son asíncrona y sincronía, en la comunicación asincrónica (***Figura*** 2.16), la velocidad de envío de los datos es acordada a priori entre el emisor y el receptor. En la comunicación sincrónica, el envío de los datos es sincronizado por el emisor a partir de un pulso constante de reloj (Clock), con cada pulso envía un nuevo dato.

[8]Topográfica, génesis de suelo, distinto tipo de manejo, etc.
[9]Agua, fertilizantes, semillas, agroquímicos, etc.

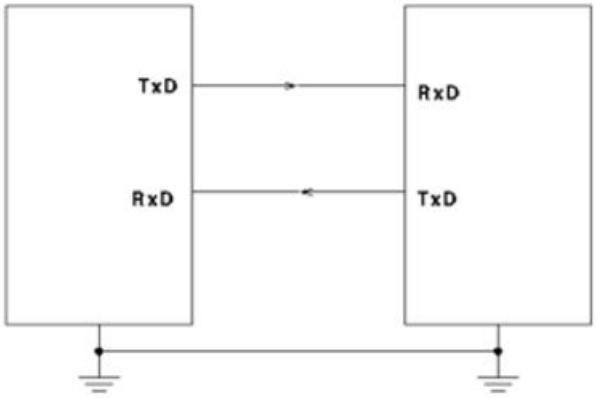


Figura 2.16: Diagrama de Comunicación Serial (http://www.dtic.upf.edu).

2.6.2. App Inventor 2

En la actualidad, la tecnologías de la telecomunicaciones ha avanzado enormemente permitiendo crear dispositivos móviles o celulares cada vez mas sofisticados y con mayor funciones, estos celulares cuentan con la característica principal que llevan instalado un sistema operativo el cual les permite instalar aplicaciones (App) para distintos propósitos, que van desde mostrar información del clima, localización del celular o hasta entretenimiento, es por esto que ha estos dispositivos se les a llamado *smartphones* todo esto a hecho que tengan mayor popularidad entre las personas y que la mayoría de la población mundial cuenten con almenos un *smartphone*.

Uno de los sistemas operativos para *smartphones* con mayor popularidad es *Android* el cual es un sistema operativo basado en el núcleo Linux, Android, al contrario que otros sistemas operativos para dispositivos móviles como iOS o Windows Phone, se desarrolla de forma abierta y se puede acceder tanto al código fuente como a la lista de incidencias donde se pueden ver problemas todavía no resueltos y reportar problemas nuevos.

Las aplicaciones se desarrollan habitualmente en el lenguaje Java con Android Software Development Kit (Android SDK), pero están disponibles otras herramientas de desarrollo, incluyendo un Kit de Desarrollo Nativo para aplicaciones o extensiones en C o C++. El desarrollo de aplicaciones para Android no requiere aprender lenguajes complejos de programación. Todo lo que se necesita es un conocimiento aceptable de Java y estar en posesión del kit de desarrollo de software o *SDK* provisto por Google el cual se puede descargar gratuitamente (Android, 2011).

Para esta investigación se desarrollara una aplicación móvil para controlar el prototipo electrónico y almacenar en el celular la información obtenida por los sensores y el GPS. Para esto, se utilizara la plataforma de desarrollo de software App Inventor 2, el cual es una plataforma gratuita desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) cuya característica principal es que es una plataforma en linea la cual no requiere de instalar ningún software en la computadora y permite desarrollar aplicaciones para Android mediante un sistema visual que consiste en arrastrar y soltar bloques de control, evitando así lenguajes de programación complejos basados en texto.

App Inventor cuenta con bloques de control, lógicos, matemáticos, texto, listas, colores, variables y procedimientos. Estos bloques pueden interactuar unos con otros ensamblándose para realizar una determinada tarea o acción dependiendo lo que el programador desee realizar, por ejemplo, se podría diseñar un botón de acción para iniciar o pausar la recolección de datos del sensor (Wolver y Abelson, 2011).

App Inventor cuenta con dos entornos principales para el desarrollo de las aplicaciones, el primero llamado *Entorno de Diseño* (***Figura*** 2.17) sirve para agregar los elementos visuales que tendrá la aplicación, como pueden ser botones, texto, imágenes y listas, este entorno cuenta con cuatro secciones:

- **Paleta**: En esta sección aparecen todos los elementos que se pueden agregar a la aplicación.
- **Vista**: En esta sección se muestra el diseño en general de la aplicación, aquí es donde se arrastran los elementos de la paleta para luego acomodarlos según sea el caso.
- **Componentes**: Esta lista muestra los componentes que se han agregado así como su nombre, y además si estos componentes están dentro de otros entonces muestra el orden de anidación de estos.
- **Propiedades**: Esta sección muestra las distintas propiedades que tiene cada elemento que se ha agregado a la aplicación, como por ejemplo, se puede cambiar el nombre, el tamaño, la forma, el color, etc.

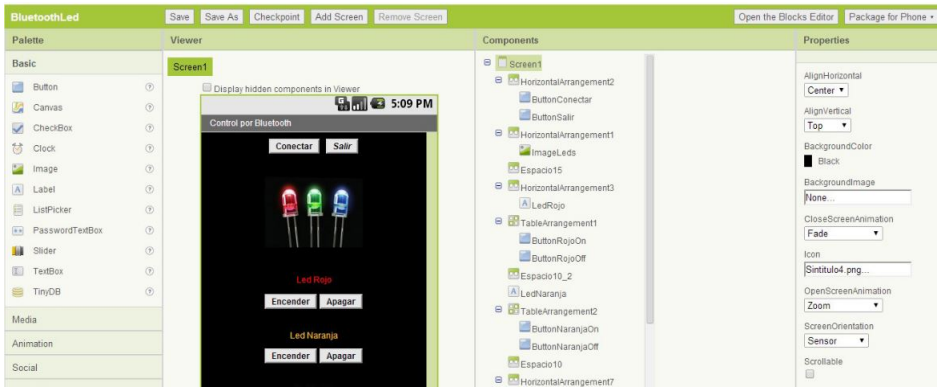


Figura 2.17: Interfaz de Diseño (ai2.appinventor.mit.edu/).

El segundo entorno es llamado *Entorno de Programación* (***Figura*** 2.18) aquí es donde se muestran los bloques de control los cuales permiten agregar las funciones que tendrá cada elemento de la aplicación así como su función. Para la programación existen distintos tipos de bloques cada uno con distintas funciones y la forma de programar es ensamblando cada bloque siempre y cuando estos sean compatibles, la detección de errores de programación ocurre en tiempo real, es decir, a medida que se van ensamblando los bloques si se detecta algún error aparecerá un mensaje en la zona inferior del entorno.

Una vez que la lógica de programación se haya construido mediante los bloques mencionados se puede proceder a compilar la aplicación para instalarla en el *smartphone*, esto se puede realizar de dos formas, la primera de

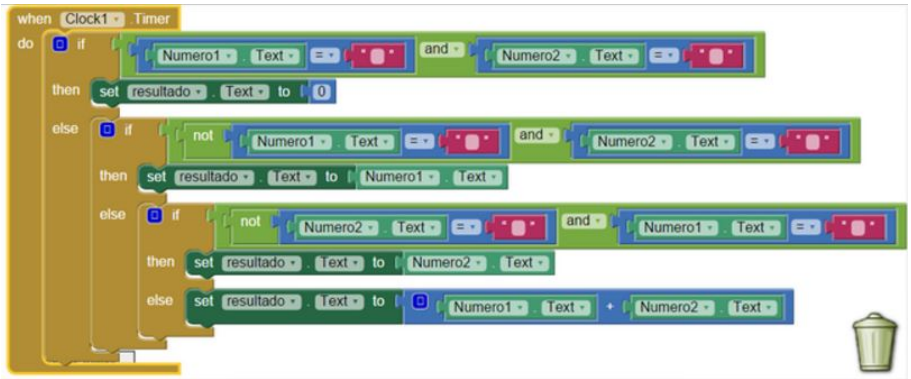


Figura 2.18: Interfaz de Programación (ai2.appinventor.mit.edu/).

ellas es generando un código QR el cual se puede leer desde la aplicación de App Inventor desde el móvil y la segunda forma es generando un código alfanumérico el cual se debe de introducir manualmente en la misma aplicación, una vez instalada la aplicación aparecerá en el menú de Android junto a las demás aplicaciones del *smartphone*.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

Para poder llevar a cabo esta investigación se utilizaron distintos equipos electrónicos y software de programación y procesamiento de imágenes. Iniciando con el uso del GPS Diferencial donde se utilizaron dos equipos GPS GeoMax Zenith 25 en la cual uno se configuró como la estación base y el otro como la estación móvil o rover, como se explicará mas adelante en este trabajo la corrección de las mediciones entre ambos permitieron tener precisiones centimétricas por lo cual se obtuvieron e integraron los puntos de interés georeferenciados de la parcela con mediciones GPS para la generación del mapa de rendimiento.

Después se procedió a diseñar e implementar el prototipo electrónico el cual lleva el sensor de humedad y temperatura así como el dispositivo Bluetooth, estos se encuentran conectados a una plataforma Arduino UNO que lleva dentro un microcontrolador el cual puede ser programado desde una computadora con un lenguaje de programación C-ANSI adaptado para componentes electrónicos, además se utilizaron componentes electrónicos secundarios como resistencias, potenciómetros, leds, etc. Posteriormente se procedió a diseñar la aplicación móvil que sera utilizada por el usuario final, esta aplicación deberá tener una interfaz amigable fácilmente de utilizar con distintas opciones, la cual muestra los datos recibidos y cuenta con distintas funciones de control para comunicarse con el prototipo electrónico todo esto utilizando el software App Inventor.

Seguidamente se descargaron y se procesaron imágenes satelitales del área de estudio donde se encuentre la parcela agrícola en distintas bandas espectrales, el sensor de percepción remota utilizado fue LandSat 8 cuya principal ventaja es que las imágenes son de disposición gratuita y cuenta con resolución espectral suficiente para analizar las propiedades biofísicas de la vegetación, las bandas con las que se trabajó para calcular los índices de vegetación son 3, 4 y 5 las cuales corresponden al verde, rojo, e infrarrojo cercano; estas imágenes se procesaron con un software especializado como ENVI y ArcGIS. Finalmente se procesaron e integraron los datos cargados a la aplicación móvil para obtener los puntos de interés de la parcela, los cuales cuentan con información sobre latitud, longitud, humedad y temperatura independiente y donde cada punto estará definido en función de los niveles digitales del pixel debido al resultado de las imágenes procesadas para indicar el vigor vegetal del cultivo.

Como se mencionó en el ***Capítulo*** 1 esta investigación integra distintas ramas de la ciencia y tecnologías como el GPS para el banderilleo satelital el cual se utilizó para definir el polígono de la parcela, se utilizaron componentes de la electrónica para diseñar y desarrollar un prototipo electrónico capaz de sensar la humedad y temperatura de puntos específicos del área

de estudio el cual se puede manipular desde una aplicación de celular diseñada y desarrollada para funcionar en el sistema operativo *Android* que es capaz de guardar la información generada por el prototipo en archivos de texto para luego ser procesada e integrada a un SIG para ser analizado y poder proponer cuantificaciones de suministro de fertilizantes para distintas áreas de la parcela. Resumiendo, esta investigación esta integrada por 3 ramas principales (***Figura*** 3.1) las cuales son *GPS*, *Electrónica* e *Informática* así como *Percepción Remota*.

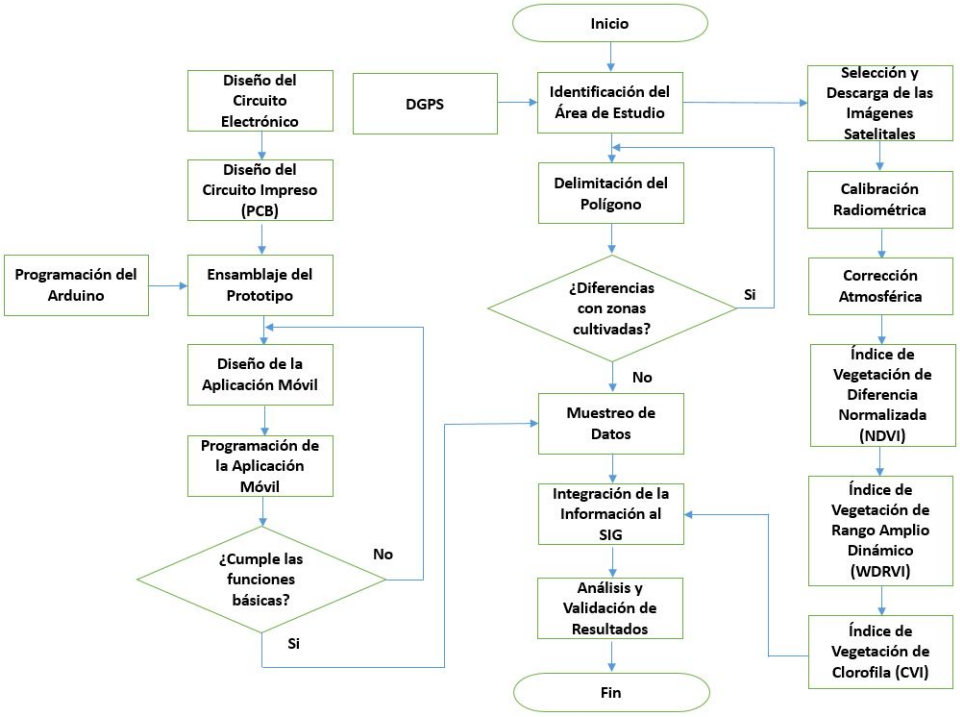


Figura 3.1: Esquema Metodológico.

El inicio de la investigación consistió en la identificación del área de estudio para aplicar DGPS para delimitar el polígono, posteriormente se desarrolla el prototipo electrónico y la aplicación móvil, una vez realizadas ambas etapas se procedió a realizar muestreos de humedad relativa y temperatura ambientales durante un lapso de dos horas en horario diurno (matutino), una vez al mes de la parcela, esto con el fin de comprobar el funcionamiento del prototipo electrónico y conocer como varían los datos en función de la hora del día, de igual forma se recolectaron las imágenes satélitales cercanas a las fechas del muestreo para calcular los indices de vegetación e integrar los datos en un SIG, cada etapa mencionada se describirá a detalle en la secciones siguientes.

3.1. Delimitación del Polígono

Como se mencionó en el ***Capítulo*** 1 es preciso realizar la delimitación del polígono de la parcela para georreferenciar el área de estudio. Dicho procedimiento se realizó por medio del proceso llamado banderilleo satelital, el cual consiste en realizar un recorrido o circuito en el área de estudio

tomando mediciones GPS cada segundo utilizando una estación auxiliar configurada como *base* cuya función sera realizar correcciones en las mediciones del equipo móvil para mejorar la precisión. En otras investigaciones (Bragachini y Bianchini, 1999) se utiliza este método para automatizar maquinaria agrícola al momento de realizar recorridos por la parcela realizando sus funciones, para esta investigación se utilizará este método para delimitar el área de estudio obteniendo así la mejor precisión posible.

3.1.1. Área de Estudio

El área de estudio es una parcela de siembra y cosecha de maíz ubicada a $21Km$ de la ciudad de Culiacán, Sinaloa (***Figura*** 3.2) cuyas coordenadas geográficas centrales son *latitud* $24^o36'35{,}53''$N y *longitud* $107^o29'34{,}58''$O. La parcela tiene forma irregular, el terreno presenta daños en el suelo como contaminación por salinidad evitando que se pueda sembrar maíz en el área debido a una zona acuícola cercana por lo que es necesario aprovechar el máximo rendimiento posible de la parcela para la cosecha de maíz.

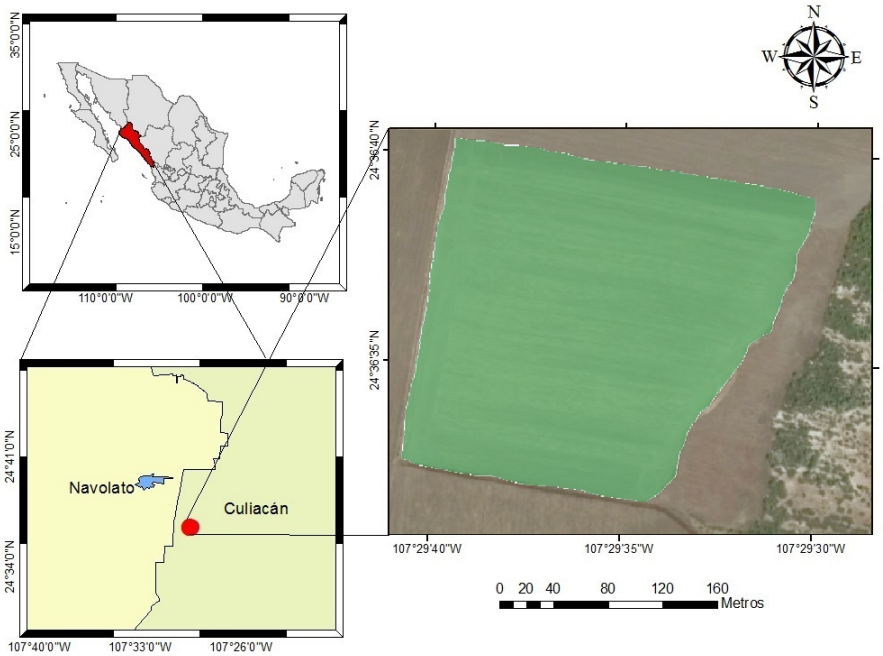


Figura 3.2: Imagen Satélital del Área de Estudio (Cortesía de Google Earth).

Como se observa en la (***Figura*** 3.2) la zona de color verde indica el área donde se cultiva el maíz (suelo apto para siembra) en la cual el área dañada se encuentra al este (no apta para siembra), el procedimiento de banderilleo satelital se aplicó solo para el área utilizable. En la sección siguiente se hablará del proceso de banderilleo satelital para obtener el polígono o contorno de la parcela con coordenadas precisas, la importancia de realizar este procedimiento en el área cultivable es en mejorar el rendimiento en el uso y aplicación de insumos como fertilizantes, esto permitirá a su vez obtener

mayor ingreso económico que permitirá al agricultor aplicar tratamientos químicos al área dañada para habilitarla para el cultivo.

Esta habilitación de suelo puede ser temporal, es decir, a medida que se vaya incrementando el recurso económico se habilitarán porciones de suelo cada vez mayor, hasta poder ocupar el área completa, de este modo los beneficios del mapa de rendimiento permitirán recuperar el área dañada a través del tiempo. A su vez, el mapa de rendimiento puede aplicarse para parcelas de mayor tamaño para incrementar los beneficios ya que una parcela de mayor tamaño implica el uso de mayor cantidad de fertilizantes por lo que reducir el uso de estos implica reducir la contaminación química al suelo.

3.1.2. Banderilleo Satélital

Teniendo localizada el área de estudio se procedió a realizar el proceso de banderilleo satelital, para esto se requiere de precisiones centimétricas por lo que se seleccionó el receptor geodésico GPS Geomax Zenith 25 el cual ofrece las características necesarias (***Tabla*** 3.1) para alcanzar el objetivo deseado.

Tabla 3.1: Características GeoMax Zenith 25 (Internet).

Característica	**Dato**
Tecnologia Q-Lock	Alta disponibilidad de fix.
Canales	120, doble frecuencia
N.Max. de Satelites	60 simultáneos
Rastreo GPS	L1, L2, L2C
Rastreo GLONASS	L1, L2
Rastreo Galileo	*
Velocidad de Posicionamiento	20Hz, 5Hz
SBAS	EGNOS, WAAS, MSAS, GAGAN
Estatico Horizontal	5 mm $\pm$ 0.5 ppm (rms)
Estatico Vertical	10 mm $\pm$ 0.5 ppm (rms)
Estatico largo, horizontal	3 mm $\pm$ 0.1 ppm (rms)
Estatico largo, vertical	3.5 mm $\pm$ 0.4 ppm (rms)
Cinematico Horizontal	10 mm $\pm$ 1 ppm (rms)
Cinematico Vertical	20 mm $\pm$ 1 ppm (rms)

Para realizar el procedimiento se utilizaron dos equipos como los citados anteriormente, uno de ellos se configuró como estación base y el otro como estación móvil. El equipo como estación base (***Figura*** 3.3) se colocó a 59 metros del límite con el área dañada aproximadamente al límite oeste de la parcela, entonces se procedió a realizar un circuito cerrado recorriendo el borde del área cultivada, esto para obtener mejor precisión con el equipo móvil (***Figura*** 3.4) el cual se configuró con una altura de 2m.

Figura 3.3: Estación Base GPS.

Figura 3.4: Estación Móvil GPS.

3.1.3. Procesamiento de las Mediciones GPS

Una vez obtenidas las mediciones resultantes del banderilleo satelital, estas se procesaron utilizando el software *TopCon Tools*. Para esto se extrajeron los archivos RAW con extención `.m00` de la memoria extraible de los equipos GPS y se cargan al software mencionado, a continuación, se explicará detalladamente el proceso de post-procesamiento de las mediciones.

TopCon Tools (***Figura*** 3.5) es un software para el procesamiendo de mediciones GPS, proporciona un entorno preparado para el post-procesamiento de los datos ya sean que contengan el formato estándar de la marca o bien de cualquier otra, esto lo hace bastante útil, pues permite procesar una gran variedad de formatos producidos por distintos tipos y marcas de equipos GPS.

La ventana principal del software cuenta con cuatro secciones principales, la barra de menús cuya función es desplegar las distintas funciones y opciones con las que cuenta el programa, la segunda es la barra de herramientas las cual contiene las acciones o herramientas disponibles para

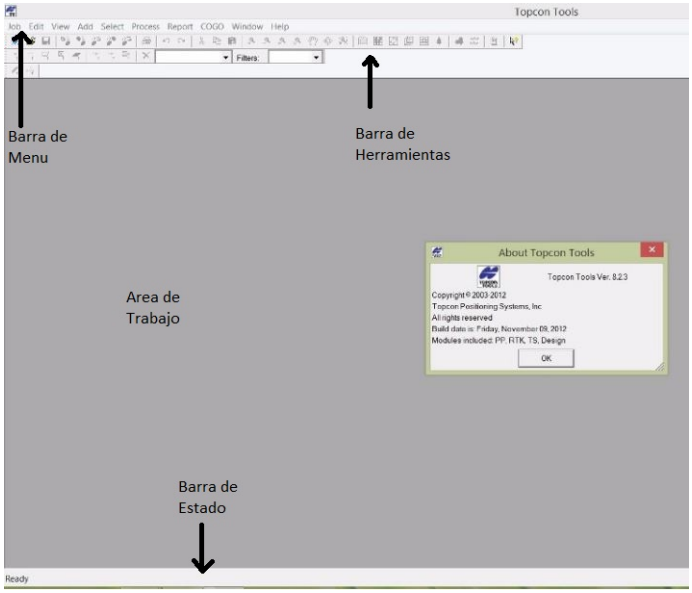


Figura 3.5: Ventana Principal TopCon Tools.

procesar o editar el trabajo que se este realizando, la tercera es el área de trabajo que es donde se muestran los resultados de las mediciones ya sean en tabla de datos o vista de mapa para una representación visual, la cuarta y ultima sección es la barra de estados, que muestra lo que se encuentra realizando el programa en tiempo real.

Para iniciar con el post-procesamiento de las mediciones se procede a abrir la opción de *Job Configuration* (Configuración de Trabajo), con esto se abre una ventana nueva la cual muestra los diferentes parámetros que se pueden configurar dependiendo del tipo de trabajo que se vaya a realizar, esto con el fin de optimizar los resultados obtenidos y ajuste en las mediciones (***Figura*** 3.6).

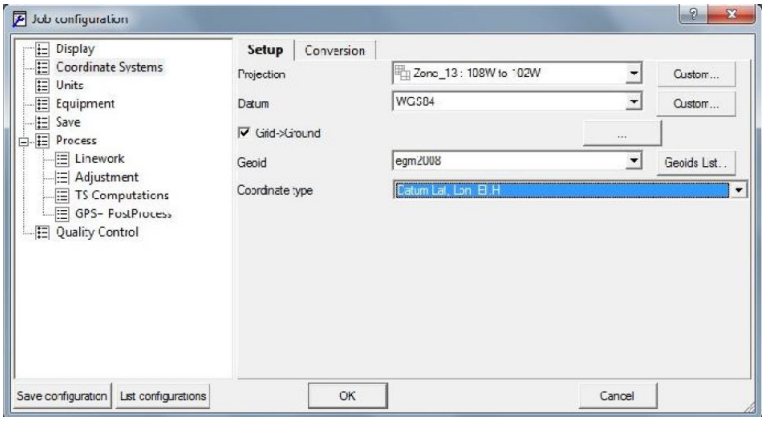


Figura 3.6: Ventana Configuración TopCon Tools.

Algunas de las opciones que se pueden configurar son las opciones de visualización de las precisiones, sistema de tiempo y formato de ángulos; para el sistema de coordenadas se puede especificar el tipo de proyección, datum, geoide y el tipo de coordenadas. También se pueden seleccionar las

unidades con las que se necesiten trabajar ya sean lineales o angulares, por ultimo se pueden configurar los ajustes de control de calidad, propiedades de proceso y control de calidad (***Figura*** 3.7). Esta ultima opción es muy importante ya que aquí se tiene que especificar la precisión que tiene el equipo GPS con el que se realizaron las mediciones para que el software procese la informacion con la mejor calidad posible.

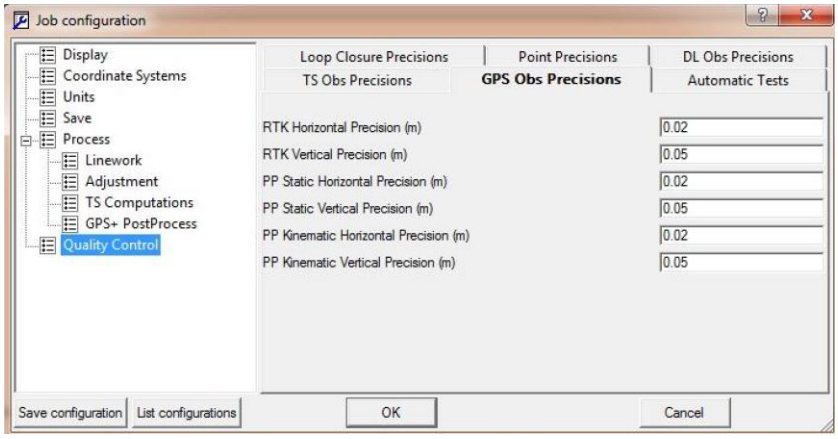


Figura 3.7: Ventana de Control de Calidad TopCon Tools.

Aquí se pueden editar además las opciones para las precisiones de observaciones con nivel digital (DL), estación total (TS) y GPS; en la pestaña de Precisiones de Punto (Point Precisions) se pueden establecer las precisiones vertical y horizontal para las coordenadas de puntos estáticos y cinemáticos, la pestaña de Precisiones de las Observaciones GPS (GPS Obs Precisions) nos permite definir la precisión vertical y horizontal de los vectores GPS RTK, estáticos y cinemáticos de post-procesamiento. Cabe mencionar que el programa no toma en cuenta los vectores calculados que no cumplan con la precisión horizontal y vertical, por lo que no serán utilizados para el ajuste final del procesamiento de las mediciones. Por último otra pestaña interesante es la de Precisiones de Error de Cierre (Loop Closure Precisions) en la cual se pueden establecer las tolerancias absolutas y relativas de error de cierre.

Una vez configuradas las opciones correspondientes para el trabajo a realizar se procede a la carga de los datos con las mediciones GPS, se descargan los datos de las memorias extraibles, como se utilizaron dos equipos GPS entonces se obtuvieron dos archivos, uno de la estación base llamado **`BASE1.m00`** y el otro de la estación móvil llamado **`ROVER1.m00`** ambos con un tamaño en disco de 1.5MB aproximadamente. Como se mencionó anteriormente, *TopCon Tools* admite diversos tipos de archivos (***Figura*** 3.8) incluidos el formato de *GeoMax*.

Además admite el popular formato *RINEX* el cual es un formato universal admitido por cualquier software de procesamiento de observaciones GPS, además se pueden importar archivos de coordenadas o crear un formato personalizado, si se desea cargar un archivo de coordenadas el software cuenta con formatos predefinidos donde solo se debe de especificar el nombre del punto, sus coordenadas UTM, altura y un código de identificación del punto. Una vez cargados los datos se procede al procesamiento y

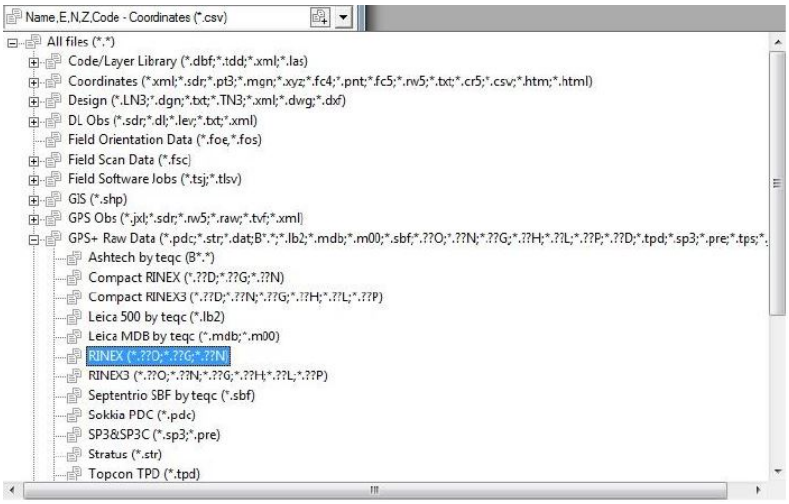
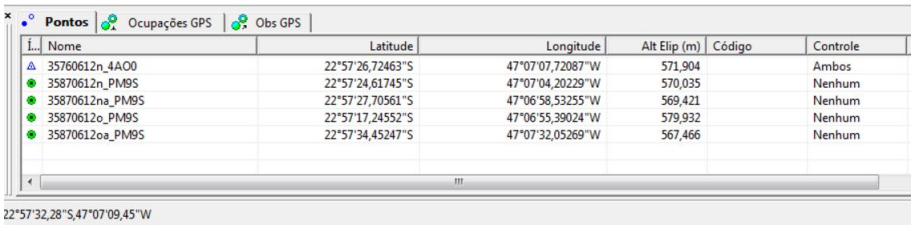


Figura 3.8: Lista de Tipos de Archivos Reconocibles por TopCon Tools.

visualización de los mismos para lo cual el software cuenta con diferentes métodos de visualización de resultados.

Entre las distintas opciones de visualización que nos permite apreciar el software van desde un mapa de puntos y vectores (***Figura*** 3.10) hasta una cuadrícula de ocupaciones y tabla de datos (***Figura*** 3.9), dependiendo del tipo de trabajo que estemos realizando es el tipo de vista que se necesitará desplegar. Además, existe una conexión entre los distintos tipos de vistas, por lo que si se selecciona los datos de una tabla se seleccionan los datos correspondientes en otros tipos de vista que estén abiertas al mismo tiempo.



Pontos | Ocupações GPS | Obs GPS

I...	Nome	Latitude	Longitude	Alt Elip (m)	Código	Controle
	35760612n_4AO0	22°57'26,72463"S	47°07'07,72087"W	571,904		Ambos
	35870612n_PM9S	22°57'24,61745"S	47°07'04,20229"W	570,035		Nenhum
	35870612na_PM9S	22°57'27,70561"S	47°06'58,53255"W	569,421		Nenhum
	35870612o_PM9S	22°57'17,24552"S	47°06'55,39024"W	579,932		Nenhum
	35870612oa_PM9S	22°57'34,45247"S	47°07'32,05269"W	567,466		Nenhum

22°57'32,28"S,47°07'09,45"W

Figura 3.9: Vista Tabular que muestra información detallada de las mediciones GPS.

La vista tabular muestra una tabla con la información sobre los puntos cargados, esta información puede ser las coordenadas geodésicas, la altura de los puntos y la desviación estándar de las mediciones. Este tipo de vista tiene sus ventajas con respecto a otros tipos de vista, por ejemplo, se pueden observar fácilmente la información estadística de cada punto, esto es mas sencillo de observar cuando se procesan una gran cantidad de datos.

El siguiente tipo de vista se llama *vista de mapa* (***Figura*** 3.10), aquí se muestra una representación gráfica de los puntos y vectores usados en el trabajo. Este tipo de vista tiene sus ventajas con respecto a la tabular, aquí se aprecia gráfica y visualmente la ubicación de los puntos medidos en un plano esto para corroborar visualmente las mediciones, como se menciono anteriormente las vistas están conectadas entre si didácticamente, por lo

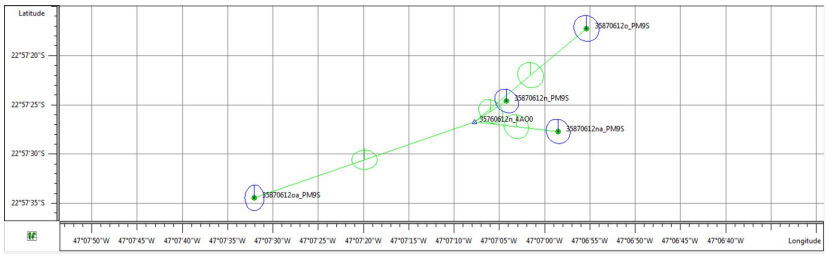


Figura 3.10: Vista de Mapa que muestra información gráfica de las mediciones GPS.

que al seleccionar algún punto de la vista tabular este también resaltara en la vista de mapa, cabe mencionar que los vectores aceptados por los cálculos del software aparecerán de color verde mientras que los rechazados (los que no cumplen con la precisión) aparecerán de color rojo.

Cuando se trabaja con datos crudos GPS (RAW Data), se debe de procesar primero las observaciones GPS para poder obtener primero los vectores de observación y las coordenadas aproximadas de los puntos observados. Se debe de ser muy cuidadoso con esta parte ya que para algunas aplicaciones, la calidad de las coordenadas aproximadas pueden ser lo suficientemente buenas, pero para aplicaciones de alta precisión se debe de realizar un ajuste en las observaciones para mejorar aun mas las coordenadas del punto.

Para realizar el proceso descrito en el párrafo anterior se procede a abrir función de procesamiento (***Figura*** 3.11) la cual procesa observaciones o vectores de acuerdo con los parámetros introducidos y seleccionados en el control de calidad, para esto se puede procesar todas las observaciones GPS o solamente algunas observaciones que hayan sido seleccionadas previamente.

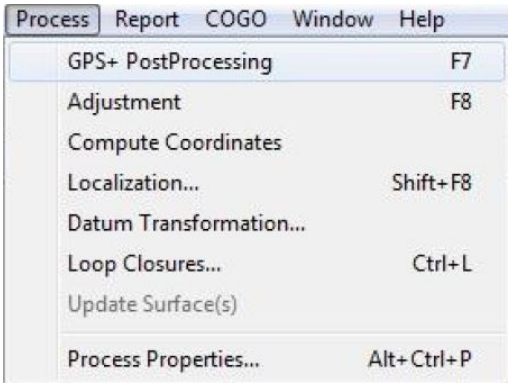


Figura 3.11: Menu de Procesamiento de Datos.

Para el post-proceso de las observaciones se debe de seleccionar la opción *GPS+ PostProcessing*, se pueden cambiar o establecer las propiedades de procesamiento en la opción *Process Properties*, de igual forma si es necesario realizar un ajuste de las mediciones utilizando el método de mínimos cuadrados el cual debe de ser posterior al post-procesamiento se debe de seleccionar la opción *Adjustment*.

Para iniciar con el proceso de los puntos medidos con el equipo GPS se debe tener un punto de apoyo minimamente, el cual debe de tener coordenadas precisas y conocidas. Para obtener este punto se procederá a utilizar la estación *CULC* perteneciente al INEGI la cual es la institución responsable de establecer normativas para trabajos geodésicos y cuenta además con la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) la cual cubre toda la república mexicana colocando un punto de apoyo por estado.

En el estado de Sinaloa dicho punto se encuentra en la ciudad de Culiacán en la misma dirección que las oficinas de INEGI, estas mediciones que realizan diariamente la ponen en disposición en su sitio web oficial para la consulta de cualquier usuario interesado, ahí se pueden descargar los archivos *RINEX* de alguna estación en específico para su posterior uso, entonces se procederá a descarga las observaciones del punto *CULC* para el mismo día y hora de las observaciones realizadas por los equipos GPS en la parcela.

La información de las mediciones realizadas por INEGI vienen comprimidas por cada hora del día, por lo que será necesario unir estas observaciones en un solo archivo *RINEX*, para realizar esto, se utilizará el programa *UNERINEX* (***Figura*** 3.12) de distribución gratuita y cuenta con interfaz gráfica, la cual permite unir automáticamente los archivos de observación y navegación de una o mas horas generados a partir de una estación de la RGNA; basta con seleccionar los archivos (horas) que tengan interés y se pulsa el botón *Unir Archivos*, así, el programa genera un solo archivo *RINEX* con la información de estas observaciones el cual servirá para utilizarlo en el programa *TopCon Tools*, cabe mencionar que el programa se puede descargar gratuitamente del sitio web de INEGI.

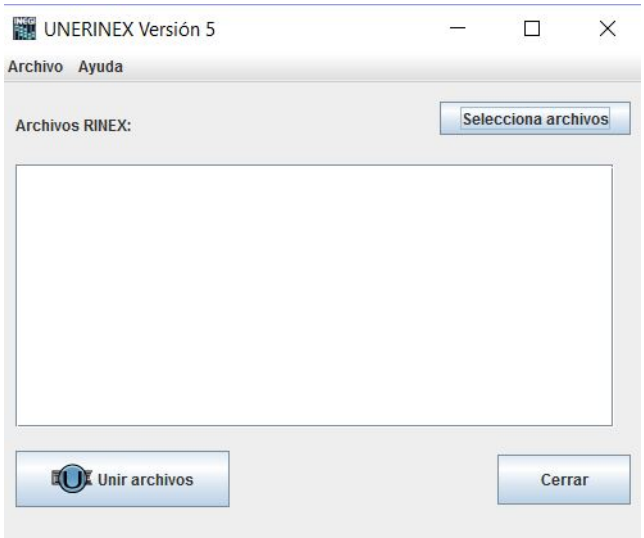


Figura 3.12: Ventana Principal UNERINEX.

Una vez cargado el archivo *RINEX* resultante de las observaciones de INEGI el software *TopCon Tools* muestra una vista tabular con el tiempo de inicio y fin de las observaciones así como el tiempo total de la observaciones de cada uno de los puntos. Una vez procesadas las observaciones GPS el software muestra la información de la distancia existente entre cada uno

de los puntos así como también la precisión horizontal y vertical de cada vector de las mediciones procesadas.

Otro proceso que sera necesario realizar es el *Ajuste*, para esto se establece un punto fijo de control horizontal, vertical o ambos, si se omite este paso el software selecciona un punto arbitrariamente la cual en la mayoría de los casos puede tener ciertas repercusiones en el proceso, el módulo de ajuste analiza primero las observaciones y después hace los ajustes mediante un diagrama de flujo ya procesado por el mismo.

Una vez iniciado el ajuste este se puede interrumpir en el proceso (de ser necesario) y mostrará una ventana de diálogo (***Figura*** 3.13), aquí se mostrará información sobre el ajuste que se está realizando y algunos posibles problemas con los datos que podrían impedir el ajuste de una observación precisa.

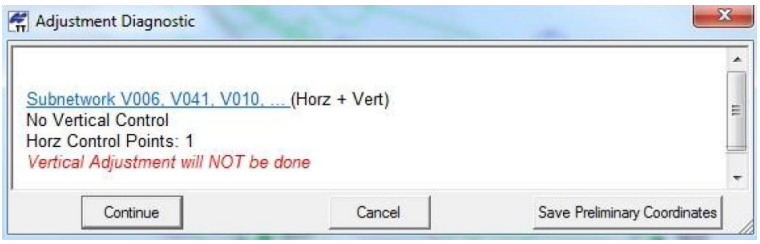


Figura 3.13: Diagnóstico del Ajuste.

TopCon Tools primero realiza un análisis de los parámetros de ajuste y los puntos de control que serán usados, el software puede detectar que no existe un punto de control vertical y por lo tanto no realiza dicho ajuste en la componente vertical, de ser necesario se pueden editar nuevamente los parámetros establecidos anteriormente para un buen resultado del ajuste en nuestras observaciones.

Después de hacer el análisis y ajuste de las observaciones se obtiene el resultado el cual muestra el tipo de punto, cuantos fueron ajustados, numero de puntos de control, peso, errores de unidad de peso y sus límites; todo esta información se muestra en una ventana nueva (***Figura*** 3.14) que se despliega al terminar el ajuste.

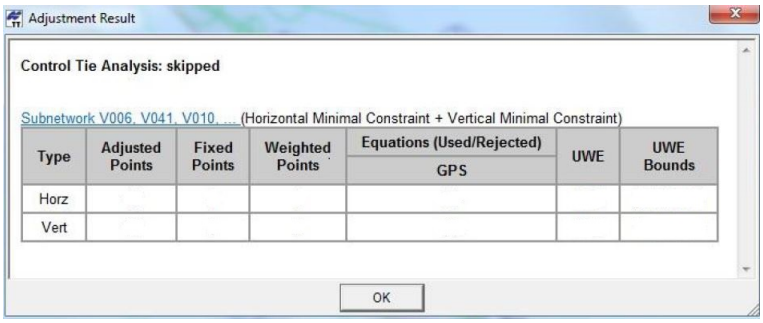


Figura 3.14: Resultado del Ajuste.

3.2. Prototipo Electrónico

Una vez procesadas las mediciones GPS del banderilleo satelital y analizadas se procedió al siguiente paso el cual consistió en diseñar y desarrollar un prototipo electrónico utilizando Arduino UNO cuya función sera sensar la temperatura y humedad de cada punto de interés de la parcela, además este incorpora un modulo GPS integrado para tomar las coordenadas de dichos puntos. Este prototipo se comunica con un *smartphone* por medio de bluetooth, para llevar a cabo esta comunicación se desarrollo una aplicación para Android como interfaz gráfica para controlar el prototipo y mostrar la información que se esta recibiendo.

3.2.1. Arduino UNO

Arduino UNO es un microcontrolador basado en el *ATmega328P*. Cuenta con 14 pines digitales de entrada/salida de las cuales 6 pueden ser usadas como salidas *PWM*[1], 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, una entrada de poder *Jack*, un encabezado *ICSP* y un botón de reset (***Figura*** 3.15) (Schmidt, 2014). Contiene todo lo necesario para ser procesado por el microcontrolador, basta con conectarlo a una computadora por USB para alimentarlo y empezar a programar.

Figura 3.15: Arduino UNO.

Existen diferentes modelos de Arduino, cada uno con diferentes especificaciones para propósitos diferentes, son de diferente tamaño y algunos con menos o mas entradas digitales que otros, la selección del Arduino adecuado para el proyecto que se desea realizar está en función de las capacidades de procesamiento que este pueda ofrecer y del costo que tendrá, para esta investigación se utilizo un Arduino UNO, donde las especificaciones se muestran en la ***Tabla*** 3.2.

[1]Modulación por Ancho de Pulso.

Tabla 3.2: Especificaciones Técnicas de Arduino UNO.

Componente	**Dato**
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de Operación	$5V$
Voltaje (Recomendado)	7-12V
Voltaje (Limite)	6-20V
Pines Digitales I/O	14
Pines Digitales PWM	6
Pines Analogicos	6
Corriente DC por Pin	20mA
Corriente DC por 3.3V	50mA
Memoria Flash	32KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Velocidad de Reloj	16MHz
LEDs Incorporados	13
Largo	68.6mm
Ancho	53.4mm
Peso	25h

El *Arduino* puede establecer comunicación serial para enviar y recibir información con la computadora o algún otro dispositivo (que cuente con este tipo de comunicación) para realizar ciertas funciones, Arduino cuenta con un puerto de comunicación serial para la transmisión de información con computadoras mediante el puerto USB. Arduino emplea el integrado FT232R, el cual es un convertidor USB-Serial, a través de este integrado el microcontrolador puede recibir y enviar datos a un computador de manera serial (Moreno, 2001).

La parte física encargada de la comunicación serial es la UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter). Los microcontroladores Atmega8/168/328, en los cuales está basado Arduino, disponen de un dispositivo compatible llamado USART (Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter) que permite tanto la comunicación asincrónica como sincrónica.

En la comunicación con el computador Arduino emplea la comunicación asincrónica, esto es, requiere de sólo dos líneas de conexión que corresponden con los pines 0 y 1: Pin 0 (Rx) pin de recepción y pin 1 (Tx) pin de transmisión (***Figura*** 3.16), y del establecimiento de un nivel de tierra común con el computador, esto es, ambas tierras deben estar conectadas, estableciendo el mismo nivel de voltaje de referencia.

Además de realizar las conexiones físicas entre el microcontrolador y el computador, para que pueda establecerse la comunicación serial debe existir un acuerdo previo en la manera como van a ser enviados los datos. Este acuerdo debe incluir los niveles de voltaje que serán usados, el tamaño y formato de cada uno de los mensajes (número de bits que constituirán el tamaño de la palabra, existirá o no un bit de inicio y/o de parada, se empleará o no un bit de paridad), el tipo de lógica empleada (qué voltaje representará un cero o un uno), el orden en que serán enviados los datos (será enviado

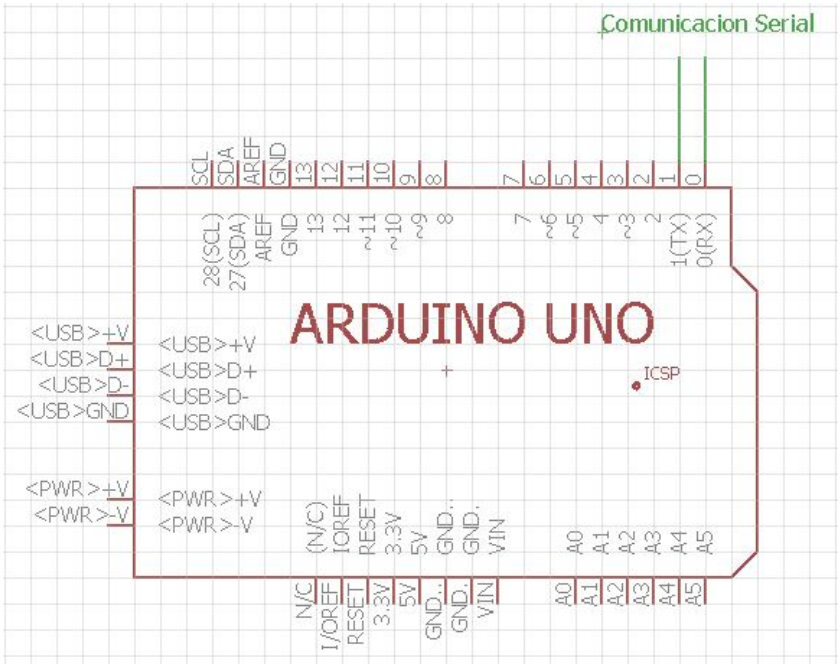


Figura 3.16: Pines de Comunicación Serial.

primero el bit de mayor peso o el de menor peso) y la velocidad de envío de datos (Instruments, 2006).

Arduino facilita este proceso para que sólo sea necesario especificar la velocidad de envío de los datos. Esta velocidad es conocida como *baud rate* o baudios de pulsos por segundo. Velocidades frecuentes de uso son 9600, 19200, 57600 y 115200.

La interfaz gráfica de Arduino presenta un *monitor serial* donde pueden observarse los datos recibidos por el computador a través del puerto USB. En este monitor debe especificarse la velocidad a la cual el microcontrolador está enviando los datos, de tal manera que el computador pueda leer el puerto a esa misma velocidad, en la mayoría de los casos la velocidad a utilizar es de 9600 baudios.

3.2.2. Entorno de Programación para Arduino

Arduino cuenta con su propio entorno de programación llamado *Arduino Software (IDE)*, el cual cuenta con interfaz gráfica compatible con varios sistemas operativos como Windows y Linux, su lenguaje de programación es muy parecido al C++, en el cual se pueden incluir librerías (si son necesarias). Arduino necesita de dos funciones principales para su funcionamiento: *setup* y *loop* (***Figura*** 3.17), ambas del tipo *void*; en la primer función se agrega el código para iniciar el puerto serial y poder recibir o enviar información con Arduino, además se pueden inicializar los pines que se necesitarán como de entrada o salida según sea el caso, si se usan librerías para utilizar otro tipo de funciones como una pantalla LCD, se agregarán en la función *setup* los pines en donde estará conectada la pantalla, además, esta función solo se ejecuta una sola vez después de compilar e iniciar el programa (Monk, 2013).

En la segunda función se agrega el código para realizar las operaciones deseadas con las señales de entrada o salida que tendrá el Arduino, por ejemplo para encender o apagar un LED según se cumpla una condición determinada o mostrar alguna información al usuario por el puerto serial, la función *loop* se esta ejecutando continuamente en un ciclo (de ahí su nombre) después de compilar e iniciar el programa. Una vez que el programa se haya editado se procede a compilar para verificar errores de programación y una vez listo se puede enviar al Arduino para su funcionamiento. Las funciones principales con las que cuenta el software para esta tarea es *Verificar* y *Subir*, donde la primera compila el código en busca de errores de sintaxis y la segunda envía el código (sin errores de sintaxis) al Arduino. La ventana inferior de fondo negro muestra los errores o avisos que encuentra el compilador así como informar cuando un código haya sido compilado y cargado correctamente al Arduino.

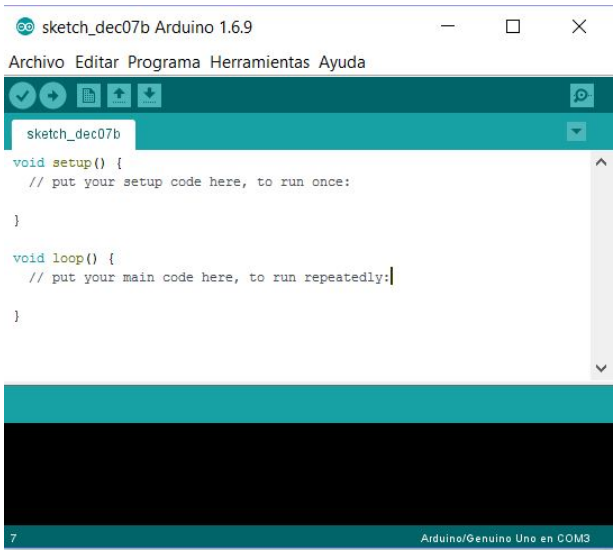


Figura 3.17: Interfaz de Programación

3.2.3. Modulo Bluetooth JY-MCU

Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2.4 GHz (Ruiz y Vasquez, 2004). Los principales objetivos que se pretenden conseguir con esta norma son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles.
- Eliminar los cables y conectores entre estos.
- Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre equipos personales.

Los dispositivos que con mayor frecuencia utilizan esta tecnología pertenecen a sectores de las telecomunicaciones y la informática personal, como PDA, teléfonos móviles, computadoras portátiles, ordenadores personales, impresoras o cámaras digitales. Un dispositivo que contiene la tecnología *Bluetooth* lleva dentro un pequeño chip con un dispositivo de radio y software que facilita la conexión. Cuando dos dispositivos *Bluetooth* quieren hablar entre si, ellos necesitan emparejarse, la comunicación entre dispositivos *Bluetooth* es posible entre distancias pequeñas, cuando una conexión es establecida, uno de los dispositivos toma el rol de *maestro* mientras todos los demás dispositivos toman el rol de *esclavos*. Estas redes de comunicación son establecidas dinámicamente y automáticamente tanto como los dispositivos entran o salen del rango de proximidad.

La especificación de Bluetooth define un canal de comunicación a un máximo 720 kbit/s (1 Mbit/s de capacidad bruta) con rango óptimo de 10 m (opcionalmente 100 m con repetidores). Opera en la frecuencia de radio de 2,4 a 2,48 GHz con amplio espectro y saltos de frecuencia con posibilidad de transmitir en Full Duplex con un máximo de 1600 saltos por segundo. Los saltos de frecuencia se dan entre un total de 79 frecuencias con intervalos de 1 MHz; esto permite dar seguridad y robustez.

La potencia de salida para transmitir a una distancia máxima de 10 metros es de 0 dBm (1 mW), mientras que la versión de largo alcance transmite entre 20 y 30 dBm (entre 100 mW y 1 W). La conmutación de circuitos puede ser asíncrona o síncrona, cada canal permite soportar tres canales de datos síncronos (voz) o un canal de datos síncrono y otro asíncrono. Cada canal de voz puede soportar una tasa de transferencia de 64 kbit/s en cada sentido, la cual es suficiente para la transmisión de voz. Un canal asíncrono puede transmitir como mucho 721 kbit/s en una dirección y 56 kbit/s en la dirección opuesta. Sin embargo, una conexión síncrona puede soportar 432,6 kbit/s en ambas direcciones si el enlace es simétrico (Miller y Bisdikian, 2001). El hardware que compone el dispositivo Bluetooth está compuesto por dos partes:

- **Dispositivo de Radio**: Encargado de modular y transmitir la señal.
- **Controlador Digital**: Compuesto por una CPU, un procesador de señales digitales (DSP - Digital Signal Processor) llamado Link Controller (o controlador de Enlace) y de las interfaces con el dispositivo anfitrión.

El LC o Link Controller se encarga del procesamiento de la banda base y del manejo de los protocolos ARQ y FEC de la capa física; además, se encarga de las funciones de transferencia tanto asíncrona como síncrona, la codificación de audio y el cifrado de datos. La CPU del dispositivo se encarga de las instrucciones relacionadas con Bluetooth en el dispositivo anfitrión, para así simplificar su operación, para ello, sobre la CPU corre un software denominado *Link Manager* cuya función es la de comunicarse con otros dispositivos por medio del protocolo LMP (Electronics, 2012).

El módulo Bluetooth que se utilizó para esta investigación fue el JY-MCU (***Figura*** 3.18) el cual es un módulo económico, fácil de usar y tiene un rango aceptable de aproximadamente 5m.

Figura 3.18: Modulo JY-MCU.

Además, cabe mencionar referente a este módulo que su comunicación es Serial (Rx, Tx) por lo que la comunicación con el Arduino será por este medio, cuenta además con 6 pines como se muestra en la ***Tabla*** 3.3:

Tabla 3.3: Pines Modulo JY-MCU.

Pin	Función
VCC	Alimentación del módulo entre 3.6V y 6V.
GND	Salida a tierra.
TXD	Transmisión de datos.
RXD	Recepción de datos a un voltaje de 3.3V.
Key	Poner a nivel alto para entrar en modo configuración del módulo.
State	Salida para visualizar cuando hay comunicación.

Para este dispositivo la comunicación es transparente ya que actúa como puente entre el Arduino y el dispositivo móvil, es decir la información que reciba del móvil la reenviará al Arduino mediante su conexión Serial, de igual forma la información que reciba del Arduino (mediante su Serial) será enviada al móvil.

3.2.4. Sensor de Humedad y Temperatura SHT-31

Como se mencionó en los apartados anteriores específicamente en los requerimientos climáticos la temperatura del medio ambiente para que la planta del maíz tenga un crecimiento saludable es muy importante, de ahi, surge la necesidad de tomar en cuenta este factor tan importante para tomar medidas preventivas en caso de que este pudiera salir de rango. Una de las maneras mas sencillas de sensar o medir este parámetro es por medio de sensores de humedad y temperatura, para esta investigación, se seleccionó el sensor *SHT-31* (***Figura*** 3.19) de la marca *Sensirion*.

Figura 3.19: Sensor SHT-31.

Gracias a los avances tecnológicos, existen en el mercado numerosos sensores económicos y cada vez mas pequeños que tienen la capacidad de sensar tanto la humedad como la temperatura en un solo dispositivo, estos sensores tienen diferentes características y precios, unos suelen ser mas precisos que otros, la elección del sensor adecuado esta en función del precio y de la necesidad de la precisión que este puede ofrecer, las características del sensor *SHT-31* se pueden apreciar en la ***Tabla*** 3.4.

Tabla 3.4: Características del Sensor SHT-31.

Parámetro	**Condición**	**Valor**	**Unidades**
Precisión Humedad	Típica	± 2	%RH
Repeteabilidad	Bajo-Medio-Alto	0.25-0.15-0.10	%RH
Resolución	Típica	0.01	%RH
Hysteresis	a 25°C	$\pm 0{,}8$	%RH
Rango Especifico	Extendido	0 a 100	%RH
Precisión Temperatura	-40°C a 90°C	$\pm 0{,}3$	^oC
Repeteabilidad	Bajo-Medio-Alto	0.24-0.12-0.06	^oC
Resolución	Típica	0.015	^oC
Rango Especifico	-	-40 a 125	^oC

Este sensor proporciona una salida digital de datos además las velocidades de comunicación alcanzan $1MHz$ (Sensirion, 2016). El paquete en el cual se encuentra el circuito integrado es muy pequeño lo que lo hace portable y ocupa menos espacio en la placa de prototipado cuyo tamaño es de $2{,}5 \times 2{,}5mm^2$, adicionalmente el rango de voltaje de operación es de $2{,}4\ a\ 5{,}5V$ lo cual permite la diversidad distintos entornos de ensamblaje (***Figura*** 3.20).

El cual esta compuesto por el chip sensor CMO, en la cual la señal de salida del sensor pasará por un convertidor Analógico - Digital y los recibirá un módulo de procesamiento y linearización en lo cual además participará un módulo de calibración, los datos de salida llegarán entonces a una

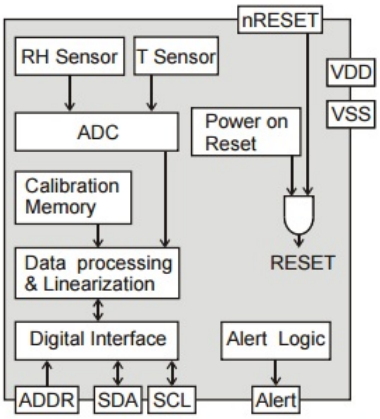


Figura 3.20: Diagrama de Funcionamiento del Sensor.

interfaz digital la cual se conectará al microprocesador el cual será el Arduino UNO. El sensor cuenta con 8 pines para su conexión con Arduino cuyo funcionamiento se puede apreciar en la ***Tabla*** 3.5.

Tabla 3.5: Pines del sensor SHT-31.

Pin	Nombre	Función
1	SDA	Datos Seriales I/O.
2	ADDR	Pin de Dirección.
3	ALERT	Condición de Alarma.
4	SCL	Reloj Serial.
5	VDD	Alimentación de Voltaje.
6	nRESET	Pin de Reset.
7	R	Sin Función, Conectar a Tierra.
8	VSS	Tierra.

Como datos adicionales el pin 2 debe de estar conectado a una resistencia de 1 $k\Omega$, el pin 5 debe de llevar ademas un capacitor de 100 nF, los pines 4 y 1 llevan resistencias de $10K\Omega$ esto para traer la señar en estado alto (Sensirion, 2016). Este sensor esta preparado para llevar un montaje SMD (Surface-Mount Device) o montaje superficial para lo cual este no requiere de perforaciones en el PCB ya que las soldaduras son superficiales, este tipo de montajes presentan varias ventajas respecto a los convencionales.

3.2.5. Módulo GPS SKM-53

Gracias a los avances tecnológicos en el campo de la electrónica y a la miniturizacion de los componentes electrónicos han aparecido en el mercado módulos GPS pequeños y adaptables para funcionar con la mayoría de los microcontroladores disponibles en el mercado así como en una placa Arduino (Fadhlan y Lothfy, 2015).

Tal es el caso del módulo GPS *SKM-53* (***Figura*** 3.21) de la marca *SkyLab* (también identificado como SkyNav por el fabricante) fue diseñado para aplicaciones de sistemas de posicionamiento global GPS, el dispositivo

cuenta con una antena GPS integrada al módulo. Con una sensitividad en su receptor de antena de -165 dbm, el módulo SKM53 permite cobertura en lugares de difícil localización GPS como son los ambientes urbanos ó espacios de follaje denso, en donde sistemas de menor sensitividad típicamente presentan dificultades en las funciones de posicionamiento y navegación (Zubair, 2015).

Figura 3.21: Modulo GPS SKM-53.

El módulo SKM53 cuenta con 22 canales de rastreo y 66 canales de adquisición e incluye soporte para los sistemas WAAS/ EGNOS/ MSAS/ GAGAN y su banda de frecuencia es L1 (SkyLab, 2010). Su precisión varía dependiendo del número de satélites con los cuales mantenga comunicación, siendo de tres metros la especificación del fabricante. Para su conexión con microcontroladores, el módulo SKM53 cuenta con un puerto serial asíncrono, con un conector de 6 pines, alimentación de 5V a 50 mA y señales con niveles TTL, utilizando el protocolo NMEA-0183, y operando a una velocidad default de 9600 bps, cuenta con 6 pines de conexión y su función se muestra en la ***Tabla*** 3.6

Tabla 3.6: Pines del Modulo GPS.

Pin	Nombre	Función
1	VCC	Alimentación de Voltaje.
2	GND	Tierra.
3	NC	N/A.
4	RST	Reset.
5	TXD	Transmisión de Datos.
6	RXD	Recepción de Datos.

El protocolo NMEA opera a través del intercambio de cadenas de caracteres ASCII entre el módulo GPS y el microcontrolador, haciendo sumamente simple su interfaz con cualquier sistema. El módulo SKM53 provee información de navegación, la cual permite determinar la latitud, longitud, altitud y velocidad de desplazamiento. Entre sus aplicaciones se encuentran los sistemas portátiles personales de navegación (PND), los sistemas de localización y navegación en vehículos, y los servicios basados en localización (LBS) entre muchas otras. Sus dimensiones son de $30mm \times 20mm \times 8{,}5mm$ y su peso es de 15 gramos, cabe mencionar que el espaciamiento entre los pines del conector es de $2mm$ y no el estándar de $2{,}54mm$ de los circuitos DIP, para lo cual se recomienda diseñar un adaptador para utilizarse con otros tipos de circuitos (SkyLab, 2010).

Para tener mejor conocimiento sobre las capacidades que puede alcanzar este modulo se presenta a continuación la ***Tabla*** 3.7 que muestra las características mas importantes de este módulo. Para esta investigación, la cantidad y distancias entre puntos de interés que tendrá el área de estudio estarán definidas por la resolución espacial de las imágenes satelitales, por lo que para georreferenciar cada punto de interés se utilizará este modulo, cuya precisión promedio de cuatro metros será mas que suficiente para realizar el estudio.

Tabla 3.7: Características del Modulo GPS.

Parámetro	**Especificación**	**Dato**
Sensitividad	Rastreo	-165dBm
	Adquisición	-148dBm
Precisión	Posición	3m CEP sin SA
	Velocidad	0.1 m/s sin SA
	Tiempo (PPS)	60ns RMS
Tiempo de Adquisición	Inicio Frío	36s
	Inicio Medio	33s
	Inicio Caliente	1s
	Re- Adquisición	<1s
Consumo de Energía	Rastreo	<35mA @ 3.3V
	Adquisición	45mA @ 3.3V
	Espera	TBD
Limites Operacionales	Altitud	Máx 18,000m
	Velocidad	Máx 515 m/s
	Aceleración	<4g

Los datos ASCII basados en el protocolo NMEA que produce el modulo GPS comienza con el signo $ y termina con un salto de linea, los mensajes específicos GPS comienzan con la sentencia *$GPxxx* donde *xxx* es un identificador de tres letras de los datos del mensaje que sigue. Los mensajes NMEA tienen un identificador de comprobación o *checksum*, cuya función es detectar datos de transferencia que pudieran estar corruptos. De este modo, el mensaje completo que se recibe cada segundo tiene un formato específico e incluye información como latitud, longitud, HDOP, entre otros; este formato se muestra a continuación:

```
$GPGGA,033410.000,2232.1745,N,11401.1920,
E,1,07,1.1,107.14,M,0.00,M,,*64
```

Donde cada elemento se distingue por tener comas entres ellos, de izquierda a derecha las descripciones son: el primer elemento es el encabezado del protocolo *GGA*, el segundo elemento es la posición *UTC*, el tercer elemento es la *latitud*, el cuarto elemento es el indicador *norte* o *sur* según sea el caso, el quinto elemento es la *longitud*, el sexto elemento es el indicador *este* u *oeste* según sea el caso, el séptimo elemento es el indicador de posición, el octavo elemento indica la cantidad de satélites localizados, el noveno elemento indica el *HDOP*, el décimo elemento indica la altitud referente al elipsoide, el onceavo elemento indica la unidad de la altitud, el

doceavo elemento indica la separación geoidal, el treceavo elemento indica la unidad de la separación geoidal y por ultimo el catorceavo elemento indica el *checksum*.

3.2.6. Diseño del Circuito Electrónico

Para integrar todos los componentes electrónicos en un circuito primero se deben de realizar las conexiones necesarias en un *Protoboard*[2] para realizar los experimentos necesarios antes de diseñar y fabricar el circuito impreso que llevará todos los componentes. Para esto se debe de conocer las características de cada dispositivo y saber cuales pines se van a conectar al Arduino para señales y comunicación serial, y cuales se van a conectar a la fuente de poder y tierra, esta información se mencionó en el ***Capítulo*** 1. Siguiendo las instrucciones e información de los pines se diseña el circuito (***Figura*** 3.22) para poder realizar pruebas en el *protoboard*, este mismo diseño se puede utilizar para construir el circuito impreso mas adelante, a continuación se describirá el proceso de conexión de los pines en el Arduino.

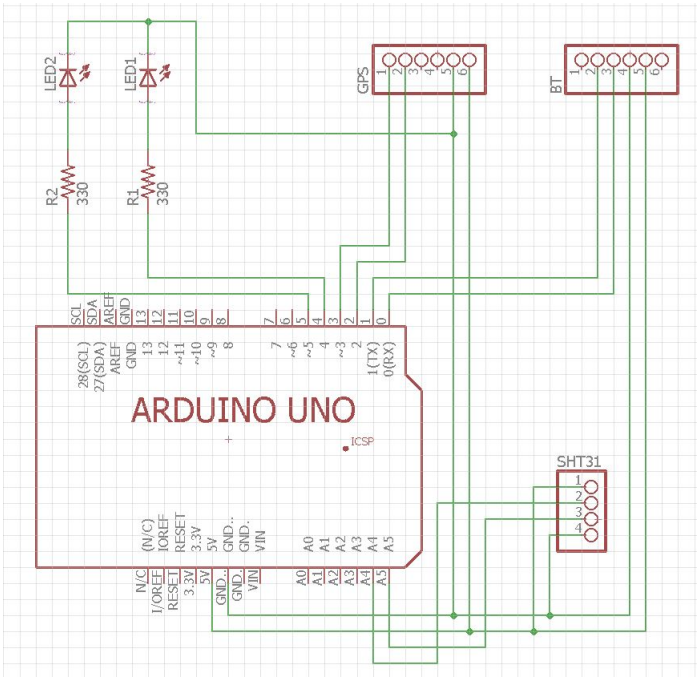


Figura 3.22: Diseño del Circuito Electrónico.

Con base en el diagrama mostrado en la imagen anterior, se puede apreciar las conexiones que se realizaran para el funcionamiento del prototipo, comenzando con el modulo bluetooth (esquina superior derecha) se conectan solamente los pines correspondientes a la comunicación serial (Rx, Tx) y los de alimentación (VCC, GND); para los pines de comunicación estos se conectan con el hardware serial del Arduino (pines 0 y 1), quedando así la conexión final de la siguiente forma:

Una vez conectado el módulo bluetooth se procede a realizar las conexiones correspondientes para el modulo GPS el cual también requiere de

[2]Placa que incorpora pistas de cobre internos para realizar experimentos electrónicos.

Tabla 3.8: Conexión módulo bluetooth JY-MCU.

Pin Bluetooth	Pin Arduino
VCC	5V
GND	GND
TXD	RX (0)
RXD	TX (1)

comunicación serial, ya que los pines de comunicación serial del Arduino están ocupados por el módulo bluetooth estos se conectarán a los pines siguientes (2 y 3) y se emulará la comunicación serial utilizando la librería de software serial de Arduino, esta librería permite utilizar funciones para habilitar dos pines digitales para la comunicación serial, como su nombre lo indica esta librería utiliza el software para replicar la función de comunicación, a su vez, se pueden habilitar múltiples pines para esta función, entonces la conexión se realizará de la siguiente forma:

Tabla 3.9: Conexión modulo GPS SKM53.

Pin GPS	Pin Arduino
VCC	5V
GND	GND
TXD	2
RXD	3

De igual modo se procede a conectar el sensor de humedad y temperatura, cabe mencionar que para este sensor en particular se requiere diseñar un circuito independiente para poder realizar pruebas con Arduino, esto debido al tamaño del sensor, los elementos que se requieren para implementar este circuito se describen en el ***Capítulo*** 1. Teniendo ya este circuito implementado se procede a realizar las conexiones de la siguiente forma:

Tabla 3.10: Conexión sensor SHT31.

Pin SHT31	Pin Arduino
VCC	5V
GND	GND
SDA	A4
SCL	A5

Como se aprecia los pines del Arduino a los que van conectados los correspondientes del sensor son analógicos, a diferencia de los pines de los otros módulos que están conectados a los pines digitales del Arduino.

3.2.7. Diseño del Circuito Impreso

Una vez construido el circuito de la ***Figura*** 3.22 y probado su funcionamiento en el *protoboard* se puede proceder a diseñar y desarrollar el circuito impreso, esto con la finalidad de hacer el prototipo mas fiable a problemas de corto circuito debido al uso de cables, de esta forma, con un circuito impreso o PCB se elimina ese problema y ademas se puede hacer mas portable y pequeño, para lo cual se propone el diseño de este circuito utilizando las especificaciones mecánicas del Arduino para crear un *Shield*[3], dichas especificaciones se muestran en la ***Figura*** 3.23.

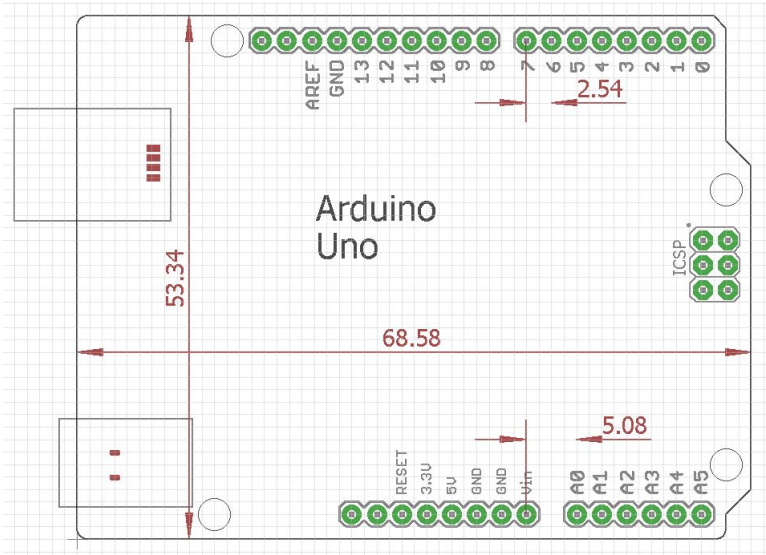


Figura 3.23: Diseño Mecánico del Shield.

Con base en el diseño mecánico del *shield* que se propuso este tendrá 68.58mm de largo y 53.34mm de ancho, además se debe de considerar el espaciamiento entre perforaciones en donde estarán insertados los pines el cual es de 2.54mm y el espaciamiento entre los pines analógicos y los pines de alimentación el cual es de 5.08mm, a partir de estas mediciones se procederá al realizar el circuito impreso donde estarán colocados los demás elementos.

Se debe de considerar también si el *shield* deberá permitir compatibilidad con otros *shields* a futuro o bien dejar este como último módulo apilable, ya que algunos *shields* permiten conectar otros de forma apilable para ampliar el hardware y añadir funciones extras al Arduino o al *shield* en si, para esta investigación en particular, este sera el único *shield* que necesitara el Arduino sin necesidad de agregar otros, por lo cual se decidió utilizar *pin headers* macho para conectarse con Arduino y *pin header* hembra para los módulos. Así, los pines headers a utilizar serán 32 pin machos y 16 pin hembras, estos pines se estarán cortando y soldando en las perforaciones correspondientes ademas se estará verificando con un multímetro la continuidad para corregir posibles problemas de corto circuito.

Una vez preparadas las especificaciones mecánicas y las medidas para el diseño del *shield* se procedió a diseñar y colocar los módulos que llevará

[3]Circuito Impreso con las mismas medidas de Arduino para ser ensamblado directamente sobre el.

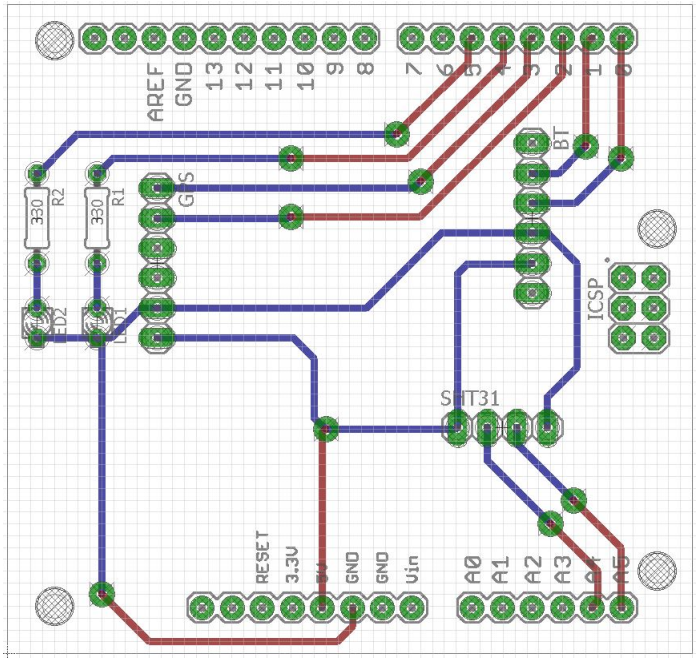


Figura 3.24: Shield para Arduino.

el *shield*, para esto se debe de diseñar las pistas que tendrá el *shield*, estas pistas no deben de cruzarse entre sí para evitar problemas de corto circuito y además deben de tener la menor distancia posible entre el nodo origen y el nodo destino para que su funcionamiento sea óptimo.

El *shield* llevara 4 barrenos adicionales para montar tornillos en el para obtener mejor sujeción al soporte donde estará montado el prototipo y el Arduino, tres de estos barrenos están ubicados en las esquinas del *shield* y un ultimo en la zona central derecha del mismo y los diámetros de dichos barrenos serán de $3mm$.

Como se mencionó anteriormente, se debe de considerar también el diseño y además el ancho de las pistas, siempre deben de evitarse los ángulos agudos en los cambios de dirección de una pista o en las intersecciones entre dos pistas, cuando mas de dos pistas estén colocadas paralelas la distancia de separación debe ser uniforme, las uniones entre las pistas y los nodos debe de ser radial y no tangencial, los nodos no deben de estar unidos entre si, por mas mínimo que sea la distancia entre ellos deben de estar unidos por pistas, en cada nodo solo deben de estar unidas cuatro pistas como máximo y sin formar ángulos agudos entre ellas. El diseño se realizó en ambas superficies de la placa, esto para que los módulos queden instalados en la parte superior del *shield* y las pistas que los comunicarán entre ellos en la parte inferior, en la ***Figura*** 3.24 se puede apreciar esto, las pistas de color rojo son de la superficie superior y las pistas de color azul son de la superficie inferior.

El ancho de la pista es muy importante, ya que debe de ser lo suficientemente ancha para soportar la corriente que tendrá el circuito, de acuerdo con la (*Association Connecting Electronics Industries*) el cálculo del ancho de pista se puede basar en la aplicación del estándar general para el diseño de circuitos impresos (*ANSI-IPC 2221*) mediante la siguiente ecuación:

$$Ancho = \frac{[I/(K_1 \times \Delta_T^{K_2})]^{1/K_3}}{Alto \times 1,378} \tag{3.1}$$

Donde *I* es la corriente máxima que soportará el *shield*, Δ_T es el diferencial de temperatura entre el aire y la pista, K_1, K_2 y K_3 son constantes para el cálculo y tienen distintos valores dependiendo si la pista que calculamos sea interna o externa (***Sección*** A.8), aplicando esta formula se obtiene un ancho mínimo de 0.04535mm, por lo tanto, se decide dejar un ancho adicional finalizando así el ancho de la pista a 0.6096mm. Ademas es necesario considerar otros detalles, como por ejemplo la separación mínima de pistas para tensiones de trabajos pequeñas debe de ser de 0.3mm, dicha separación debe de aumentarse para tensiones de trabajo mayores. El ancho de los nodos debe de ser como mínimo el doble de la pista mas ancha que conecte con el y la separación entre las pistas y el borde de la placa debe de ser de 2 o 3mm, considerando estas recomendaciones se fabricará entonces el PCB para posteriormente soldar los componentes al mismo.

3.2.8. Programación del Arduino

Una vez que el PCB haya sido fabricado considerando las especificaciones mencionadas en el apartado anterior se puede proceder a programar el Arduino para que realice las funciones pertinentes. Para lograr esto, se utilizarán tres librerías indispensables para la programación de los componentes, de las cuales dos de ellas son proporcionadas por el fabricante, estas se muestran a continuación:

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS.h>
#include "SHT31.h"
```

La primera de ellas llamada *SoftwareSerial.h* servirá para proporcionar las funciones necesarias para inicializar los pines digitales 2 y 3 del Arduino como comunicación serial los cuales están comunicados con los pines seriales del modulo GPS, en si esta librería permite asignar 2 pines para realizar esta función, el siguiente paso es declarar las variables para manipular los datos del sensor y el GPS además de declarar los pines 2 y 3 como comunicación serial:

```
DECLARAR VARIABLE PARA MANIPULAR EL SENSOR;
DECLARAR VARIABLE PARA MANIPULAR EL GPS;
PINES SOFTWARE SERIAL(PIN 2, PIN 3);
```

Se declara como tipo de datos *SHT31* y *TinyGPS* las variables *sht31* y *gps* respectivamente, además se inicializan los pines 2 y 3 como comunicación serial, estas declaraciones se hacen antes de llenar las dos funciones principales que maneja Arduino, una vez declarado esto se comienza a programar las funciones principales:

```
void setup()
{
INICIAR HARDWARE SERIAL (VELOCIDAD);
INICIAR SOFTWARE SERIAL (VELOCIDAD);
```

```
INICIAR PIN 4 COMO SALIDA DIGITAL;
INICIAR PIN 5 COMO SALIDA DIGITAL;
PONER PIN 4 EN ALTO;
PONER PIN 5 EN BAJO;
}
```

En la primer función *setup* se inicializa la comunicación serial con una velocidad de 9600 baudios, ya que manejaremos 2 puertos seriales el primero que es el hardware serial se inicializa con la función *Serial.begin(9600)* y la segunda que será por software serial se inicializa con la función *ss.begin(9600)*, además se deben de asignar los pines 4 y 5 como salidas digitales y dejando el estado digital del pin 4 como alto, esto para que encienda un led al momento que se encienda el Arduino para indicar que comenzó a funcionar, después se programara la segunda función *loop* de la forma siguiente:

```
void loop()
{
char CARACTER;
float LATITUD, LONGITUD;
SI EXITEN BYTES PARA ENVIAR/RECIBIR
GUARDAR BYTE EN CARACTER
SI CARACTER ES UN '1'
ENVIAR POR BLUETOOTH INFORMACION CON FORMATO
SI CARACTER ES UN '2'
ENVIAR POR BLUETOOTH INFORMACION SIN FORMATO
}
```

Como lo muestra el *pseudocódigo* anterior se declaró una variable de tipo carácter para guardar los bytes o información enviadas por bluetooth desde la aplicación móvil además dos variables de tipo flotante para guardar en ellas las coordenadas recibidas por el GPS, si el carácter recibido es un 1 entonces el Arduino enviará la información con un formato específico para mostrarla en la aplicación, si se recibe un 2 entonces enviará la misma información con un formato distinto, esta información sera recibida por la aplicación móvil y guardada en un archivo de texto según sea el caso.

Además se implementarán funciones para mostrar o enviar la información del GPS independientemente, por ejemplo para mostrar la latitud, la longitud, la fecha y hora que registra el receptor GPS, dentro de esta función se cambiaran los estados de los leds, es decir, cada segundo el sensor recibe información de los satélites, mientras los satelites encontrados sean menor a 5 entonces se el programa imprimirá una cadena de caracteres del mismo carácter, cuando el numero de satélites llegue a 5 o más entonces se guardará la coordenada en una variable y se invertirán los estados de los leds, así estos indicaran cuando la información del GPS este disponible.

```
SI SATELITES ES MENOR A 5
IMPRIMIR "*******";
SI SATELITES ES MAYOR O IGUAL A 5
{
GUARDAR NUMERO FLOTANTE EN VARIABLE;
PONER PIN 4 EN BAJO;
PONER PIN 5 EN ALTO;
}
```

3.3. Aplicación Móvil

Una vez finalizada la parte electrónica y programación del prototipo electrónico se procedió a diseñar y programar la aplicación móvil para recibir la información que enviará el prototipo y además controlar al prototipo desde esta aplicación. Como se mencionó en la *sección* 2.6.2 el entorno que se uso para diseñar y programar la aplicación móvil fue *App Inventor* además se mencionaron sus características y entornos para diseñar y programar la aplicación, esto debido a que la mayoría de los *smartphone* usan Android como sistema operativo, la aplicación se desarrolló bajo la versión *nb153* de App Inventor 2.

3.3.1. Entorno de Diseño para App Inventor 2

Primeramente en este entorno se agregaron todos los componentes que necesitará la aplicación, estos componentes van desde etiquetas de texto, botones hasta componentes especiales como funciones para bluetooth, relojes, archivos y notificadores, cabe mencionar que App Inventor 2 permite manejar distintas ventanas dentro de la misma aplicación, sin embargo, para la aplicación que se desarrolló en esta investigación bastará con una sola ventana, a continuación se describe cada uno de los componentes que lleva la aplicación y su función:

- **Etiquetas**: Se utilizaron 7 etiquetas en total para mostrar el nombre de la aplicación y las instrucciones de uso, estas estarán apareciendo conforme se vaya utilizando la aplicación, la ultima etiqueta cuyo tamaño es mas grande que las demás servirá para mostrar la información recibida por el Arduino (Latitud, Longitud, Humedad y Temperatura).

- **Imágenes**: Se utilizaron una imagen solamente la cual muestra una mano para señalar como comenzar a utilizar la aplicación.

- **Lista**: Este elemento lista servirá para mostrar los dispositivos bluetooth encontrados en un radio cercano al móvil, aquí se seleccionará el bluetooth correspondiente al prototipo cuyo identificador será la dirección MAC del bluetooth.

- **Botones**: Se utilizaron 5 botones cuyas funciones son conectar con el bluetooth, desconectar o terminar la comunicación con el bluetooth, crear el archivo de texto, mostrar informacion recibida, guardar la informacion y finalmente crear un archivo nuevo.

- **Cuadro de Texto**: Este elemento servirá para que el usuario ingrese el nombre que tendrá el archivo donde se guardará la información.

- **BluetoothClient**: Este elemento no visible permite agregar al programa las funciones necesarias para utilizar la comunicación bluetooth con otros dispositivos.

- **Reloj**: La aplicación cuenta con 3 elementos no visibles denominados relojes, el primer reloj tendrá la función de verificar cada segundo la comunicación serial bluetooth para recibir y mostrar la información, la función del segundo reloj es similar al anterior, la diferencia consiste en que el formato de la informacion cambiará entre uno y otro, el

tercer y ultimo reloj se utilizo para usarlo como contador de seguridad de 4 segundos para proteger la integridad de la información recibida bloqueando los botones de mostrar y guardar información cada vez que se usen alguno de estos.

- **Notificador**: Su función consiste en informar si se realizó la conexión con el prototipo correctamente.
- **Archivo**: La función de este elemento es proporcionar las herramientas necesarias para guardar la información recibida en un archivo de texto que se guardará en la ruta raíz de la memoria interna del celular.

Añadiendo los elementos mencionados anteriormente se puede además cambiar algunas propiedades de estos, como su nombre, tamaño, color, visibilidad, bloqueo, entre otros; el diseño de la aplicación final se puede apreciar en la imagen siguiente:

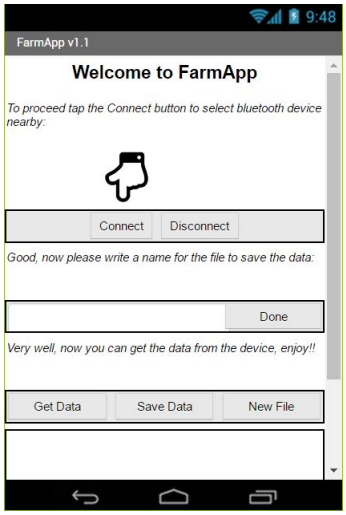


Figura 3.25: Diseño de la Aplicación Móvil

Antes de comenzar a utilizar la aplicación se debe de establecer la comunicación con el bluetooth desde la configuración de Android, ahí se debe de activar la opción de buscar dispositivos bluetooth y seleccionar el nombre del bluetooth el cual es *HC-05*, al seleccionar solicitará una contraseña de seguridad la cual son los números *1234*. Tras realizar esto, se puede abrir la aplicación y solo se mostrara el nombre y la primer instrucción de uso, además de los botones para conectar y desconectar, tras pulsar el botón de conectar se despliega la lista de dispositivos encontrados y se debe de seleccionar el bluetooth, tras esto aparecerá una notificación de conexión de éxito, entonces aparecerá el cuadro de texto para escribir un nombre para el archivo de texto, tras esto se pulsa el botón de listo para crear el archivo, por último aparecerán tres botones y una etiqueta donde se mostrará la información recibida, el botón de la izquierda envía un $'1'$ al Arduino y recibe la información de este, el botón del medio envía un $'2'$ al Arduino y guarda la información en el archivo y el botón de la derecha permite crear un archivo nuevo, para salir de la aplicación, basta con presionar el botón de desconectar y se podrá cerrar la aplicación con seguridad.

3.3.2. Entorno de Programación para App Inventor 2

Una vez colocados todos los elementos que tendrá la aplicación móvil se puede comenzar a programar la función que tendrán los mismos, para esto cambiamos al entorno de programación y el área de trabajo aparecerá en blanco, a la izquierda se pueden encontrar las distintas funciones que se pueden programar y los elementos que se insertaron en el diseño, el pseudocódigo que seguirá la programación de la aplicación se describe a continuación:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 1 - VENTANA1.INICIALIZA HACER
BOTON_DESCONECTAR.HABILITADO = FALSO
BOTON_INFO.HABILITADO = FALSO
BOTON_INFO.VISIBLE = FALSO
BOTON_GUARDAR.HABILITADO = FALSO
BOTON_GUARDAR.VISIBLE = FALSO
BOTON_NUEVO.HABILITADO = FALSO
BOTON_NUEVO.VISIBLE = FALSO
BOTON_ACEPTAR.HABILITADO = FALSO
BOTON_ACEPTAR.VISIBLE = FALSO
CUADRO_TEXTO.HABILITADO = FALSO
CUADRO_TEXTO.VISIBLE = FALSO
ETIQUETAS.VISIBLE = FALSO
```

La lógica anterior se realiza para ocultar y deshabilitar los elementos que no serán necesarios al iniciar la aplicación, de modo que solo aparezcan los elementos necesarios para optimizar el uso de la pantalla, el siguiente paso es asignar a la lista los elementos para que aparezcan los dispositivos bluetooth disponibles, esto se realiza de la siguiente forma:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 2 - LISTA_CONECTAR.SELECCION
ASIGNAR LISTA.ELEMENTOS = BTCLIENT.ADDRESSESANDNAMES
```

A continuación se debe de realizar la conexión con el prototipo y habilitar los demás elementos ocultos tras una conexión exitosa, además se mostrará una notificación indicando esto:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 3 - LISTA_CONECTAR.SELECCION2
LLAMAR BTCLIENT.CONECTAR = LISTA_CONECTAR.SELECCION
SI BTCLIENT.ESTA_CONECTADO HACER
LISTA_CONECTAR.HABILITADO = FALSO
BOTON_DESCONECTAR.HABILITADO = VERDADERO
BOTON_ACEPTAR.VISIBLE = VERDADERO
BOTON_ACEPTAR.HABILITADO = VERDADERO
CUADRO_TEXTO.HABILITADO = VERDADERO
IMAGEN.VISIBLE = FALSO
LLAMAR NOTIFICADOR.MOSTRAR_MENSAJE HACER
MENSAJE = "CONECTADO"
TITULO = "CONEXION BLUETOOTH"
BOTON.TEXTO = "ACEPTAR"
```

El siguiente paso es programar los relojes para que estén verificando los bytes enviados y recibidos cada segundo, la lógica aplica para los primeros

2 relojes ya que ambos tienen la misma función pero a diferencia que uno recibirá informacion con formato distinto, esto se realiza de la siguiente forma:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 4 - RELOJ1.TEMPORIZADOR HACER
MIENTRAS BTCLIENT.BYTES_RECIBIDOS > 0 HACER
ETIQUETA_INFO.TEXTO = BTCLIENT.TEXTO_RECIBIDO
```

Una vez que los relojes estén programados para recibir los bytes se procede a programar la creación del archivo de texto donde se guardará la información, para esto se requiere un cuadro de texto para escribir el nombre del archivo y un botón para aceptar y crear el archivo, a continuación se muestra este paso:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 5 - BOTON_ACEPTAR.CLICK HACER
BOTON_ACEPTAR.HABILITADO = FALSO
CUADRO_TEXTO.HABILITADO = FALSO
ETIQUETAS.VISIBLE = VERDADERO
BOTON_INFO.HABILITADO = VERDADERO
BOTON_INFO.VISIBLE = VERDADERO
BOTON_GUARDAR.VISIBLE = VERDADERO
BOTON_GUARDAR.HABILIDATO = VERDADERO
BOTON_NUEVO.VISIBLE = VERDADERO
BOTON_NUEVO.HABILITADO = VERDADERO
LLAMAR ARCHIVO1.GUARDAR = "/_TEXTO.TXT"
LLAMAR NOTIFICADOR1.ALERTA = "FILE GENERATED"
```

Ya creado el archivo de texto donde se guardará la información entonces se puede proceder a recibir la información para mostrarla o guardarla en el archivo para la primer parte se programa el botón de mostrar información de la siguiente forma:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 6 - BOTON_INFO.CLICK HACER
RELOJ1.TEMPORIZADOR_HABILITADO = VERDADERO
RELOJ2.TEMPORIZADOR_HABILITADO = FALSO
RELOJ3.TEMPORIZADOR_HABILITADO = VERDADERO
LLAMAR BTCLIENT.ENVIAR_TEXTO = '1'
LIMPIAR ETIQUETA
BOTON_INFO.HABILITADO = FALSO
BOTON_GUARDAR.HABILITADO = FALSO
```

Con el paso anterior se envía al Arduino el carácter '1' tras esto se habilita el primer reloj y el tercero, deshabilitando el segundo para evitar cruce de información y se deshabilitan los 2 botones de informacion para asegurar la integridad de la información, así, el siguiente paso sera guardar la información si así se desea, esto se realiza como sigue:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 7 - BOTON_GUARDAR.CLICK HACER
RELOJ1.TEMPORIZADOR_HABILITADO = FALSO
RELOJ2.TEMPORIZADOR_HABILITADO = VERDADERO
RELOJ3.TEMPORIZADOR_HABILITADO = VERDADERO
LLAMAR BTCLIENT.ENVIAR_TEXTO = '2'
```

```
LLAMAR ARCHIVO1.ESCRITURA = ETIQUETA_INFO.TEXTO
BOTON_INFO.HABILITADO = FALSO
BOTON_GUARDAR.HABILITADO = FALSO
```

De la forma anterior, se envía el carácter '2' y se habilita el segundo reloj y deshabilitando el primero, cuando el segundo reloj recibe la informacion entonces se abre el archivo creado y se guarda la información recibida, esto se repetirá cada vez que se presione el botón de guardar información, ya guardada la información se puede crear un archivo nuevo si así se desea, para realizar esto se sigue lo siguiente:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 8 - BOTON_NUEVO.CLICK HACER
BOTON_ACEPTAR.HABILITADO = VERDADERO
CUADRO_TEXTO.HABILITADO = VERDADERO
BOTON_INFO.HABILITADO = FALSO
BOTON_GUARDAR.HABILITADO = FALSO
BOTON_NUEVO.HABILITADO = FALSO
LIMPIAR ETIQUETA
```

Con la lógica anterior, al pulsar el botón para crear un nuevo archivo solo se deshabilitan los botones de recibir y guardar información y se vuelve a habilitar el cuadro de texto para escribir el nombre del nuevo archivo y de esta forma volver a habilitar los botones para recibir y guardar, a diferencia que ahora se guardará la información en el último archivo creado, después se puede programar el último de los tres relojes, cuya función será bloquear dos botones por 4 segundos, el proceso se describe a continuación:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 9 - RELOJ3.TEMPORIZADOR HACER
VARIABLE_TIMER = VARIABLE_TIMER + 1
SI VARAIABLE_TIMER = 4
RELOJ3.TEMPORIZADOR_HABILITADO = FALSO
BOTON_INFO.HABILITADO = VERDADERO
BOTON_GUARDAR.HABILITADO = VERDADERO
VARIABLE_TIMER = 0
```

De la forma anterior al presionar el botón de recibir información o guardar información se iniciara un contador que se incrementará cada segundo, al finalizar el contador detiene el reloj y habilita los botones nuevamente, así la información se mostrará o guardará correctamente, el último paso es desconectar la conexión bluetooth, esto se realiza como sigue:

```
CUANDO BLOQUE CONTROL 10 - BOTON_DESCONECTAR.CLICK HACER
LISTA_CONECTAR.HABILITADO = VERDADERO
BOTON_DESCONECTAR.HABILITADO = FALSO
ETIQUETA_INFO.VISIBLE = FALSO
ETIQUETA_DATOS.VISIBLE = FALSO
BOTON_INFO.HABILITADO = FALSO
BOTON_INFO.VISIBLE = FALSO
BOTON_GUARDAR.HABILITADO = FALSO
BOTON_GUARDAR.VISIBLE = FALSO
BOTON_NUEVO.HABILITADO = FALSO
BOTON_NUEVO.VISIBLE = FALSO
```

```
IMAGEN1.VISIBLE = VERDADERO
RELOJ1.TEMPORIZADOR_HABILITADO = FALSO
RELOJ2.TEMPORIZADOR_HABILITADO = FALSO
RELOJ3.TEMPORIZADOR_HABILITADO = FALSO
LLAMAR BTCLIENT.DESCONECTAR
LLAMAR NOTIFICADOR.MOSTRAR_MENSAJE HACER
MENSAJE = "DESCONECTADO"
TITULO = "CONEXION BLUETOOTH"
BOTON.TEXTO = "ACEPTAR"
```

Tras aplicar la lógica anterior se deshabilitan los componentes avanzados, se desconecta el cliente bluetooth y se detienen los relojes para que la aplicación no esté esperando información del Arduino y aparezcan errores de información, así solo se habilitan nuevamente las etiquetas y botones de conexión como si la aplicación se abriera nuevamente. Una vez aplicado el pseudocódigo utilizando el lenguaje de bloques se procede a compilar el código, tras esto se genera un código QR el cual se carga desde la aplicación de App Inventor que se puede descargar gratuitamente desde la *Play Store* de Android, al cargar el código QR por medio de la cámara del *smartphone* este se instalará en el celular y se creará un nuevo icono personalizado para la aplicación.

3.4. Procesamiento de las Imágenes Satelitales

Una vez creado el prototipo electrónico y la aplicación móvil, se procedió a realizar una visita *in-situ* a la zona de estudio para generar la información que contempla esta investigación (latitud, longitud, humedad y temperatura) de cada punto de interés de la parcela, esta información se agrego al final en un SIG temporal que permitirá optimizar los recursos de fertilizantes aplicados a la misma, para esto se procesaron imágenes satelitales de la misión LandSat 8, esto requirió de un pre-procesamiento para preparar las imágenes para el cálculo de los índices de vegetación pertinentes, así el proceso en general si describe a continuación.

3.4.1. Imágenes Satelitales LandSat

LandSat fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres, inicialmente se le llamó ERTS-1 (Earth Resources Tecnology Satellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LandSat. La constelación LandSat está formada por 8 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales.

Actualmente sólo se encuentran activos el LandSat 5 y 8, que son administrados por la NASA (National Space and Space Administration), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Los satélites LandSat llevan a bordo diferentes instrumentos, el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor

sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral pancromática con resolución de 15 metros.

Las imágenes LandSat están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y uno térmico; así mismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m. Son de utilidad para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas, en el estudio de los recursos naturales y de cultivos, además, el acceso a las imágenes o producto es completamente gratuito por lo que contribuye al objetivo final de esta investigación, la misión LandSat con la que se trabajara sera *LandSat 8* la cual cuenta con 2 sensores incorporados los cuales son Operational Land Imager (OLI) y Termal Infrared Sensor (TIRS), sus características se mencionan a continuación.

Tabla 3.11: Características LandSat 8.

Atributo	**Descripción**
Tipo de Producto	L1T (Ortorectificada)
Formato de Imagen	GeoTIFF Metadato en Texto
Espaciamiento de Pixel	15m Pancromatico 30m Multiespectral
Tamaño de Producto	185 x 185km
Correcciones Geométricas	Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un modelo digital de elevacion (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP)
Datum Horizontal	WGS84
Proyeccion Cartográfica	UTM
Bandas Espectrales	Banda 1 - Aerosol Costero (0.43 - 0.45μm) Banda 2 - Azul (0.45 - 0.51μm) Banda 3 - Verde (0.53 - 0.59μm) Banda 4 - Rojo (0.64 - 0.67μm) Banda 5 - Infrarrojo Cercano (0.85 - 0.88μm) Banda 6 - SWIR 1 (1.57 - 1.65μm) Banda 7 - SWIR 2 (2.11 - 2.29μm) Banda 8 - Pancromático (0.50 - 0.68μm) Banda 9 - Cirrus (1.36 - 1.38μm) Banda 10 - TIRS 1 (10.60 - 11.19μm) Banda 11 - TIRS 2 (11.50 - 12.51μm)
Resolución Radiométrica	12 bits

Las imágenes satelitales se utilizaron para analizar la vegetación de un área determinada, es decir, mas concretamente el estrés hídrico o salud vegetal del área de estudio, por lo que las bandas del rojo e infrarrojo cercano

fueron las que se utilizaron en la investigación para la generación de los índices de vegetación pertinentes, sin embargo, es importante mencionar las aplicaciones que se pueden realizar con las demás bandas como se muestra a continuación.

- **Azul (0.45 - 0.52μm)**. La aplicación de esta banda va desde el mapeo de aguas costeras, diferenciación entre suelo y vegetación hasta diferenciación entre vegetación conífera y decidua.
- **Verde (0.52 - 0.60μm)**. La utilidad de esta banda es para el mapeo de vegetación y calidad del agua de alguna zona de estudio.
- **Roja (0.63 - 0.90μm)**. Para estudios de vegetación esta banda es muy interesante, permite estudiar la absorción de la clorofila, diferenciación entre especies vegetales, estudios de áreas urbanas y uso de suelos, agricultura en general y calidad del agua.
- **Infrarrojo Cercano (0.76 - 0.90μm)**. Al igual que la banda anterior, el infrarrojo cercano es muy importante para estudios de vegetación, pero además permite estudiar delimitaciones de cuerpos de agua, realizar mapeos geomorfológicos y geológicos, identificar áreas potenciales de incendios y áreas húmedas y estudios sobre agricultura y vegetación.
- **Infrarrojo Medio (2.08 - 2.35μm)**. Esta banda permite realizar estudios sobre identificación de minerales y mapeos hidrotermales.
- **Infrarrojo Térmico (1.55 - 1.75μm)**. Esta porción del infrarrojo permite realizar estudios de suelo, medición de la humedad en la vegetación, diferenciación entre nubes y nieve, y análisis de agricultura y vegetación.
- **Infrarrojo Térmico (10.4 - 12.5μm)**. Esta porción del infrarrojo permite realizar estudios sobre estrés térmico en plantas, analizar corrientes marinas y examinar propiedades termales del suelo.

Para realizar los estudios pertinentes como son los índices de vegetación será necesario combinar las bandas necesarias según sea el caso, la combinación puede realizarse entre 2 bandas o mas, según sea el fenómeno físico que se desea estudiar es la combinación de bandas que se tiene que realizar, a continuación se describen algunos ejemplos de combinaciones y sus aplicaciones.

- **Azul - Verde - Rojo**. Esta combinación que utiliza solo las bandas de la porción visible del espectro electromagnético, es la que más se aproxima a los colores reales. Es ideal para realzar información del agua: turbidez, corrientes y sedimentos en suspensión. En esta imagen las tonalidades de color azul claro representan aguas costeras y con sedimentos en suspensión, mientras que los tonos azul oscuro representan aguas más profundas y con pocos sedimentos en suspensión, las áreas urbanas aparecen en tonalidades marrón claro y la vegetación en tonos verdes.

- **Verde - Rojo - Infrarrojo Cercano**. La banda del infrarrojo cercano es útil para identificar los limites entre el suelo y el agua, los cuerpos de agua con sedimentos en suspensión aparecen en tonos azul claro y los que poseen pocos sedimentos en suspensión en azul oscuro, las áreas urbanas y el suelo expuesto aparecen en tonos azul. También el infrarrojo cercano es sensible a la clorofila, permitiendo que se observen variaciones de la vegetación, que aparecen en tonos rojos.

- **Rojo - Infrarrojo Cercano - Infrarrojo Térmico**. Esta combinación con dos bandas en la región del infrarrojo muestra una mayor diferenciación entre el suelo y el agua. La vegetación se muestra en diversas tonalidades de verde y rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de ubicación. Las áreas urbanas y el suelo expuesto se presentan en tonos rosados. El agua, independiente de la cantidad de sedimentos en suspensión, aparece en negro.

- **Rojo - Infrarrojo Térmico - Infrarrojo Cercano**. Esta combinación, con un banda en la región visible y dos en la del infrarrojo, utiliza las mismas bandas de la combinación del punto anterior; sin embargo, asociadas a colores diferentes, permitiendo una diferenciación de la vegetación en tonos marrones, verdes y amarillos. Las áreas urbanas y los suelos expuestos aparecen en tonos de azul claro, mientras que las áreas inundadas y el agua aparecen en tonos azul oscuros.

Como se puede apreciar para estudios de vegetación las combinaciones mas comunes son utilizando las bandas del rojo e infrarrojo, de ahí el hecho que la mayoría de los índices de vegetación contengan estas bandas en sus ecuaciones. La resolución temporal de *LandSat 8* es de aproximadamente 20 días, así que se obtendrán de una a dos imágenes por mes, una vez descargadas las imágenes sera necesario realizar un pre-procesamiento previo al calculo de los índices de vegetación para disminuir los efectos atmosféricos que puedan afectar a los valores de los pixeles de la imagen satelital, este proceso se describirá en la sección siguiente.

3.4.2. Calibración Radiométrica y Corrección Atmosférica

Cuando es necesario estudiar y analizar imágenes satelitales es necesario realizar un pre-procesamiento a las imágenes para reducir efectos atmosféricos o incidencias radiométricas que puedan afectar el nivel digital del pixel de la imágenes, estos efectos pueden afectar los resultados del calculo de los índices de vegetación, existen distintos procesos para reducir o eliminar dichos factores, los mas comunes e importantes son la calibración Radiométrica y corrección atmosférica.

Estos procesos permiten convertir la información de la imagen original (bruta) de cada pixel, de Niveles Digitales a Niveles de Reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmósfera, es decir, sin los efectos de la misma, lo que permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera. Adicionalmente, se busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra - Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes (Cabrera y Galindo,

2011). También es conveniente su aplicación en el caso de utilizar imágenes de diferentes tipos de sensores, pues permite normalizar las diferencias de valores de la radiación solar causados por las diferencias de los rangos espectrales entre las bandas de las imágenes. En general con estas correcciones se busca minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada elemento captado en la escena.

El proceso de corrección atmosférica puede aplicar opcionalmente la corrección de neblina y el enmascaramiento de nubes, por lo cual es necesario inspeccionar previamente la imagen para detectar la presencia de nubes y neblina evidente. Como resultado final de este sub-proceso, se obtiene una imagen en valores de reflectancia que mejora la separabilidad espectral de los objetos presentes en la imagen corregida (coberturas de la Tierra) respecto a la imagen original, mejorando los resultados finales del proceso de clasificación digital.

Otro proceso para disminuir posibles errores en la imagen es la *Corrección Geométrica* la cual consiste en corregir los desplazamientos y distorsiones geométricas presentes en una imagen, causados por la inclinación del sensor (posición del sensor en el momento de la toma), la influencia del relieve y los errores sistemáticos asociados con la imagen (Hantson y Chuvieco, 2011). Esta parte del proceso es determinante pues tiene implicaciones directas en la precisión de la posición de los resultados a obtener en el procesamiento, y en el caso de estimación de cambios entre coberturas garantiza que los cambios reportados entre dos imágenes de la misma zona y distintas fechas, se deban a cambios en las coberturas de la Tierra detectadas durante el periodo establecido, y no a diferencias en la posición de las imágenes en el periodo de análisis, de este modo la cadena de preprocesamiento estándar para las imágenes satelitales se presenta a continuación:

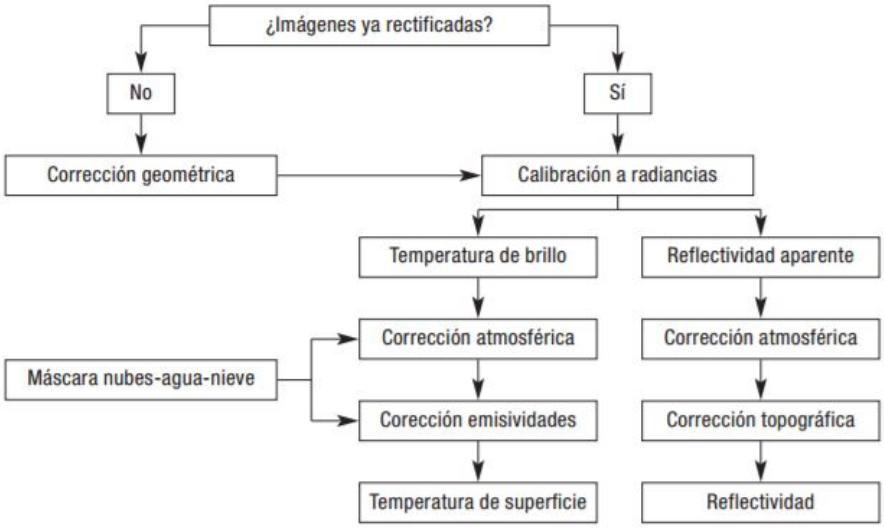


Figura 3.26: Flujo de la Corrección de Imágenes Satelitales.

Para realizar estos pre-procesamientos se utilizó el software para procesamiento de imágenes digitales *ENVI 5.3* el cual cuenta con la herramientas necesarias para realizar este proceso. A continuación se describirá paso a

paso el procedimiento que se realizó con cada imagen satelital que se usó en esta investigación.

El primer paso consiste en abrir el archivo de metadatos que esta incluido en cada imagen en un archivo de texto *.MTL* con el software ENVI 5.3, al realizar esto se mostrara la imagen en color RGB en el área de trabajo, en la zona lateral derecha se encuentran las herramientas de trabajo con las que cuenta el software, entonces se abre la herramienta *Radiometric Calibration* y en la ventana emergente se selecciona el archivo de metadatos previamente cargado, al realizar esto se muestra una ventana nueva (***Figura*** 3.27).

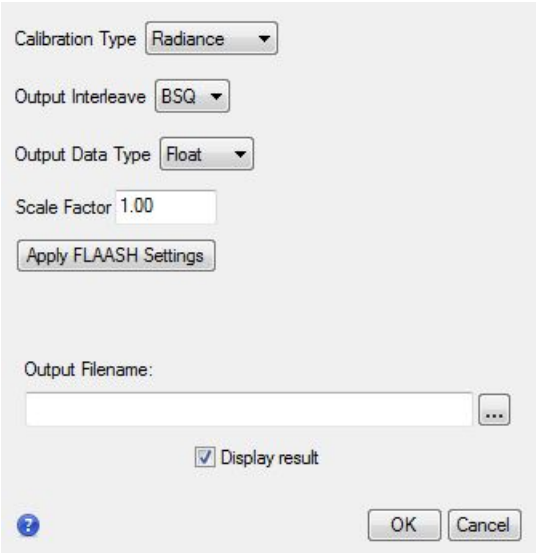


Figura 3.27: Calibración Radiométrica ENVI.

En esta ventana se selecciona el tipo de calibración (*radiancia*), el intervalo de salida (BIL), el tipo de dato de salida (Float) y el factor de escala (0.10), este ultimo dato proviene de las características del sensor LandSat para realizar las correcciones y calibraciones pertinentes así como los valores de radiancias para cada banda del espectro que capta el sensor, de este modo, se procede a asignarle un nombre al archivo de salida el cual sera la imagen en términos de valores de radiancia necesaria para el proceso siguiente.

Una vez realizada la calibración radiométrica se procede con el proceso de corrección atmosférica para lo cual se necesita la imagen en valores de radiancia, para realizar esto se abre la herramienta *FLAASH Atmospheric Correction* y se mostrara una nueva ventana *(***Figura** *3.28)*.

En la ventana se pueden apreciar 3 secciones que requieren ingresar informacion, en la primer sección se selecciona la imagen en valores de radiancia del paso anterior, después se selecciona un nombre para la imagen de salida la cual estará en términos de reflectancia, el siguiente campo permite cambiar la ruta destino donde se guardaran archivos temporales que se generaran durante el procesamiento y el ultimo campo permite elegir el nombre que tendrán dichos archivos.

En la siguiente sección se ingresa la información de la imagen satelital, para obtener dicha informacion se puede auxiliar con el archivo de metadatos, primero se ingresa la latitud y longitud que cubre la imagen satélital,

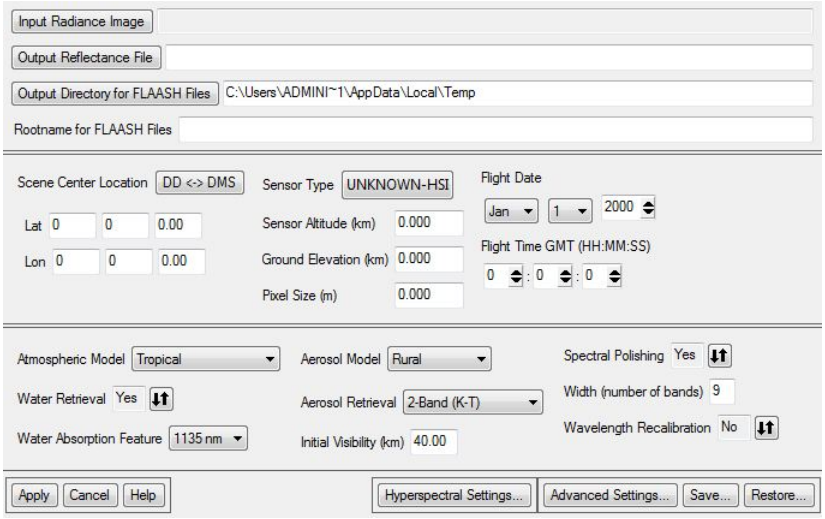


Figura 3.28: Corrección Atmosférica ENVI.

después se selecciona el tipo de sensor satélital que tomo la imagen (LandSat 8 OLI), se selecciona la altitud del sensor (705Km), la elevación del suelo del área de estudio (0.01Km), el tamaño del pixel (30m) y por ultimo la fecha y hora de adquisición de la imagen.

En la ultima sección se debe de ingresar la información radiométrica de la imagen las cuales son modelo de aerosol (rural), modelo atmosférico (U.S Standard) y visibilidad inicial (35Km), además se pueden ingresar opciones multiespectrales si es necesario el caso, por último se guarda la configuración y se procede a aplicar la corrección atmosférica, el archivo resultante es la imagen en valores de reflectancia lista para calcular los índices de vegetación pertinentes.

3.4.3. Cálculo de los Indices de Vegetación

Una vez realizado el pre-procesamiento descrito en la sección anterior a las imágenes satelitales se puede proceder a calcular los índices de vegetación pertinentes para esta investigación, actualmente en el mercado existen distintos software de procesamiento de imágenes digitales que permiten realizar esta tarea con herramientas de álgebra de bandas o calculadoras de bandas que permiten combinar distintas bandas mediante una ecuación.

Esta operación se realizó con el software *ENVI 5.3* el cual cuenta con la herramienta llamada *Band Math* la cual permite aplicar la ecuación de algún índice de vegetación para obtener una imagen con el resultado de la operación, por ejemplo si se desea calcular el NDVI utilizando la ecuación 2.7 basta con escribir la ecuación en el campo de expresión y asignar la imagen que corresponde a la banda, al abrir la herramienta se despliega una nueva ventana *(**Figura** 3.29)*.

En esta ventana se pueden ingresar las ecuaciones de los índices de vegetación o bien si se utilizará alguna ecuación muy común esta se puede guardar para ser reutilizada simplemente seleccionando la expresión en el campo superior de la ventana, cada vez que se ejecute una ecuación se deben de asignar los archivos o imágenes satelitales de cada banda según se encuentren variables en la expresión.

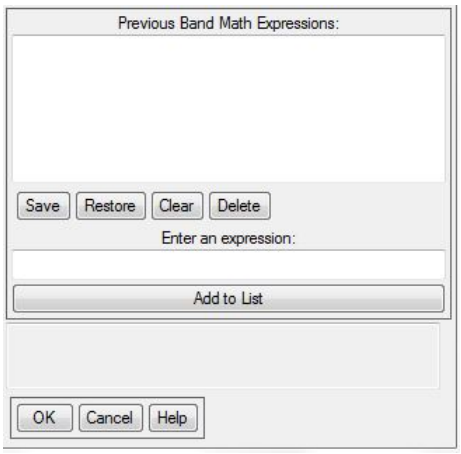


Figura 3.29: Álgebra de Bandas en ENVI.

El software cuenta además con otra herramienta llamada *NDVI* en una sección especial bajo la sección de Espectral y Vegetación, aquí se encuentran distintas herramientas para análisis de percepción remota sobre la Vegetación, incluyendo el cálculo del NDVI, al abrir la herramienta se despliega una nueva ventana.

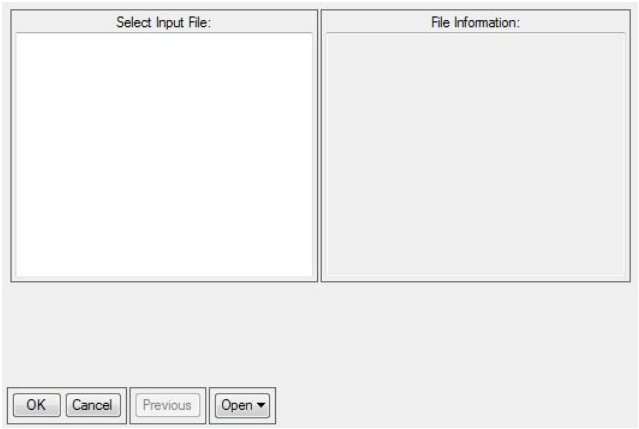


Figura 3.30: Calculo del NDVI.

La diferencia de esta herramienta con el Álgebra de Bandas es que esta herramienta ya incorpora la ecuación, por lo que no hay necesidad de ingresar la expresión del NDVI, así que solo sera necesario seleccionar la imagen que contiene la banda del infrarrojo cercano y la banda del rojo y se procederá a calcular el índice de vegetación. Cabe mencionar que los índices de vegetación proporcionados en ENVI no están diseñados para cuantificar la concentración exacta o la abundancia de cualquier componente de vegetación dado.

Con base en la resolución espectral de la plataforma satélital LandSat 8 se seleccionaron un total de 3 indices de vegetacion a utilizar para el análisis multiespectral de las imágenes satélitales los cuales son NDVI (***Ecuación*** 2.7), WDRVI (***Ecuación*** 2.8) y finalmente CVI (***Ecuación*** 2.13), cuya finalidad sera poder deducir que zonas de la parcela requieren mas o menos

cantidad de fertilizante nitrogenado. Para calcular estos índices se utilizarán las ecuaciones mencionadas y la forma en que se introducirán al software se muestra en la ***Tabla*** 3.12.

Tabla 3.12: Ecuaciones introducidas al software ENVI 5.3.

Indice de Vegetación	**Ecuación**
NDVI	$b1 - b2/b1 + b2$
WDRVI	$0{,}1 * b1 - b2/0{,}1 * b1 + b2$
CVI	$b1 * (b2/b3)^2$

Donde $b1$ es la banda que comprende al infrarrojo cercano del sensor, $b2$ es la banda de la porción del rojo y finalmente $b3$ es la banda que contiene la porción del verde de espectro. Tras realizar las operaciones se genera un archivo nuevo para cada resultado (por índice de vegetación) donde se podrá apreciar el valor resultante que obtuvo cada pixel de los resultados para poder realizar el análisis pertinente para la toma de decisiones.

3.4.4. Cálculo del Indice de Área Foliar

Como se menciono anteriormente en la descripción del indice de vegetación WDRVI (***Ecuación*** 2.8) este indice surgió de la necesidad de mejorar la sensibilidad del NDVI cuando el **LAI** (Leaf Area Index) es mayor a 2, por lo que se consideró necesario utilizar este factor para esta investigación.

El Indice de Área Foliar, IAF o LAI por sus siglas en inglés, es una expresión numérica adimensional cuyo resultado es el proceso de la división aritmética del área de las hojas de un cultivo expresado en m^2 y el área de suelo sobre el cual se encuentra establecido, donde se expresa de la misma magnitud (Warnok, 2006). El IAF permite estimar la capacidad fotosintética de las plantas y ayuda a entender la relación entre la acumulación de biomasa y el rendimiento bajo condiciones ambientales imperantes en una región determinada.

Este factor es una herramienta útil para el desarrollo de modelos predictores de cosecha y una forma precisa de estimar la capacidad de captura de luz del dosel vegetal. Aunque la intercepción de luz tiene a saturarse en cuando el IAF es mayor a 3, la distribución de las hojas puede afectar la eficiencia de uso de la luz. El IAF también permite evaluar el desarrollo y crecimiento de los cultivos en los estudios de requerimientos hídricos y evaluaciones sobre eficiencia bioenergética o determinar el daño producido por plagas y enfermedades sobre el follaje. La estimación del rendimiento en distintos cultivos puede basarse en el IAF determinado en alguna etapa fenológica y previamente correlacionado mediante algún método de determinación, los cuales pueden ser destructivos y no destructivos, *in situ* o determinaciones por métodos empíricos (Tinoco, 2008). Esta correlación deberá ser realizada para un cultivo bajo condiciones regionales acotadas. A nivel experimental se ha demostrado que la acumulación de materia seca hasta la cosecha y el IAF son características con estrecha correlación con el rendimiento para cultivos como cereales, tubérculos, solanáceas, leguminosas y cultivos industriales.

El IAF puede estimarse por diferentes métodos (Acosta, 2008), algunos de estos se describirán a continuación:

- ***Métodos Destructivos***. Consisten en la toma de muestras representativas del cultivo y se contabiliza el área foliar por medio de ceptómetros (integrador de área electrónico).
- ***Calculo Empírico***. Para este método se deben de tomar dos plantas por unidad de estudio, posteriormente se medirá y multiplicará el largo por ancho de cada hoja, el resultado se multiplicará por el factor 0.75, después se sumarán los valores obtenidos de cada hoja por planta, y finalmente se promediará el área de suelo ocupada por planta. El IAF sera determinado dividiendo el área foliar de la planta entre el área de suelo ocupada por ésta, la siguiente ecuación muestra una forma empírica de calcularlo:

$$IAF = \frac{AreaFoliar \cdot DensidadPoblacion}{AreaSembrada} \tag{3.2}$$

- ***Métodos No Destructivos***. El ceptómetro lineal estima el IAF *in situ*. Estos equipos pueden calcular el Iag con alto coeficiente de correlación con el rendimiento ($R^2 = 0{,}9$) para condiciones de riego. El principio del funcionamiento de estos equipos es medir la intensidad lumínica sobre y debajo del dosel del cultivo, para el empleo de estos aparatos se debe considerar el ángulo solar y el cielo despejado.

Para el caso particular del maíz se distinguen tres periodos de crecimiento, el primero donde las plantas pequeñas que no se sombrean entre si con tasas de crecimiento y acumulación de materia seca exponenciales, el segundo cuando el cultivo cubre por completo el suelo maximizando la intercepción de luz con tasas de crecimiento constante y el incremento de peso en seco se da de forma lineal, por último cuando se llega la senescencia de las hojas y se presenta decremento en la tasa de crecimiento.

En este punto cabe aclarar que solo la radiación dentro del espectro visible de 0.4 a 0.7 micrómetros esta disponible para ser usada por el cultivo, realizar fotosíntesis e impactar en el crecimiento y desarrollo de las plantas. El IAF máximo para el caso de maíz es alcanzado durante la floración (Camacho, 1995). La acumulación de materia seca es influenciada por la tasa fotosintética que la planta logra interceptar y la nutrición mineral que recibe.

Para esta investigación en particular se utilizó un método distinto a los mencionados para el calculo del IAF, este nuevo método involucra imágenes satelitales junto con factores empíricos para poder calcular el IAF. De acuerdo con Richard y Tasumi (2002) el IAF puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$IAF = -\frac{ln\frac{0{,}69-SAVI}{0{,}59}}{0{,}91} \tag{3.3}$$

Donde el SAVI corresponde al Índice de Vegetación Ajustado al Suelo que se calcula usando la ecuación:

$$SAVI = \frac{\varphi_{NIR} - \varphi_{RED}}{\varphi_{NIR} + \varphi_{RED} + L}(1 + L) \tag{3.4}$$

Donde NIR y RED son las reflectividades para las bandas del infrarrojo cercano y rojo, y L es una constante que pretende sustraer el efecto de la humedad del suelo sobre los índices de vegetación. Si L es igual a cero la expresión anterior se convierte en el bien conocido NDVI.

No obstante, la primera expresión es una ecuación empírica que ha sido calibrada sólo para el Sur de Idaho y no es de uso universal, por lo que a trabajo futuro se deberá comparar la precisión para otros tipos de suelo en otras zonas del planeta. (Richard y Tasumi, 2002) usaron un valor de L igual a $0{,}1$ porque la desviación estándar fue mínima para cinco condiciones de suelo que evaluaron. Ese es el valor que se asumirá en nuestro caso, por otra parte, ellos determinaron que el valor máximo del IAF es $6{,}0$ por lo que esto corresponde a un SAVI máximo de $0{,}687$. Se refiere que a partir de allí los valores de SAVI se saturan con el incremento del IAF y no cambian de manera significativa. Si el SAVI es menor de $0{,}1$ entonces se asume que el IAF es igual a $0{,}00001$. Estas son condiciones necesarias para el álgebra de bandas. El software que se utilizó para obtener el IAF fue mediante la herramienta *GRASS* de *Qgis*, donde se utilizó el álgebra de bandas para calcular el SAVI de forma similar a los demás índices y el IAF utilizando la ecuación descrita.

3.5. Procesamiento de los Datos del Prototipo Electrónico

Conforme se describió en la metodología al inicio del capítulo presente, se realizaron seis campañas de mediciones *in situ* cada mes con el prototipo electrónico para obtener muestras de humedad relativa y temperatura de cada punto de control de la parcela. La información generada por el dispositivo se guardará en formato de texto con formato de matriz $4 \times n$, es decir, se obtendrán cuatro columnas o atributos en donde cada fila tendrá información sobre *Latitud*, *Longitud*, *Humedad Relativa* y *Temperatura* en este orden respectivamente. Esta información sera procesada mediante un software especializado en GIS como *ArcGIS* por lo que será necesario asignar un formato mas accesible añadiéndole encabezado de cada atributo y un nombre para cada punto de medición generado, esto se realizara mediante un programa en C-ANSI el cual modificara el archivo agregándole la información mencionadas.

Una vez adaptado el formato, se procesaran con ArcGIS mediante la herramienta Geoestadística IDW (*Inverse Distance Weighted*) la cual utiliza el método de interpolación mediante distancia inversa ponderada que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. En donde la ponderación es una función de la distancia inversa y la superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. El método IDW está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática. El parámetro *Potencia* le permite controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida, es un número real positivo y su valor predeterminado es dos. Al definir un valor de potencia más

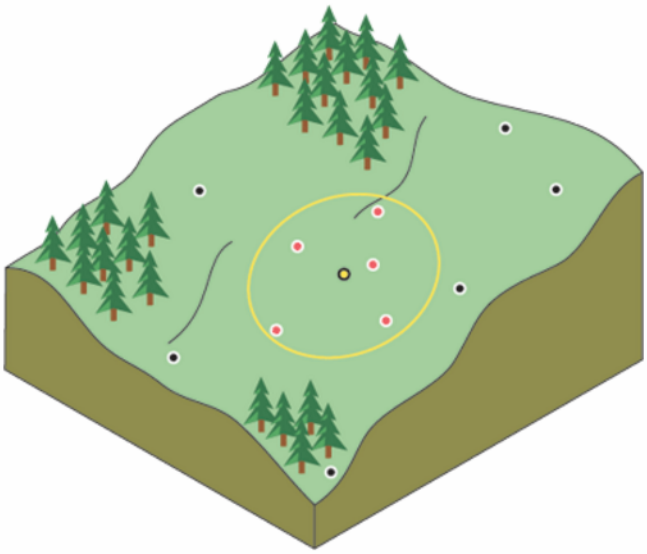


Figura 3.31: Vecindad de IDW del punto seleccionado (Manual de ArcGIS).

alto, se puede poner más énfasis en los puntos más cercanos, entonces, los datos cercanos tendrán más influencia y la superficie tendrá más detalles (será menos suave). A medida que aumenta la potencia, los valores interpolados comienzan a acercarse al valor del punto de muestra más cercano (Philip y Watson, 1982). Al especificar un valor más bajo de potencia, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, lo que resulta en una superficie más suave.

Debido a que la fórmula de IDW no está relacionada con ningún proceso físico real, no hay forma de determinar que un valor de potencia en particular es demasiado grande. Como guía general, una potencia de 30 se considera extremadamente grande y su uso sería cuestionable. También se debe tener en cuenta que si las distancias o el valor de potencia son grandes, los resultados pueden ser incorrectos, podría decirse ademas que el valor óptimo para la potencia es donde el error absoluto medio mínimo se encuentra en su punto más bajo (Watson y Philip, 1985).

Las características de la superficie interpolada también pueden controlarse limitando los puntos de entrada que se utilizan en el cálculo de cada valor de celda de salida. Limitar la cantidad de puntos de entrada considerados puede mejorar la velocidad de procesamiento. También se debe considerar que los puntos de entrada que están lejos de la ubicación de la celda donde se realiza la predicción pueden tener escasa o ninguna correlación espacial, esto puede ser una razón para eliminarlos del cálculo. Los mejores resultados de la IDW se obtienen cuando la muestra es lo suficientemente densa respecto de la variación local que intenta simular, si la muestra de los puntos de entrada es dispersa o despareja, los resultados pueden no representar en forma suficiente la superficie deseada. Finalmente cabe mencionar que la herramienta contiene siete parámetros de entrada los cuales se describen a continuación:

```
Idw_3d (in_point_features, z_field, out_raster,
{cell_size}, {power}, {search_radius},
```

```
{in_barrier_polyline_features})
```

Donde ***in point features*** son las entidades de puntos de entrada que contienen los valores z que se interpolarán en un ráster de superficie, ***z field*** es un campo que contiene un valor de altura o magnitud para cada punto, ***out raster*** es el ráster de superficie interpolado de salida, ***cell size*** es el tamaño de celda con el que se creará el ráster de salida, ***power*** es el exponente de distancia, ***search radius*** define cuáles de los puntos de entrada se utilizarán para interpolar el valor para cada celda en el ráster de salida y finalmente in ***barrier polyline features*** son entidades de polilínea que se utilizarán como corte o límite en la búsqueda de puntos de muestra de entrada.

Capítulo 4

Resultado y Análisis

En este capítulo se mostrarán los resultados de la experimentación y metodología descrita en el ***Capítulo*** 3 así como el respectivo análisis estadístico para cada caso pertinente.

4.1. Banderilleo Satélital del Área de Estudio

Como lo sugiere la metodología propuesta (***Figura*** 3.1) el primer proceso consistió en la delimitación del área de estudio utilizando la tecnología GPS mediante el uso del DGPS, para esto se realizó una visita de campo a la parcela con los equipos mencionados en la ***Sección*** 3.1.2, a continuación se describirá el proceso y resultado del proceso.

4.1.1. Resultado de las Mediciones GPS

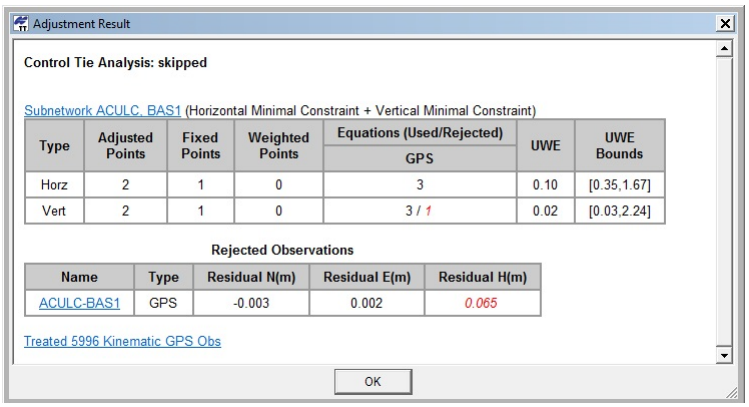
Se ubicó un punto de inicio en el área de estudio para la estación móvil y se instaló la estación base a 59 metros del área de estudio con la cual se realizaron las correcciones para mejorar la precisión de las mediciones. Una vez instalada la estación base se configuró para tomar mediciones cada segundo durante un lapso de 40 minutos el cual fue el tiempo que se tardó en recorrer la estación móvil rodeando el área cultivada, el nombre del archivo en formato RAW que se selecciono para esta estación fue **`Base1.m00`**.

De igual forma se configuro el otro equipo GPS como estación móvil y se comenzó a recorrer el contorno de la parcela, este equipo también toma mediciones cada segundo y se colocó de forma estática durante un minuto en cada una de las cuatro esquinas de la parcela, el nombre del archivo en formato RAW que se seleccionó para la estación móvil fue **`Rover2.m00`**.

Una vez finalizadas las mediciones se accedió al sitio web de *INEGI* para descargar las mediciones de la red geodésica nacional activa para la red de Culiacán la cual se llama *CULC* para el mismo día y hora de las mediciones el cual fue el 11 de Junio de las 11:00 a las 13:00 horas del respectivo día.

Teniendo las datos descargados de *INEGI* se utilizo el programa *UNERINEX* para unir los archivos que corresponden a las horas del día, al realizar esto se obtuvieron los archivos de navegación y observación correspondientes (**`CULC1630.16N`** y **`CULC1630.16O`**) los cuales se utilizaron en el software *TopCon Tools* para realizar el procesamiento correspondiente siguiendo la metodología de la ***Sección*** 3.1.3 en donde el resultado del ajuste se muestra en la (***Figura*** 4.1).

Ya realizado el procesamiento y ajuste se obtiene el polígono de las mediciones, el cual se exportó en formato **`.DWG`** compatible con el software de dibujo asistido por computadora *AutoCAD*, en donde se puede apreciar el



Adjustment Result

Control Tie Analysis: skipped

Subnetwork ACULC_BAS1 (Horizontal Minimal Constraint + Vertical Minimal Constraint)

Type	Adjusted Points	Fixed Points	Weighted Points	Equations (Used/Rejected) GPS	UWE	UWE Bounds
Horz	2	1	0	3	0.10	[0.35,1.67]
Vert	2	1	0	3 / 1	0.02	[0.03,2.24]

Rejected Observations

Name	Type	Residual N(m)	Residual E(m)	Residual H(m)
ACULC-BAS1	GPS	-0.003	0.002	0.065

Treated 5996 Kinematic GPS Obs

OK

Figura 4.1: Resultado del Ajuste de las Mediciones.

polígono resultante de las mediciones de ambas estaciones. En este software se puede calcular el área de la parcela de forma precisa utilizando las mediciones (coordenadas) de cada punto, trazando de esta forma una polilinea entre cada punto para generar la forma y calcular el área, ademas permite verificar y calcular la distancia de la estación base con respecto al limite de la parcela, a continuación se muestra el resultado y polígono de las mediciones en *AutoCAD*.

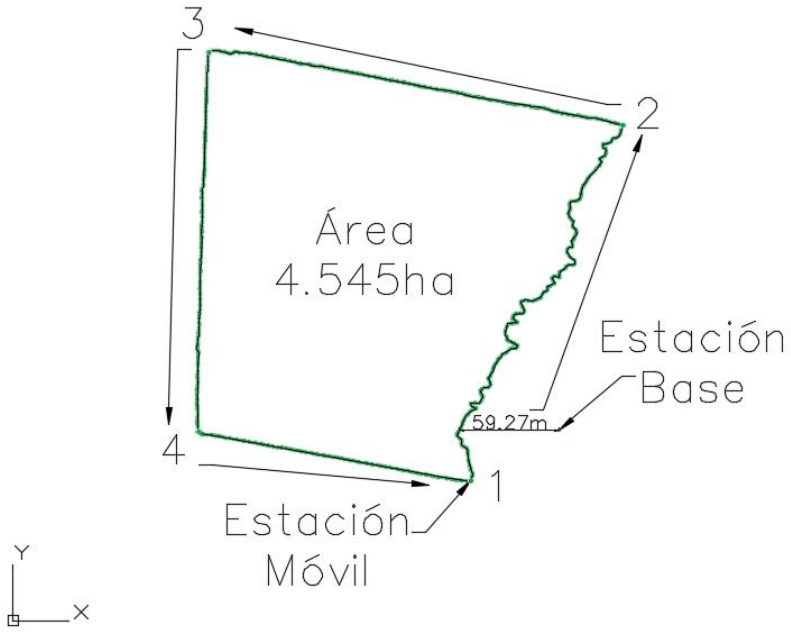


Figura 4.2: Polígono del Área de Estudio utilizando DGPS.

En la imagen anterior se muestra el polígono resultante de las mediciones, donde se muestra un área total cultivada de 4.5 hectáreas y la distancia entre la estación base con respecto al borde cultivado es de 59.27m, para la medición de la estación móvil se siguió la ruta mostrada en la imagen, iniciando desde el punto 1 al 2 y así sucesivamente hasta llegar de nuevo al punto inicial, en la (***Tabla** 4.1*) se muestran las coordenadas de la estación base y los 4 ejes de la parcela:

Tabla 4.1: Coordenadas Geográficas del Polígono

Punto	Latitud	Longitud
Estación Base	$24^o60'90{,}54"$N	$107^o49'20{,}22"$O
Punto 1	$24^o60'87{,}73"$N	$107^o49'25{,}34"$O
Punto 2	$24^o61'06{,}96"$N	$107^o49'16{,}80"$O
Punto 3	$24^o61'10{,}49"$N	$107^o49'41{,}18"$O
Punto 4	$24^o60'90{,}10"$N	$107^o49'41{,}40"$O

4.2. Desarrollo del Prototipo Electrónico

Terminado el proceso de banderilleo satélital para la delimitacion del polígono el cual servirá para tener definida y georreferenciada la zona de estudio con la mayor precisión posible se procedió a fabricar el prototipo electrónico así como la aplicación móvil para celular con base en la metodología descrita en las ***Secciones*** 3.2 y 3.3 respectivamente, a continuación se mostraran las fases de fabricación del prototipo.

4.2.1. Fabricación del Prototipo Electrónico

Con base en el diagrama 3.22 se realizo las conexiones mostradas en un protoboard con el fin de realizar pruebas de funcionamiento de los módulos principales, primero se realizaron pruebas de comunicación del bluetooth y después se incorporó el modulo GPS donde se realizan mediciones cada segundo una vez que se hayan localizado 5 satélites, al final se incorporó el sensor de humedad y temperatura el cual cuenta con un PCB independiente, esto con el fin de que no esté incorporado al *shield* directamente y esté en contacto con el medio ambiente sin estar expuesto completamente, en la (***Figura*** 4.3) se muestra el prototipo funcionando en un protoboard.

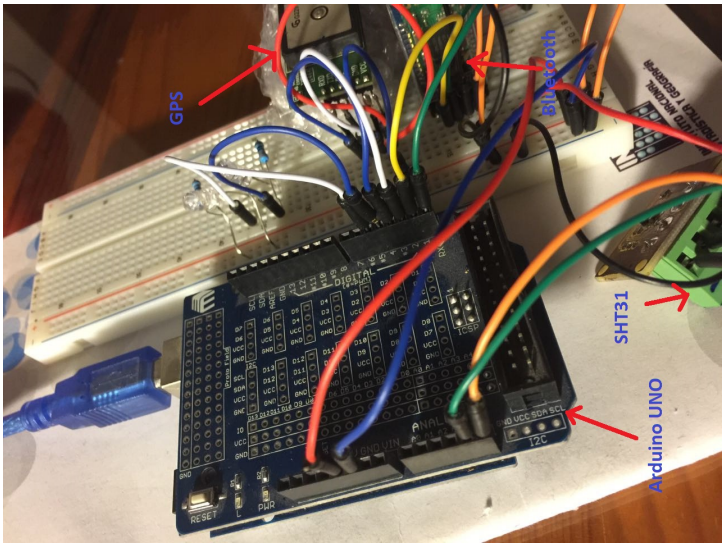


Figura 4.3: Prototipo en fase de pruebas.

En la imagen se puede apreciar el prototipo en el protoboard con todos sus módulos conectados en el cual ya se pueden realizar pruebas con el Arduino, para la programacion se siguió la lógica descrita en la ***Sección*** 3.2.8 y se cargó el programa con el software para Arduino, una desventaja de mantener el prototipo en este estado en la debilidad de los cables que se utilizaron para realizar las conexiones ya que solo una porción de 4mm entra en el protoboard por lo que cualquier movimiento es suceptible a debilitar el cable y ocasionar cortos circuitos, para solucionar esto se procede a la siguiente fase la cual consistió en la fabricación del *shield* o PCB.

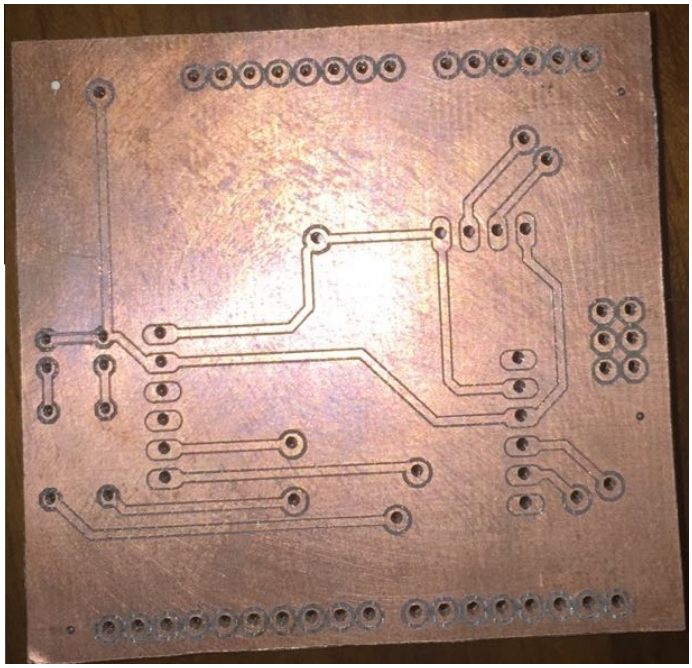


Figura 4.4: Shield o PCB del Prototipo.

El diseño del *shield* el cual se pudo apreciar en la (***Figura*** 3.24) fue diseñado con el software *Eagle PCB*, se realizó un diseño de doble capa para garantizar que los módulos estuvieran instalados en la zona superior del PCB y algunas soldaduras en la zona inferior, en la imagen del diseño las pistas de color rojo pertenecen a la zona superior y las pistas de color azul a la zona inferior, la placa de baquelita se fabricó en un laboratorio en una impresora especializada para PCB, en la (***Figura*** 4.4) se muestra el *shield* fabricado.

El siguiente paso consistó en soldar los módulos al *shield*, para esto se utilizó estaño como soldadura y cautín, otros materiales utilizados fueron pines machos cuya función es ensamblar el *shield* con el Arduino, para realizar la transmisión de voltaje, tierra y los módulos; ademas se utilizaron 10 pines como puentes para transmitir conductividad de algunas pistas de la zona superior a la inferior o viceversa. Una vez realizadas todas las soldaduras se procedió a verificar la conductividad de las pistas para buscar cortos circuitos debido a exceso o falta de soldadura en algunos nodos, esto se realiza con la función de conductividad del multímetro.

Una vez soldados los módulos y verificado que no haya corto circuito

se procedió a ensamblar el *shield* con el Arduino para verificar que el funcionamiento sea el correcto, para esto se colocó el prototipo en un área con cielo despejado y descubierto y se conectó el Arduino a una batería externa cuya salida es de 5 volts y 1 ampere como se muestra en la (***Figura*** 4.5).

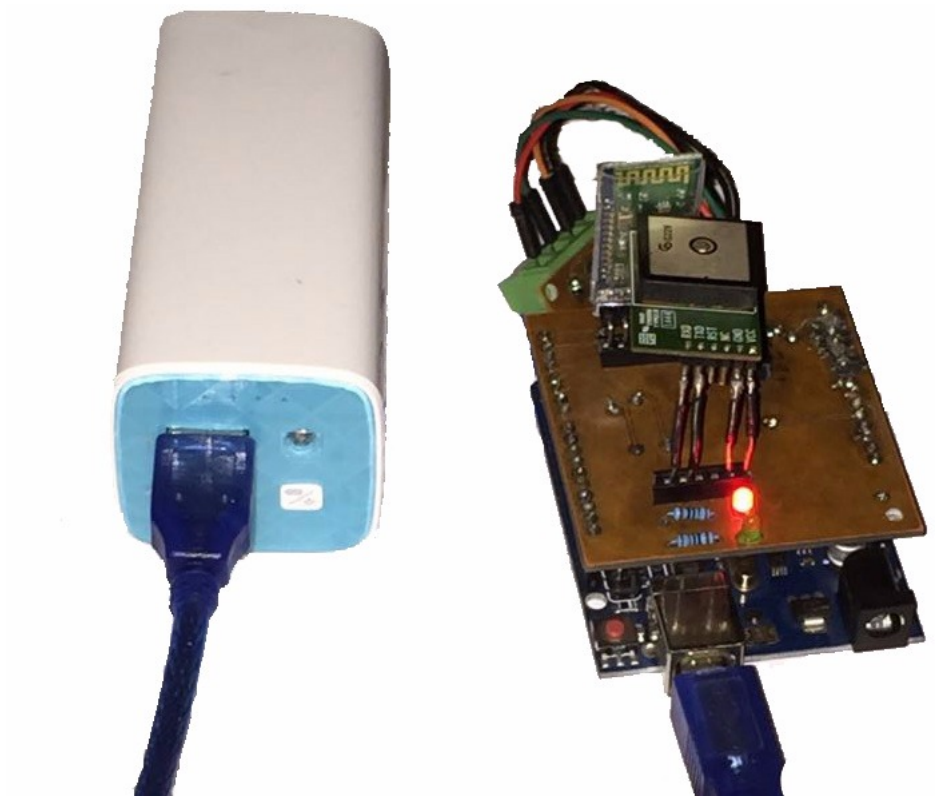


Figura 4.5: Prototipo con Módulos Instalados.

Como se indica en el pseudocódigo del programa, al iniciar el Arduino se inicia buscando satélites en este estado del GPS el led de color rojo esta encendido, cuando se hayan encontrado 5 o mas satélites el estado del modulo GPS cambia para enviar la informacion de las coordenadas por comunicación serial, para este estado el led de color rojo de apaga y se enciende el led de color verde. En este punto el prototipo ya es capaz de enviar informacion de las coordenadas, humedad y temperatura por el módulo bluetooth con un dispositivo inalámbrico compatible. El tiempo que tarda el GPS en comenzar a enviar la informacion depende del clima de la zona así como la nubosidad, en cielo completamente despejado el tiempo puede ser de 5 segundos mientras que en cielo nublado o con grandes concentraciones de nubosidad el tiempo puede llegar a ser de 30 segundos hasta 5 minutos.

La última fase de la fabricación del prototipo consistió en colocarlo en una carcasa para proteger los componentes electrónicos del medio ambiente como el polvo o la humedad, para esto se adquirió una caja ABB con 6 *knockouts* los cuales servirán para extraer el cable USB del Arduino para la toma de energía, las medidas de la caja ABB son 10.5cm de cada lado y 5.5cm de alto, los tres módulos principales (GPS, Bluetooth y Sensor de Humedad y Temperatura) del prototipo quedaron instalados en el interior

de la caja, así de este modo se protegerán los circuitos electrónicos de factores naturales del medio ambiente (presentes en el campo) que pudieran dañarlo, por ejemplo exceso de humedad y polvo, sin embargo, se realizó un corte pequeño en un *knockout* y se colocó el sensor de humedad y temperatura cerca de él para que tuviera contacto con el exterior, el prototipo final ensamblado en la caja ABB se muestra en la (***Figura*** 4.6).

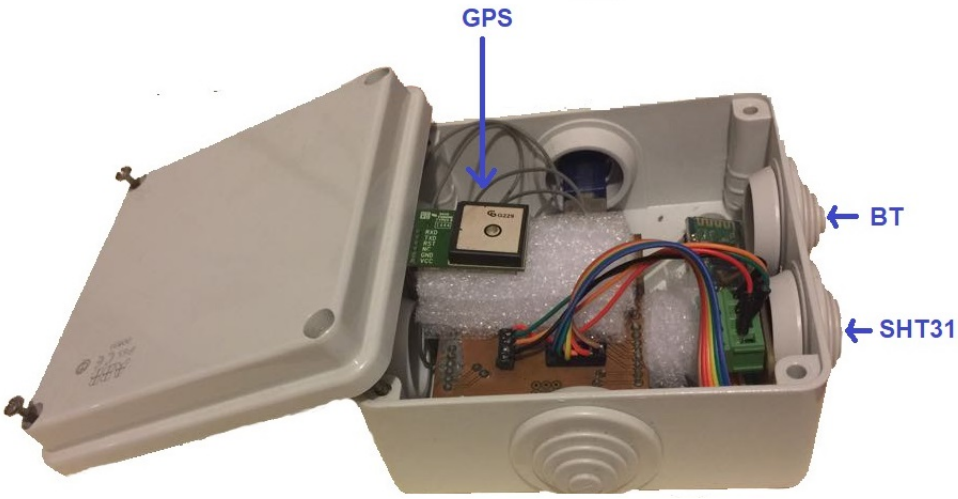


Figura 4.6: Prototipo Electrónico Etapa Final.

4.2.2. Desarrollo de la Aplicación Móvil

Con base en la ***Sección*** 3.3 se utilizaron los elementos de diseño mencionados en App Inventor para el desarrollo de la aplicación móvil, de igual forma para el entorno de programación se siguió la lógica del *pseudocódigo*, para la fase de programación de la aplicación, se compilo y se generó el código QR correspondiente para instalar la aplicación al celular.

La fase de diseño y programación pasó por varias revisiones, esto para refinar en cada revisión y garantizar el funcionamiento óptimo de la aplicación, las partes que se perfeccionaron en la aplicación con base en su primer versión fue la forma en que se guarda la información y el funcionamiento de los botones par recibir y guardar información, programando un reloj para desactivar por 4 segundos uno de los botones según sea el caso, para evitar presionar por error cualquiera ellos de modo que se produzca sobreposición de información y se muestre mal la información.

En el celular se descargó la aplicación de App Inventor llamada *MIT AI2 Companion* cuya función es leer los códigos QR generados desde la plataforma en linea para instalar las aplicaciones creadas en el celular, una vez instalada la aplicación se puede proceder a recibir los datos enviados por el prototipo como se muestra en la (***Figura*** 4.7):

Una vez que se realizo previamente la conexión del celular con el modulo bluetooth mediante la configuración principal del celular se puede utilizar la aplicación, al realizar el emparejamiento mediante el botón *Connect* este se desactiva y se activa el botón *Disconnect*, tras esto se muestra el cuadro de texto para introducir el nombre del archivo donde se guardará la

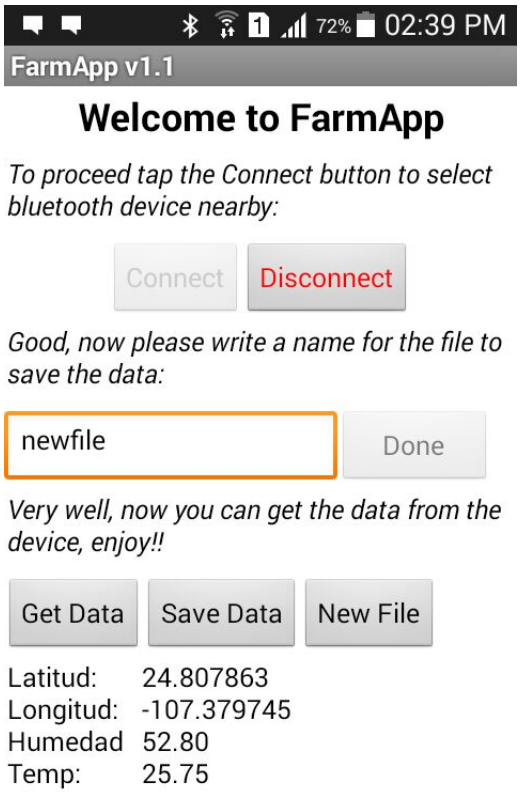


Figura 4.7: Aplicación Móvil etapa Final.

información y presionar el botón *Done*, por ultimo se muestran 3 botones nuevos y el cuadro de información donde se muestran los datos que envía el Arduino, el primer botón *Get Data* muestra la información en pantalla, el segundo botón *Save Data* guarda la información recibida en el archivo de texto y el último botón *New File* permite crear un archivo nuevo sin necesidad de desconectarse del dispositivo bluetooth de la aplicación, finalmente para salir de la aplicación basta con pulsar el botón *Disconnect* para regresar a la fase inicial o salir de ella.

El archivo de texto generado después de una sesión de prueba se puede apreciar en la (***Figura*** 4.8), como se puede apreciar en la imagen, el formato con el que se guarda la información es diferente del formato mostrado en la aplicación móvil, en onde la información se despliega en formato de lista, es decir, cada atributo debajo de otro, mientras que en el formato de texto se guarda en formato de matriz la cual puede ser de $m \times 4$ dependiendo de la cantidad de lecturas que se realice en una sesión de trabajo. Los atributos de la información serán siempre los mismos, mostrándose en el siguiente orden, *Latitud*, *Longitud*, *Humedad* y *Temperatura*; de esta forma, la informacion puede ser procesada mas fácilmente por software de estadística y sistemas de información geográficas para ser posteriormente integradas al SIG y mapa de rendimiento que se realizó a través de tres sesiones de trabajo.

Para facilitar la interpretación de la información se desarrollo un programa en C-ANSI que procesa la información agregándole los atributos y elimina los espacios entre lineas, además de agregar un nombre para cada

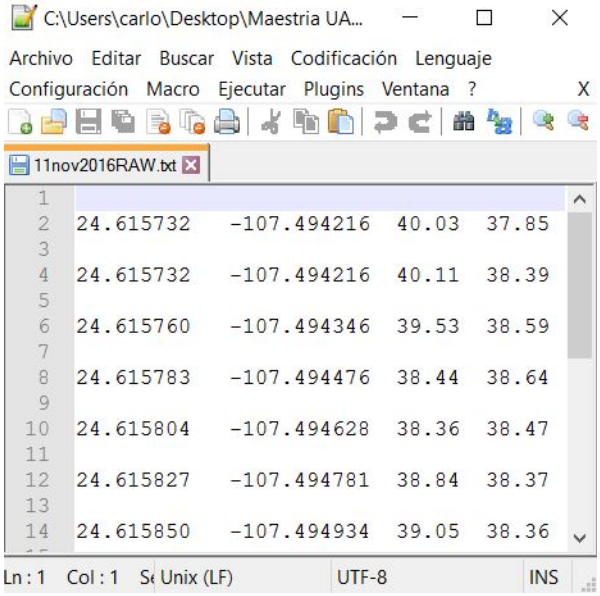


Figura 4.8: Archivo con la Información.

uno de los puntos de interés, el archivo resultante se muestra a continuación:

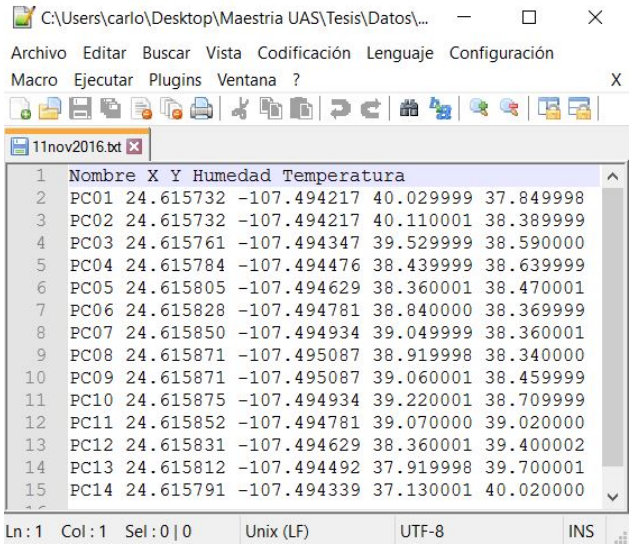


Figura 4.9: Archivo con la Información Procesada.

El programa recibe como parámetros el nombre de los archivos de texto hasta n cantidad de archivos, genera un directorio nuevo si no existe e introduce los archivos procesados dentro del directorio, este formato puede ser incluso utilizado directamente sin ninguna modificación en el software *Google Earth*, en el cual solo se seleccionaran los atributos y se cargará cada punto de interés en el mapa automáticamente.

4.3. Análisis Multiespectral de las Imágenes Satelitales

Una vez que la información o los datos recopilados *in situ* de campo estén procesados y disponibles para realizar un análisis estadístico y de interpolación para generar mapas en función de humedad relativa y temperatura se procedió calcular los índices de vegetación propuestos en la ***Tabla*** 3.12. Las imágenes satelitales se adquirieron con una resolución temporal de 30 días, es decir, se proceso el área de estudio una vez al mes, iniciando con el mes de Diciembre del año 2016 y terminando con el mes de Mayo de 2017, el cual comprende el estudio fenológico para las etapas vegetativas y reproductivas del maíz de riego para el periodo *Otoño-Invierno*. El resultado del análisis para Diciembre se muestra en la ***Figura 4.10***.

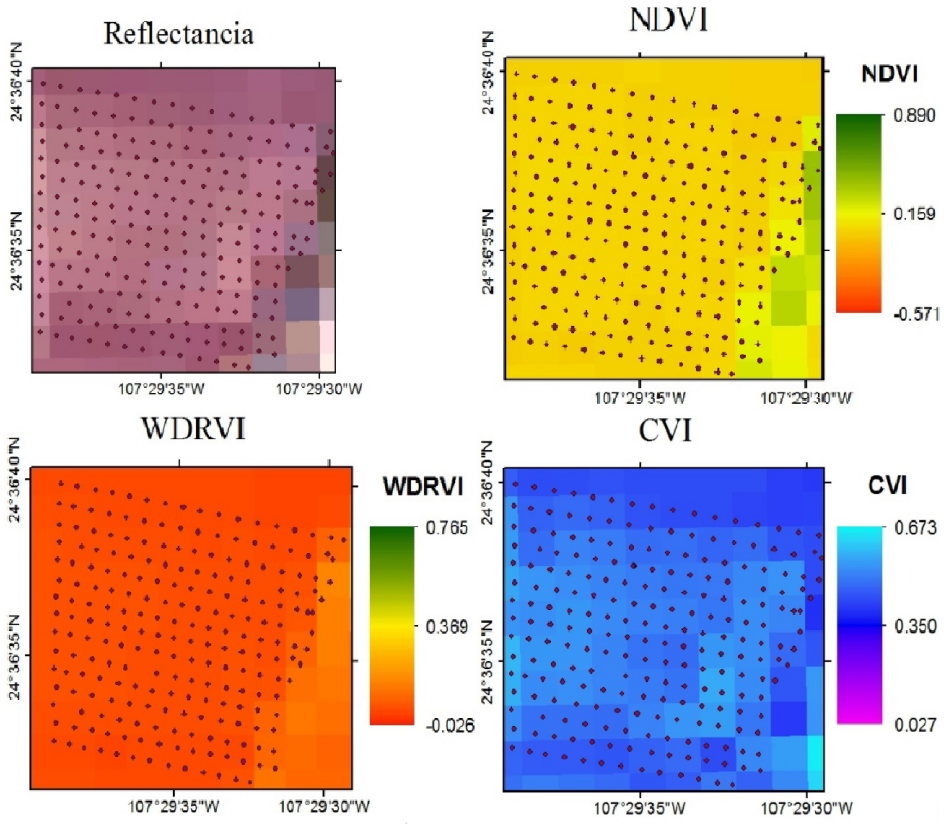


Figura 4.10: Resultado del análisis multiespectral para Diciembre.

Durante este mes, el área de estudio se encontraba sembrada de maíz, ya que visiblemente no se apreciaba vegetación (se apreciaba suelo desnudo) debido a que solo han transcurrido aproximadamente 15 días desde la siembra, el resultado del análisis multiespectral refleja la situación, ya que la media del NDVI y el WDRVI están por debajo de 0.2 indicando suelo desnudo o muy poca vegetación, sin embargo, la información brindada por el análisis multiespectral para este mes sirvió para conocer y comparar los cambios en los ND de los pixeles con respecto a los meses posteriores donde se espera vegetación mas desarrollada.

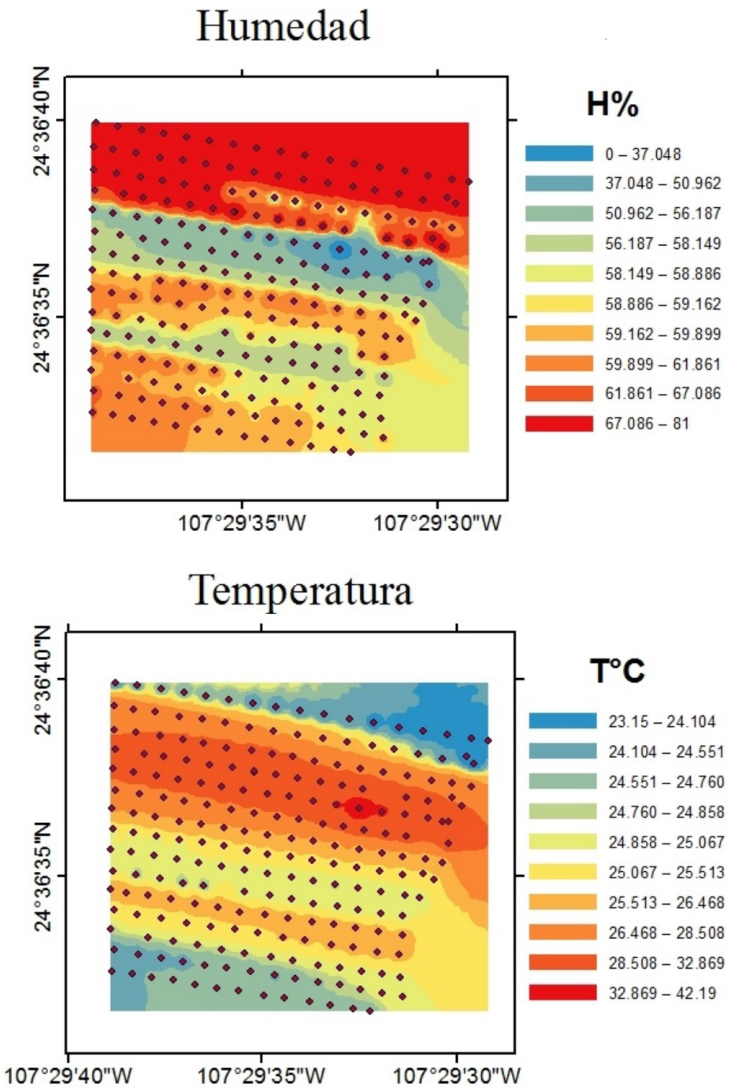


Figura 4.11: Mapas de Humedad y Temperatura para Diciembre.

Para los mapas de interpolación de humedad relativa y temperatura se muestra un promedio de 60.83 de humedad y 26.36 de temperatura lo cual esta dentro de las márgenes establecidos para que el cultivo de maíz tenga un crecimiento saludable. Sin embargo, el comportamiento de la humedad y temperatura fue variable dentro del tiempo de medición, para el caso de la humedad visiblemente se puede observar mayor humedad en la zona norte del área que comprende los primeros 15 puntos de control y un breve decremento en la zona intermedia a excepción de los puntos de control 24 al 31, finalmente alcanzando nuevamente un incremento menor en la zona sur en los últimos 15 puntos. Las estadísticas para el análisis de este mes se muestran en la ***Tabla A.3*** donde se puede corroborar la información mencionada y mostrada en los mapas.

Como se mencionó anteriormente durante este mes no había vegetación visible en el área de estudio, la (***Figura*** 4.12) muestra el estado del suelo durante el tiempo en que se realizaron las mediciones *in situ*.

Figura 4.12: Suelo del Área de Estudio durante el mes de Diciembre.

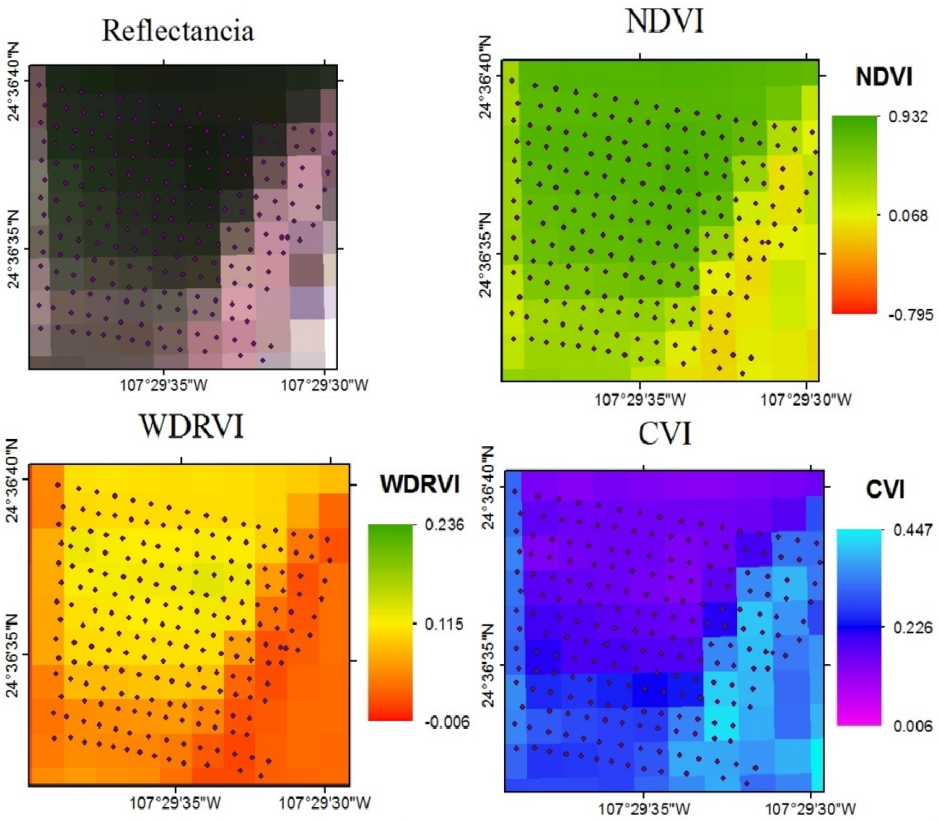


Figura 4.13: Resultado del análisis multiespectral para Enero.

Aunque la etapa vegetativa del maíz en este mes es muy temprana para poder que los índices de vegetación brinden la información necesaria para

la identificación de zonas con problemas de estrés hídrico o estado nutricional para la toma de decisiones en cuanto a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, se puede verificar que los datos recopilados por el prototipo electrónico ayudan a identificar que otros factores como la humedad y temperatura están dentro del rango adecuado establecido para que el maíz tenga un crecimiento saludable; por lo tanto se espera que para los otros meses los valores digitales de los pixeles resultantes de los índices de vegetación se incrementen considerablemente ya que la vegetación estará visible y la reflectancia de la parcela se incrementara en el infrarrojo al contrario de este mes donde la firma espectral corresponde a la de suelo en vez de vegetación, también se realizó el cálculo del IAF en este mes alcanzando una media de 0.022 para la parcela, concordando con el resultado de los índices de vegetación.

Para el mes de *Enero* el panorama cambia considerablemente como se esperaba, ya que el maíz es visible alcanzando una altura de aproximadamente 55 cm, el análisis multiespectral de este mes se muestra en la ***Figura 4.13***.

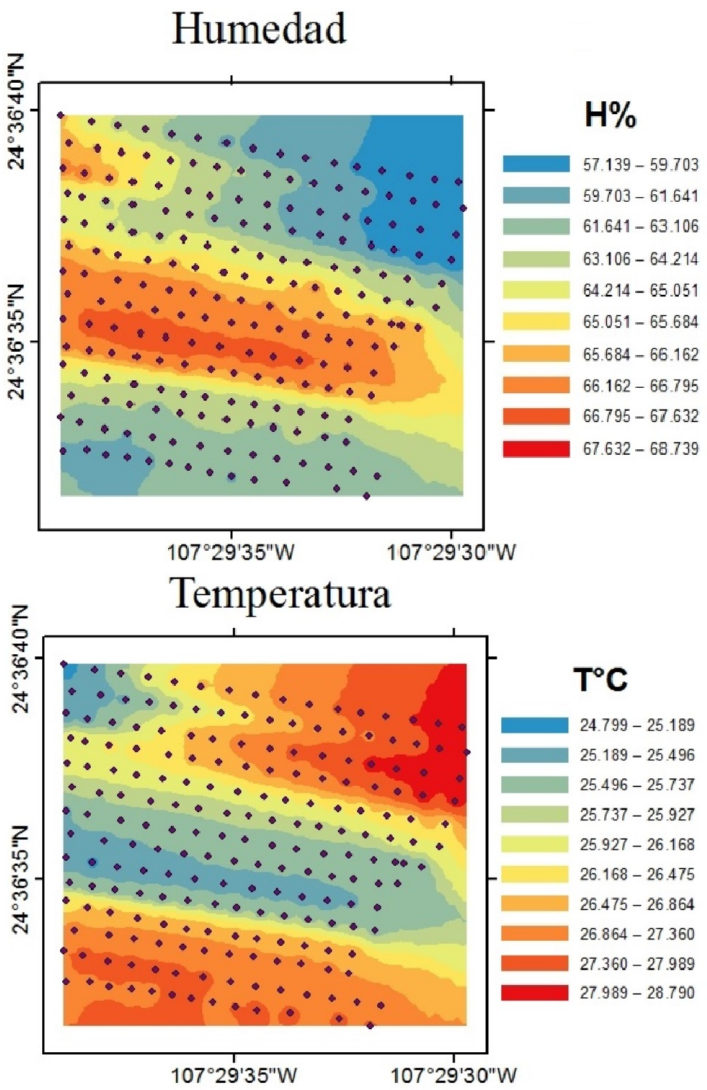


Figura 4.14: Mapas de Humedad y Temperatura para Enero.

Donde el NDVI refleja vegetación sana ya que la media alcanza los 0.594 estando por encima del umbral crítico entorno a los 0.2 con el cual se identifica a la vegetación, para el caso del WDRVI la media alcanza los 0.067 inferior al NDVI, donde apenas se alcanza a distinguir una zona de poco verdor o salud vegetal, para el CVI la media es de 0.235 donde se percibe una relación con los otros indices de vegetación en el cual el comportamiento de este ultimo tiende a disminuir su valor conforme se incrementa el de los otros dos, es decir, detecta mayor contenido de clorofila en las zona norte de la parcela. En cuanto a los datos *in situ* recopilados por el prototipo electrónico se observa en el mapa de interpolación de humedad que la zona norte y sur de la parcela presentan humedad inferior con respecto a la zona central que es donde se registró la mayor humedad de la parcela, caso contrario se presenta en el mapa de temperatura, donde las zonas norte y sur presentan mayor temperatura con respecto a la zona central que presenta menor temperatura, de aquí el hecho que para este mes ambos factores estén correlacionados.

Figura 4.15: Vegetación del Área de Estudio durante el mes de Enero.

Cabe mencionar que ambos factores siguen estando dentro del rango establecido el cual es muy importante en el desarrollo del maíz, donde la media de la humedad es de 63.81 y la media de la temperatura es de 26.44, por lo cual se puede estimar que este mes no presenta problemas con respecto a estos factores, aun así, el resultado del WDRVI indica un exceso fertilización para el puntos de control 20 y 21 donde se aprecian valores digitales mayores con respecto a los demás puntos de la parcela, sin embargo esta situación no se aprecia en el NDVI ya que comienza a presentar problemas de saturación relacionados con el IAF. Para comprender mejor lo que se esta visualizando en el mapa se presenta la ***Tabla A.4*** la cual contiene los datos estadísticos del mes de Enero.

La etapa fenológica en la que se encontraba el maíz en este mes es la $V8$, considerada etapa temprana de crecimiento donde es crucial la aplicación de fertilizantes nitrogenados en proporciones precisas, ya que como se mencionó anteriormente, durante etapas tempranas si se aplican proporciones pequeñas el maíz no tendrá los nutrientes necesarios para alcanzar la madurez e impactaría al final en el rendimiento y a su vez, si sucede el caso contrario si se aplica fertilizante proporciones mayores el maíz solo puede absorber cierta cantidad de nutrientes y el nitrógeno excedente se quedaría en el subsuelo contaminando los mantos acuíferos; la ***Figura 4.15*** muestra la etapa fenológica del maíz durante el mes de Enero.

El cálculo del IAF para el mes de Enero arrojó como resultado una media de 4.04, donde se recomienda el uso del indice WDRVI para aplicación de fertilizantes nitrogenados si este último es mayor a dos. Durante la campaña de mediciones *in situ* del mes de Febrero la altura del maíz cambió considerablemente con respecto al mes anterior alcanzando aproximadamente 180 cm, entrando en la etapa fenológica $V16$, el resultado del análisis multiespectral de este mes se muestra en la ***Figura 4.16***.

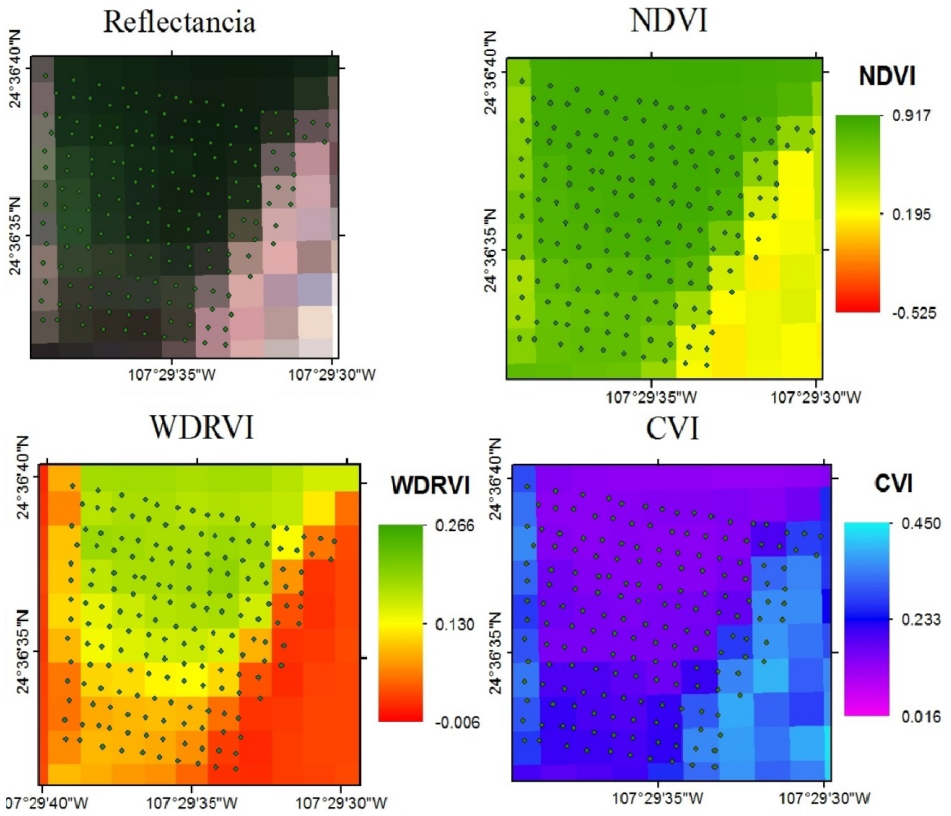


Figura 4.16: Resultado del análisis multiespectral para Febrero.

Donde el NDVI refleja una media de 0.717 y visualmente se puede apreciar que la saturación o la pérdida de sensibilidad en el infrarrojo continúa conforme la vegetación se vuelve mas densa, aun así el indice nos ayuda indicando que la vegetación se encuentra en un estado saludable ya que los valores digitales de los pixeles continúan estando muy por encima del umbral critico.

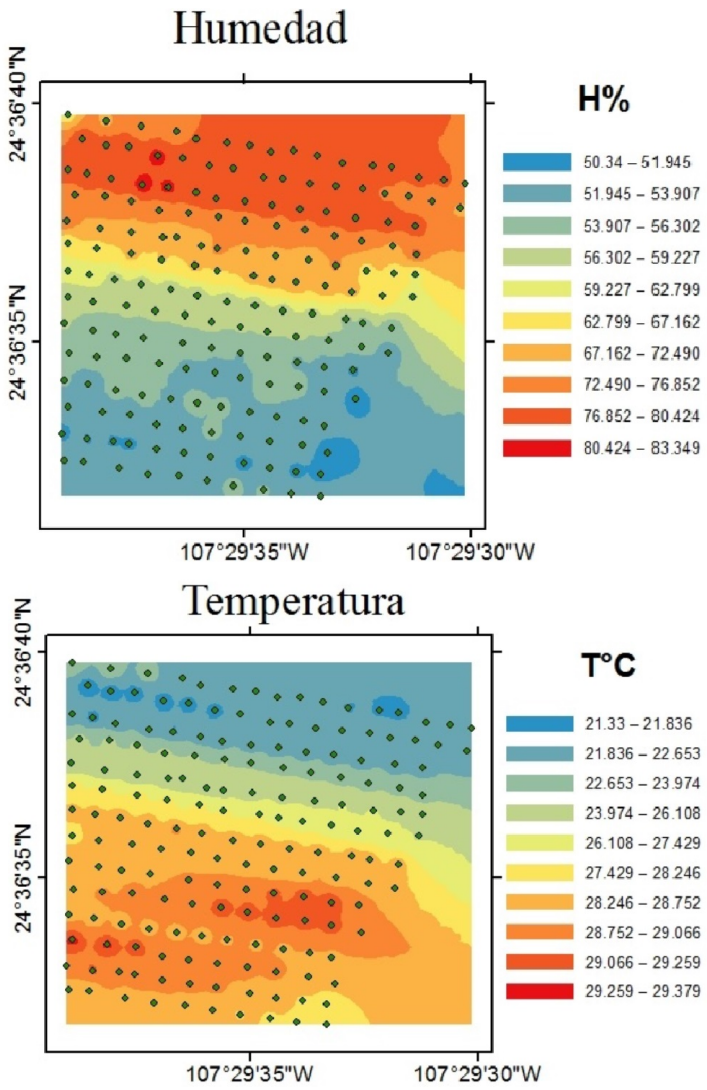


Figura 4.17: Mapas de Humedad y Temperatura para Febrero.

Para el caso del WDRVI, visualmente este índice permite identificar posibles problemas del estado nutricional del maíz, por lo que se requeriría incrementar la aplicación de fertilizante nitrogenado en la zona sur de la parcela, mas específicamente en los puntos de control 41 al 60, además, se siguen observando que los puntos de control 20 y 21 siguen obteniendo valores digitales mayores al resto donde posiblemente estas áreas requieran de menor cantidad de fertilizante. El indice CVI contrasta los resultados del WDRVI, donde también se aprecia un mayor contenido de clorofila en la zona norte y central de la parcela y un menor contenido en la zona sur, por lo que se deduce que el rendimiento en general de la parcela podría verse afectada por la zona sur de la parcela.

Los mapas de humedad y temperatura de este mes continúan arrojando datos satisfactorios, por ejemplo, la media de la humedad es de 64.16 y la temperatura 26.33, lo cual indica que ambos factores continúan estando dentro del rango aceptable para que el maíz tenga un desarrollo saludable, ademas, nuevamente ambos factores se encuentran correlacionados, ya

Figura 4.18: Vegetación del Área de Estudio durante el mes de Febrero.

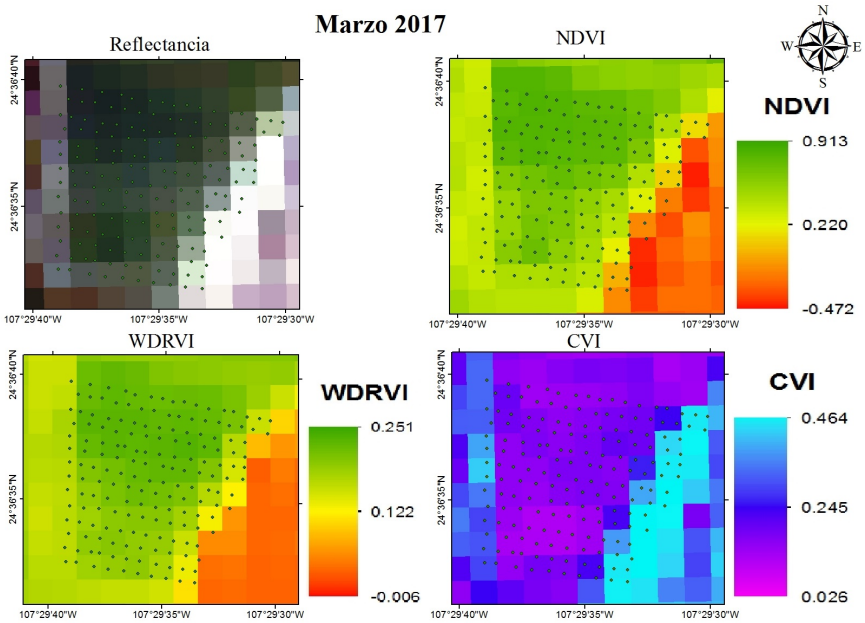


Figura 4.19: Resultado del análisis multiespectral para Marzo.

que la zona norte de la parcela presenta mayor humedad y a su vez menor temperatura, así como la zona sur presenta menor humedad y mayor temperatura.

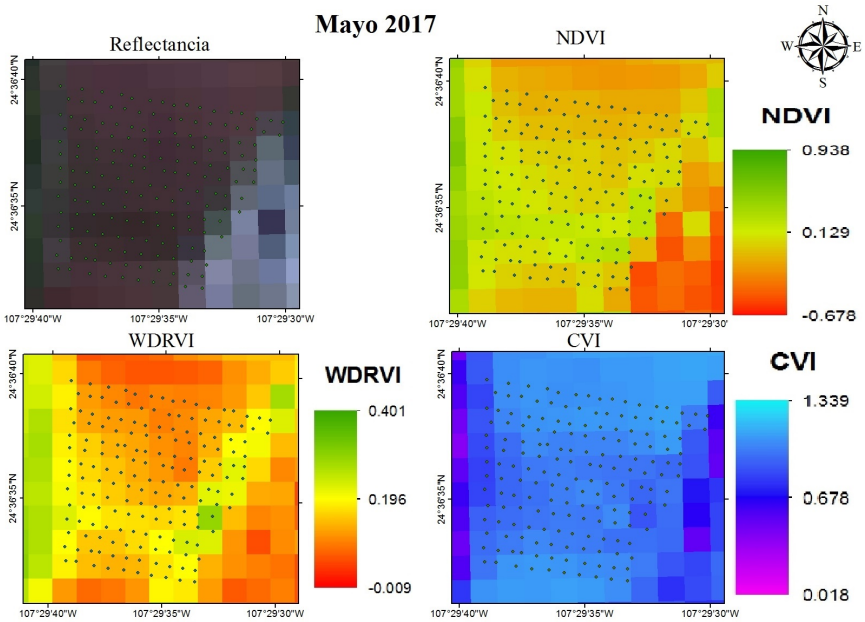


Figura 4.20: Resultado del análisis multiespectral para Mayo.

Para apreciar mejor los resultados del análisis multiespectral de este mes se presenta la ***Tabla A.5*** la cual muestra las estadísticas pertinentes.

El calculo del IAF de este mes muestra una media de 3.811, sin embargo los datos oscilan entre un mínimo de 0.15 a un máximo de 6, donde los valores máximos corresponden a la zona central de la parcela, la ***Figura 4.18*** muestra el estado del maíz durante el mes de Febrero.

Para los meses posteriores (Marzo y Mayo) donde el cultivo se encuentra dentro de las etapas reproductivas solo se realizó el procesamiento de las imágenes satelitales del área de estudio, por lo que el uso del prototipo electrónico se limitó solo a los primeros tres meses donde el cultivo se encuentra dentro de las etapas vegetativas donde se emplea el uso de fertilizantes nitrogenados. Por lo tanto, los resultados del análisis multiespectral de la salud del cultivo para el mes de *Marzo* se puede apreciar en la ***Figura 4.19*** en donde a partir de este mes ya no se cuenta con los mapas de interpolación de humedad y temperatura.

En donde se puede apreciar una ligera variación con respecto al NDVI del mes anterior en el cual los valores de este no se encuentran saturados como es el caso de *Febrero*, indicando valores un poco mas bajos en la zona sur de la parcela. Para el caso del WDRVI, los valores de este se incrementaron mostrando zonas que van de salud vegetal regular a buena y finalmente el CVI indica mejoras en la clorofila de la vegetación de la zona sur de la parcela, las estadísticas de este mes se pueden apreciar mejor en la ***Tabla A.6***, donde se muestra un incremento mínimo de los valores digitales del NDVI y WDRVI respectivamente.

Finalmente para el mes de *Mayo* el cual es el último mes en que se analizará el cultivo de maíz, ya que en el mes de *Junio* el maíz se encuentra en su última etapa de crecimiento y la pigmentación de la planta es completamente amarilla, por lo que los índices de vegetación detectarían suelo desnudo o vegetariano seca (similar al caso de *Diciembre*), además, es en este mes donde se presenta la cosecha del mismo por lo que queda excluido de la investigación. Sin embargo, durante el mes de *Mayo* la planta del maíz comienza a adquirir un tono de color amarillo gradualmente por lo que los valores del NDVI y WDRVI se esperan que sean mas bajos con respecto a los meses anteriores, para observar este fenómeno se presenta la ***Figura 4.20*** donde se aprecia el cultivo en la etapa fenológica R5 (penúltima etapa de crecimiento).

Con base en la ***Tabla A.7*** se puede observar un decremento en los valores del NDVI y WDRVI, así mismo, un incremento en los valores del CVI, visiblemente se puede observar en la zona norte de la parcela vegetación entrando en estado seco y en la zona sur una pequeña porción de maíz todavía con un poco de salud o vigor vegetal.

4.4. Análisis Estadístico y Validación de Resultados

Para validar la información generada del dispositivo electrónico mediante métodos estadísticos se realizó un análisis de regresión lineal para buscar correlaciones entre los datos generados y si es el caso, entre los índices de vegetación utilizados para los tres primeros meses del cultivo (Diciembre, Enero y Febrero) donde el maíz aun se encuentra en su etapa vegetativa, a continuación se mostraran los resultados del análisis de regresión.

Como se puede observar en la gráfica de barras de la ***Figura 4.21***, para el mes de diciembre se obtuvo una correlación negativa débil ($r = 0{,}3$) indicando una baja correlación entre ambos factores, sin embargo para los dos meses posteriores el cambio es drástico, donde el coeficiente se incrementa a ($r = -0{,}94$ y $r = 0. - 944$) respectivamente indicando una fuerte correlación negativa entre humedad y temperatura para los meses Enero y Febrero, donde la vegetación se encuentra visible desde el suelo y cubre la mayoría de las etapas vegetativas.

Sin embargo surge la necesidad de buscar si existe correlación entre humedad, temperatura y los ND de los pixeles resultantes de los índices de vegetación, aplicando el mismo análisis de regresión lineal se obtuvieron los siguientes resultados.

Como se puede observar en la ***Figura 4.22*** para los tres meses donde se estudio la humedad se obtuvieron coeficientes de correlación muy bajos ($r = 0{,}01$, $r = -0{,}01$ y $r = 0{,}18$) respectivamente, donde se deduce que para los meses Diciembre y Enero la correlación es casi nula, sin embargo para el mes de Febrero la correlación es positiva débil lo cual es poco probable que este factor se incremente en meses posteriores, demostrando que el indice NDVI no es sensible a la humedad presente a la vegetación.

Así mismo, es necesario corroborar el comportamiento del NDVI a través del tiempo con la temperatura, con base en la ***Figura 4.23*** se puede observar que para los tres meses el coeficiente de correlación se mantuvo muy bajo ($r = 0{,}01$, $r = 0{,}002$ y $r = 0{,}11$) respectivamente, indicando en los

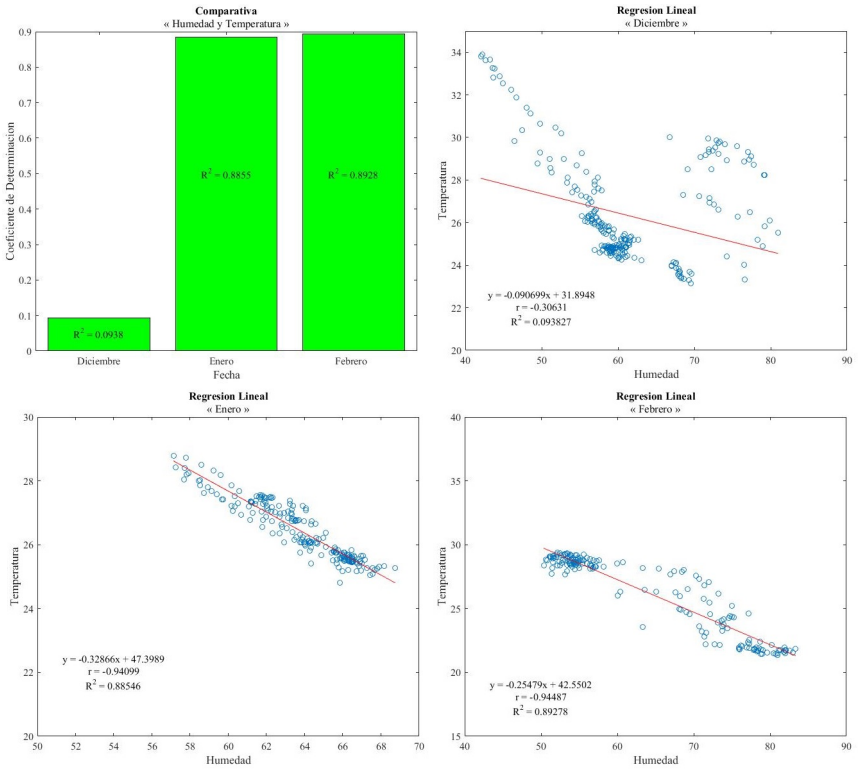


Figura 4.21: Análisis de Regresión Humedad y Temperatura.

primeros dos meses una correlación casi nula y para el mes de Febrero una correlación negativa débil, permitiendo deducir que la temperatura también es un factor que permanece insensible para el NDVI.

Comparando los análisis de regresión de humedad y temperatura para el indice NDVI para los meses Diciembre, Enero y Febrero, se llega a la conclusión que ambos factores no afectan o no tienen relación con los valores ND del NDVI ya que el factor de correlación para ambos casos pasa de ser débil a nulo en los tres meses con valores cercanos al cero, deduciendo a su vez, buscar problemas de humedad y temperatura en los cultivos de maíz con este indice no es viable, sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el NDVI si es sensible al IAF el cual puede ocasionar problemas de saturación en los ND resultantes.

Si bien se ha demostrado que la humedad y temperatura permanecen insensibles al indice NDVI para la detección de los mismo en busca de problemas en el crecimiento del maíz, la información sensada por el prototipo electrónico permite establecer un monitoreo de ambos factores, ya que como se ha mencionado anteriormente tanto la humedad como la temperatura son algunos de los factores principales que están involucrados en un desarrollo sano del maíz, teniendo que estar cuidando que ambos factores no salgan de los rangos adecuados principalmente en cultivos de riego de la temporada otoño-invierno como el caso presentado en el área de estudio.

Una vez analizado y comparado estadísticamente el indice NDVI con la

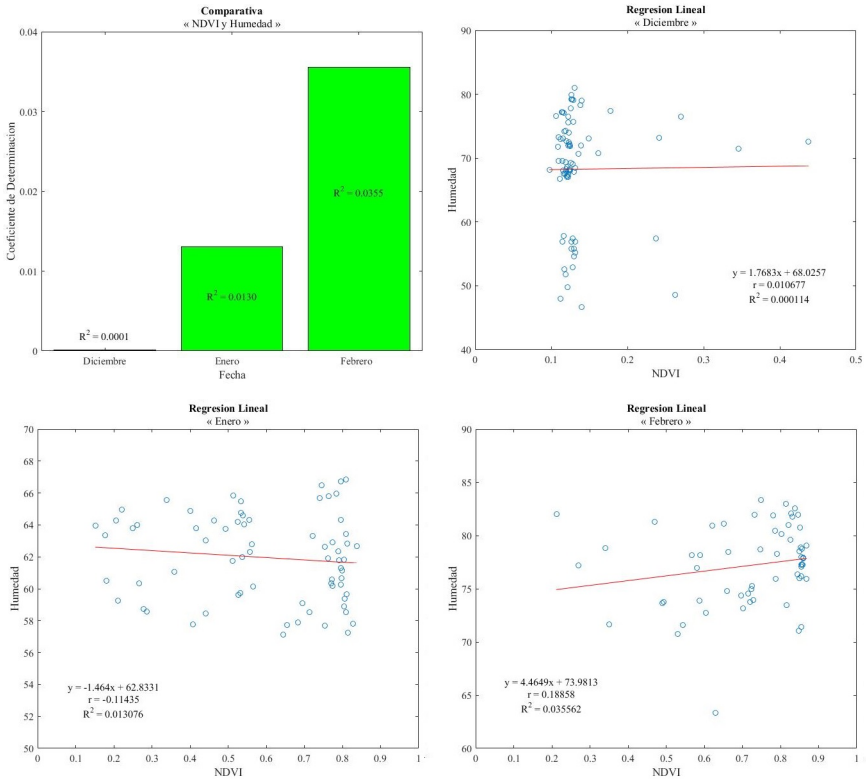


Figura 4.22: Análisis de Regresión NDVI y Humedad.

humedad y temperatura sensada por el prototipo electrónico, surge la necesidad de comparar los demás índices de vegetación utilizados en esta investigación, continuando con esta tarea se procedió a realizar el mismo análisis estadístico para los otros dos índices en busca de correlaciones entre ambos factores y los índices, el siguiente índice en ser analizado fue el WDRVI, como se aprecia en la ***Figura 4.24*** similar al caso del NDVI se obtuvieron coeficientes de correlación cercanos al cero para la humedad, es decir, la correlación entre la humedad y el WDRVI es casi nula, donde los valores del coeficiente para los tres meses estudiados son ($r = 0{,}09$, $r = -0{,}1$ y $r = 0{,}1$) respectivamente, resaltando como caso especial que para el mes de Enero se detectó una correlación negativa débil y para Febrero una correlación positiva débil, por lo que se deduce que posiblemente se incremente la correlación entre ambos conforme vaya creciendo la vegetación.

Comparando estos resultados con los obtenidos con el NDVI se llega a la conclusión que ambos índices presentan el mismo comportamiento estadísticamente, es decir, correlación nula para el mes de Diciembre, correlación negativa débil para Enero y correlación positiva débil para el mes de Febrero, cabe mencionar que ambos índices (NDVI y WDRVI) utilizan la información de las mismas bandas espectrales (NIR y Roja) para su cálculo, con la diferencia de que al WDRVI se le agrega un peso α para mejorar la sensibilidad con respecto al IAF de la vegetación, sin embargo, el uso de α no altera su comportamiento estadístico con otros factores (a diferencia del IAF), de esto modo, se llega a la conclusión que tanto el NDVI como WDRVI son insensibles a la humedad presente en los cultivos de maíz.

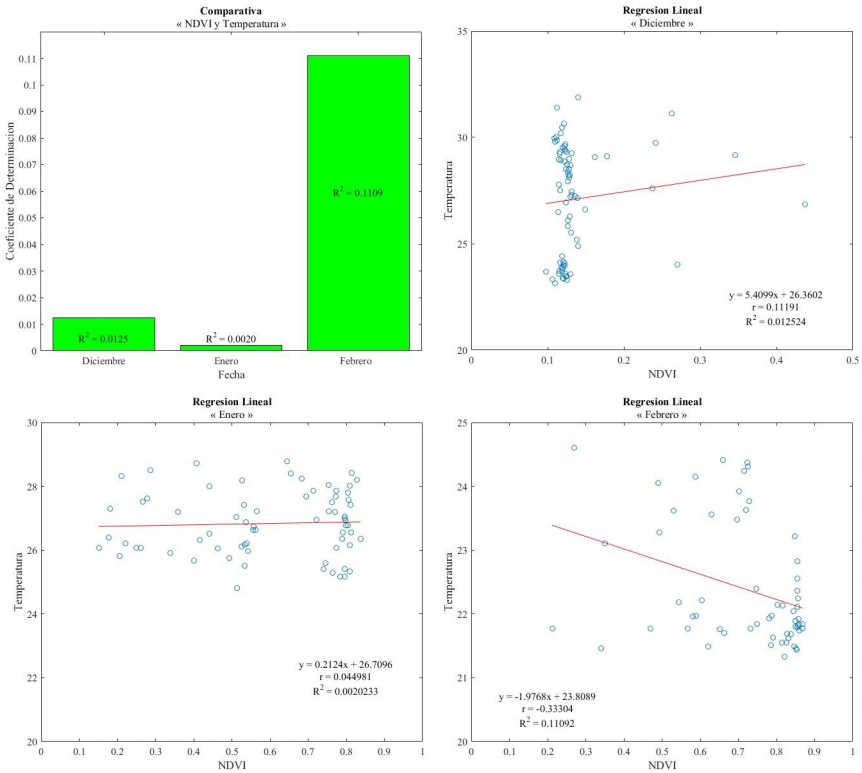


Figura 4.23: Análisis de Regresión NDVI y Temperatura.

Si bien ya se ha concluido el comportamiento de los dos indices respecto a la humedad, es necesario determinar su comportamiento con respecto a la temperatura utilizando los datos del prototipo electrónico en busca de correlación como se realizó con el NDVI, para este caso los valores de correlación obtenidos de comparar el WDRVI con la temperatura de los tres primeros meses son ($r = 0{,}17$, $r = 0{,}04$ y $r = -0{,}52$) respectivamente, donde se encuentran nuevamente correlaciones nulas y positivas débiles para los dos primeros meses, a diferencia de Febrero el cual obtuvo una correlación negativa moderada.

Esto resulta interesante, ya que posiblemente esta correlación pueda incrementarse con los próximos meses donde el cultivo de maíz se encuentra dentro de la etapa reproductiva indicando que el WDRVI se torna sensible a la temperatura durante esta etapa de crecimiento, sin embargo, para corroborar correctamente esta teoría seria necesario monitorear la temperatura durante todo el proceso del cultivo contemplando la etapa reproductiva para cultivos de riego de la temporada otoño-invierno, es decir, durante los meses de Marzo, Abril y Mayo, antes de la cosecha del mismo, si durante estos meses el coeficiente vuelve a disminuir entonces se deduce que el WDRVI es moderadamente sensible a ciertos rangos de temperatura entre $21{,}33^oC$ y $29{,}37^oC$ la cual corresponden a la temperatura mínima y máxima durante el mes de Febrero.

Para finalizar con el análisis estadístico del WDRVI y temperatura se comparan los resultados de este indice con los resultados del NDVI, donde el comportamiento de los dos primeros meses para ambos índices es similar, es decir, el coeficiente indica una correlación débil o nula en Diciembre y

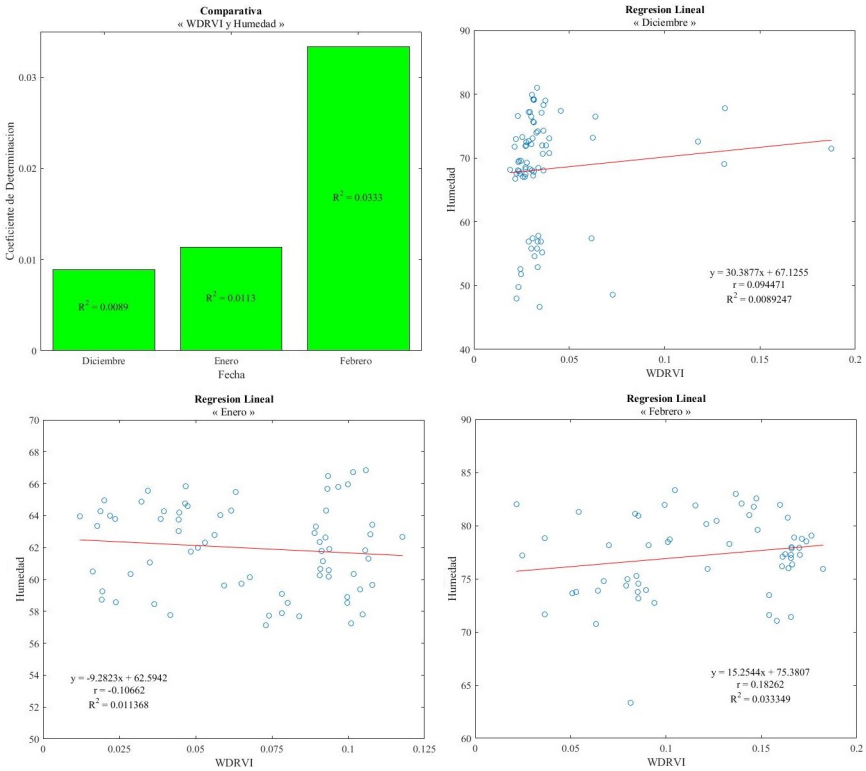


Figura 4.24: Análisis de Regresión WDRVI y Humedad.

Enero, pero para el caso de Febrero, el coeficiente cambia considerablemente, con $r = -0{,}33$ y $r = -0{,}52$ respectivamente, donde la mayor correlación negativa moderada pertenece al WDRVI, llegando a la conclusión de que este índice puede llegar a ser tentativo para analizar problemas de temperatura relacionadas con el crecimiento del maíz en la etapa vegetativa del mismo.

Continuando con el análisis estadístico de los índices de vegetación se realizó el mismo procedimiento con el CVI, este índice es un poco distinto a los otros dos, ya que su comportamiento espectral es distinto ya que agrega una banda mas (correspondiente al espectro del verde) para identificar o estimar un aproximado al contenido de clorofila presente en la vegetación, utilizado en este caso para cultivos de maíz, por lo tanto de igual forma a los otros dos, se aplicó un análisis de regresión para buscar si este índice es sensible a la humedad o temperatura, en la ***Figura 4.26*** se muestra el resultado de dicho análisis en función de la humedad.

Como se puede observar en el gráfico, para el mes de Enero se obtuvo una correlación nula con un factor de $r = 0{,}07$, sin embargo para los otros meses este factor se incrementa un poco pasando a tener una correlación positiva débil en Enero $r = 0{,}1$ y negativa débil para Febrero $r = -0{,}18$, por lo tanto se llega a la conclusión que es poco probable que las correlaciones se incrementen para los otros meses del cultivo indicando que el CVI no es sensible a la humedad, teniendo un comportamiento estadístico similar al NDVI y WDRVI durante los tres primeros meses de crecimiento de la vegetación, por lo tanto una vez comparado el NDVI, WDRVI y CVI con la humedad se llega a la conclusión que ninguno de los tres índices tiene

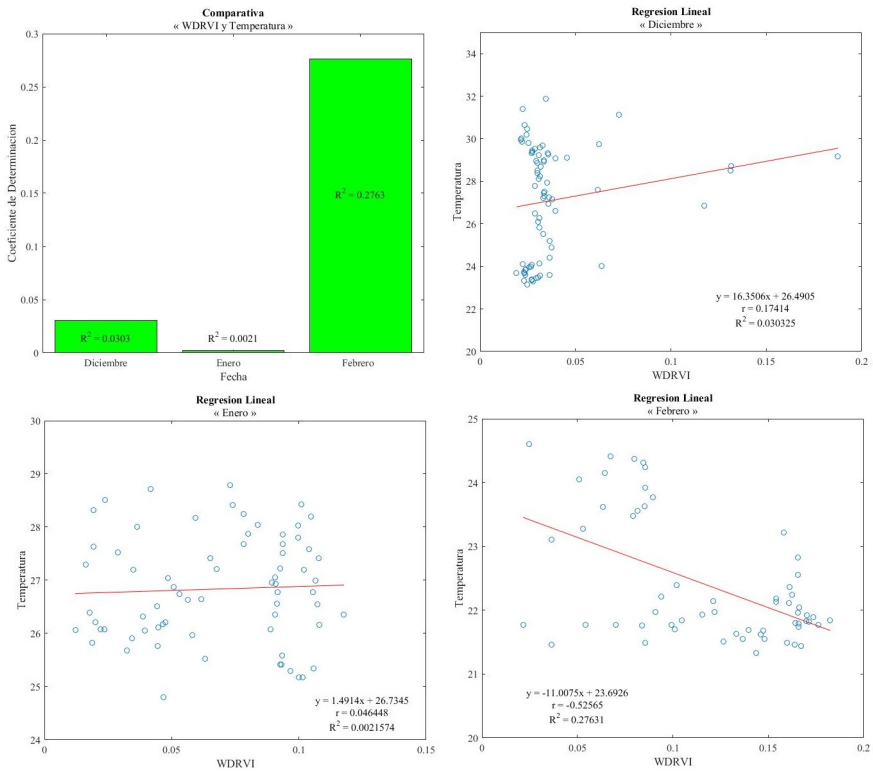


Figura 4.25: Análisis de Regresión WDRVI y Temperatura.

correlación con este factor, de este modo los datos sensados de humedad por el prototipo electrónico servirían simplemente para monitorear la humedad del cultivo, donde el agricultor debe estar atento a que la humedad relativa no salga del rango adecuado para su cultivo.

El último caso de análisis de regresión con los datos sensados por el prototipo electrónico es para comparar el indice CVI con la temperatura tal cual se realizó con el NDVI y WDRVI, en la ***Figura 4.27*** se puede apreciar el resultado de dicho análisis, donde para el mes de Diciembre se obtuvo una correlación positiva débil con un coeficiente de $r = 0{,}21$, en el mes de Enero la correlación disminuye al punto de ser nula con $r = -0{,}02$ y por último en el mes de Febrero esta se incrementa un poco llegando nuevamente a una correlación positiva débil con $r = 0{,}24$ llegando a la conclusión que el factor de la temperatura permanece insensible al indice CVI ya que su comportamiento estadístico puede indicar que es poco probable que esta correlación se incremente en los meses posteriores durante el desarrollo del cultivo, de este modo los datos recolectados por el prototipo electrónico de la temperatura del área de estudio quedarían útiles solo para monitorear que la temperatura no salga dentro del rango adecuado para que el crecimiento del maíz sea saludable.

De este modo, la conclusión general sobre los resultados estadísticos de humedad y temperatura con respecto a los indices de vegetación NDVI, WDRVI y CVI es que estos factores no tienen una correlación con estos índices, a excepción de la temperatura para el mes de Febrero con el NDVI y WDRVI los cuales llegaron a tener una correlación moderada que posiblemente pueda incrementarse con los meses posteriores, de ser el caso,

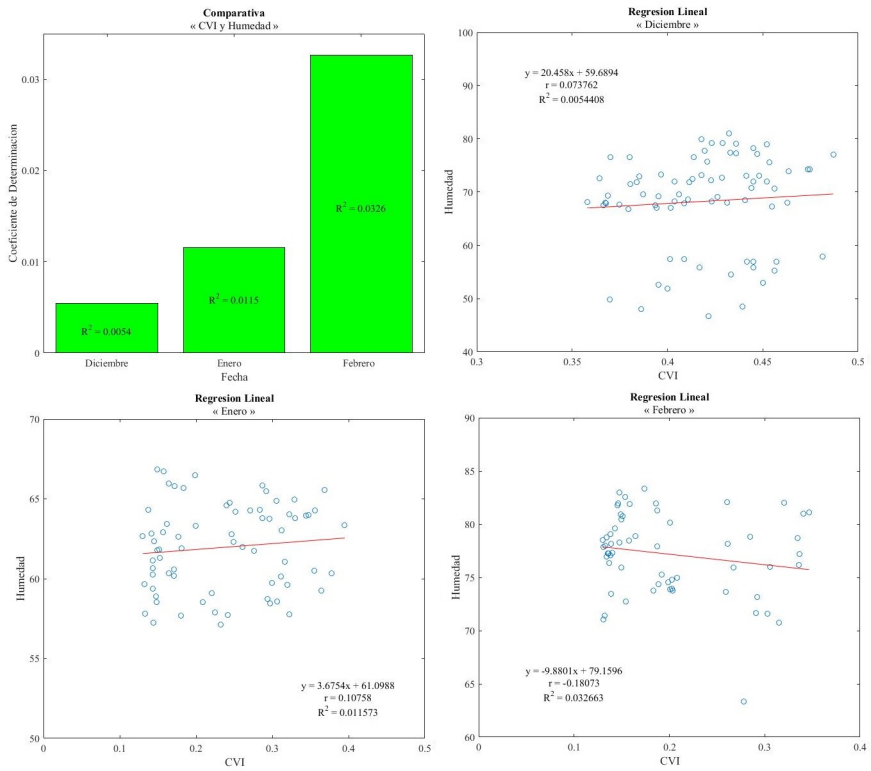


Figura 4.26: Análisis de Regresión CVI y Humedad.

estos índices pueden ayudarnos a determinar problemas de temperatura que puedan afectar el desarrollo del cultivo durante la etapa reproductiva del mismo, aun así, la información sensada por el prototipo electrónico será útil para mantener un monitoreo de humedad y temperatura donde en caso de que alguno salga del rango adecuado en algún momento del desarrollo, el agricultor podrá estar informado sobre dicho problema y deberá actuar lo mas pronto posible al respecto para evitar problemas de desarrollo y por consecuente un bajo rendimiento de cosecha.

Si bien el análisis comparativo de los índices de vegetación con respecto a los parámetros de humedad y temperatura del área de estudio han mostrado una correlación débil a moderada para considerar estos factores mediante el uso de percepción remota, entonces sera necesario analizar la correlación entre el CVI y los demás indices de vegetación, esto con motivo para validar el comportamiento del contenido de clorofila presente en la vegetación y los índices para estimar el estado de salud de la misma.

En la ***Figura 4.28*** se puede apreciar dicho análisis, donde se comparan los niveles digitales de los pixeles resultantes del procesamiento de las imágenes satelitales mediante NDVI y el CVI, en el cual se obtuvo como resultado una correlación negativa fuerte, es decir, estos índices son inversamente proporcionales ya que a medida de que los valores del NDVI se incrementan, los del CVI disminuyen, indicando que ha medida de que los valores del CVI se acercan al cero indican mayor contenido de clorofila presente en el cultivo de maíz.

Para el caso particular del mes de *Diciembre* se obtuvo una correlación nula con $r = 0{,}03$, sin embargo el panorama cambia drásticamente en el

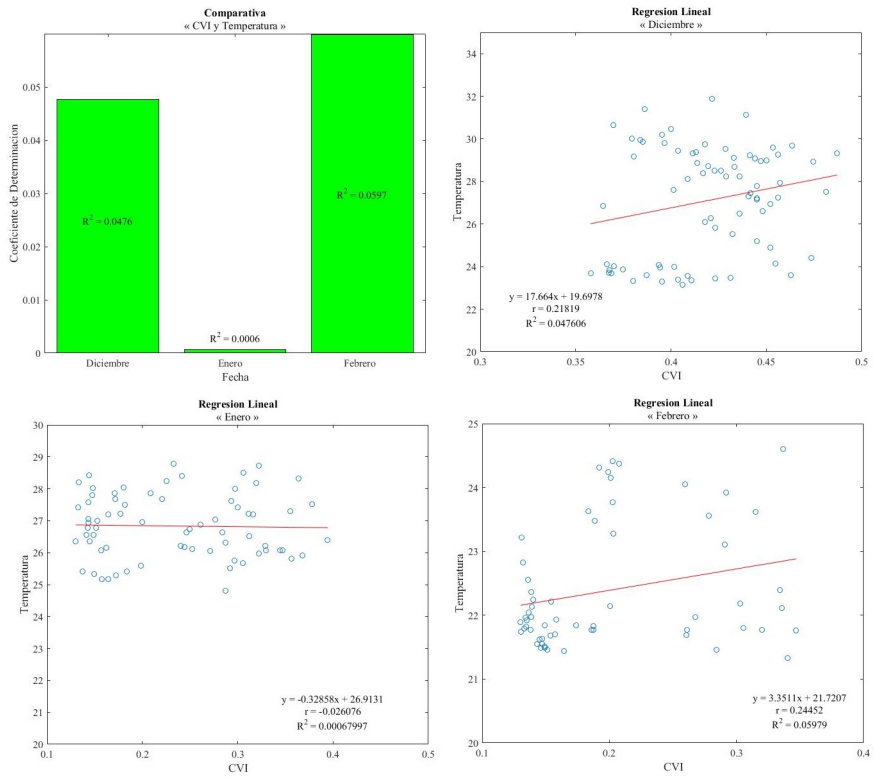


Figura 4.27: Análisis de Regresión CVI y Temperatura.

mes de *Enero* donde la correlación se incremento bastante con $r = 0{,}9$, esto debido a que en el primer mes no había vegetación visible en el área de estudio, por lo que los valores del NDVI detectaban suelo desnudo o vegetación seca ($NDVI \leq 0{,}2$) y los valores del CVI estaban altos indicando muy bajas concentraciones de clorofila y en para el segundo mes ya había vegetación visible por lo que los valores del NDVI se incrementaron mostrando vegetación en el área y los del CVI disminuyeron mostrando concentraciones de clorofila moderadas.

Sin embargo, esta correlación varia en los meses posteriores, disminuyendo nuevamente para el mes de *Febrero* pasando a ser moderada e incrementándose nuevamente para el mes de *Marzo* llegando a ser negativa fuerte nuevamente, para el último mes de estudio que fue *Mayo* la correlación disminuye un poco pero manteniéndose fuerte, esto debido a que la planta de maíz durante este mes está en proceso de maduración por lo que su tono pasa de ser verde a amarillo gradualmente ocasionando que los valores del NDVI disminuyan nuevamente y los del CVI se incrementen.

En el siguiente caso se analizó la correlación del WDRVI y el CVI donde en la ***Figura 4.29*** se puede observar el análisis de regresión entre estos indices en el cual el comportamiento entre estos es similar al del NDVI, es decir, existe una correlación negativa fuerte entre el WDRVI y el CVI, indicando que ha medida de que los valores del WDRVI se incrementan los del CVI disminuyen atribuyendo esto a que se incrementan las concentraciones de clorofila presenten en el cultivo de maíz.

De forma similar al NDVI, el comportamiento de la correlación para el mes de *Diciembre* es nula $r = 0{,}0013$ debido a los mismos factores presentes

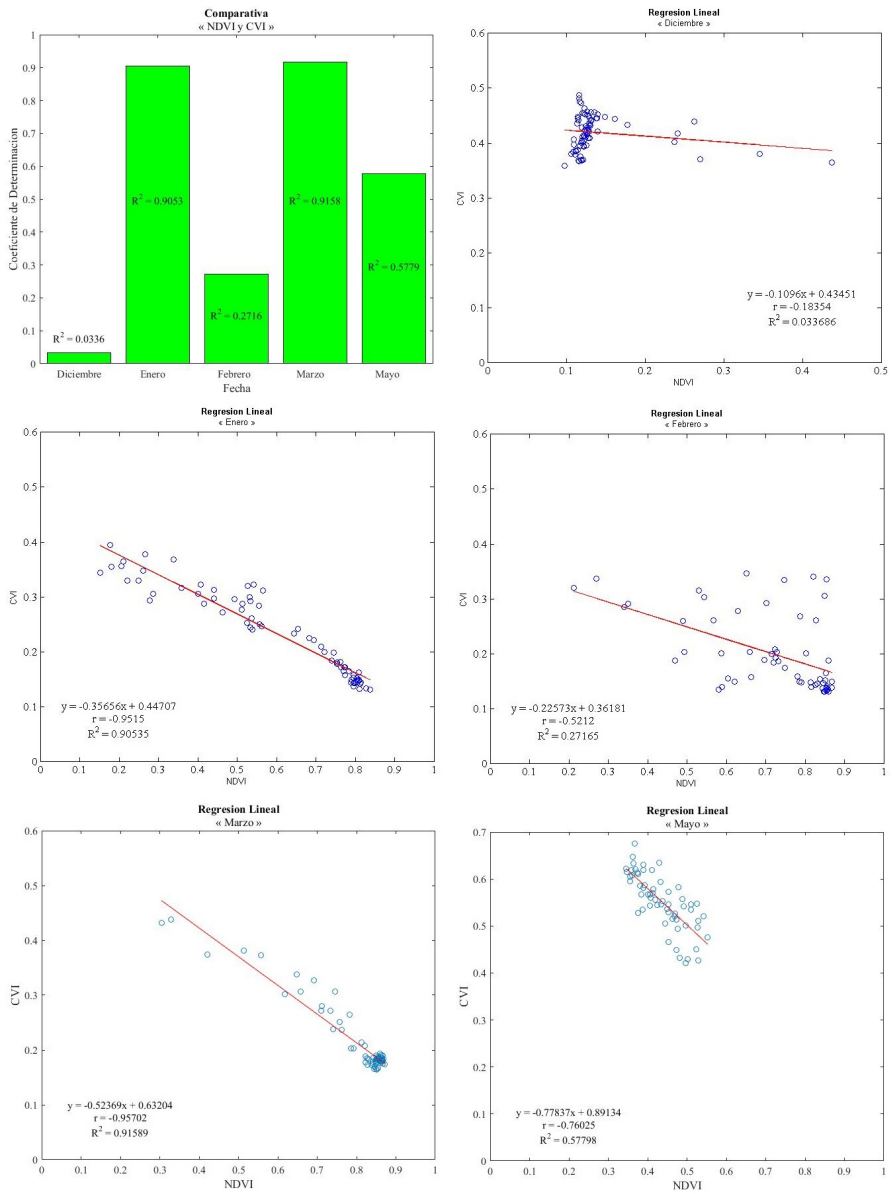


Figura 4.28: Análisis de Regresión NDVI y CVI.

en el área de estudio donde todavía no hay vegetación visible y donde los índices correspondientes solo detectan suelo desnudo o vegetación seca y para el caso del CVI muy bajas concentraciones de clorofila, nuevamente esto cambia en el mes de *Enero* donde la correlación entre el WDRVI y el CVI se incrementa considerablemente pasando de nula negativa fuerte, para el mes de *Febrero* la correlación pasa a ser moderada y la cual se incrementa nuevamente en el mes de *Marzo* pasando a ser negativa fuerte, finalmente para el mes de *Mayo* esta disminuye un poco nuevamente pasando a ser moderada.

Por lo tanto se llega a la conclusión que la correlación entre el NDVI y WDRVI con el CVI es inversamente proporcional, de esta forma, se sabe que entre mas se incrementen los valores de estos índices (indicando buen estado de salud del maíz) los del CVI disminuirán indicando mayor concentración de clorofila en el cultivo, por lo tanto, es factible utilizar estos

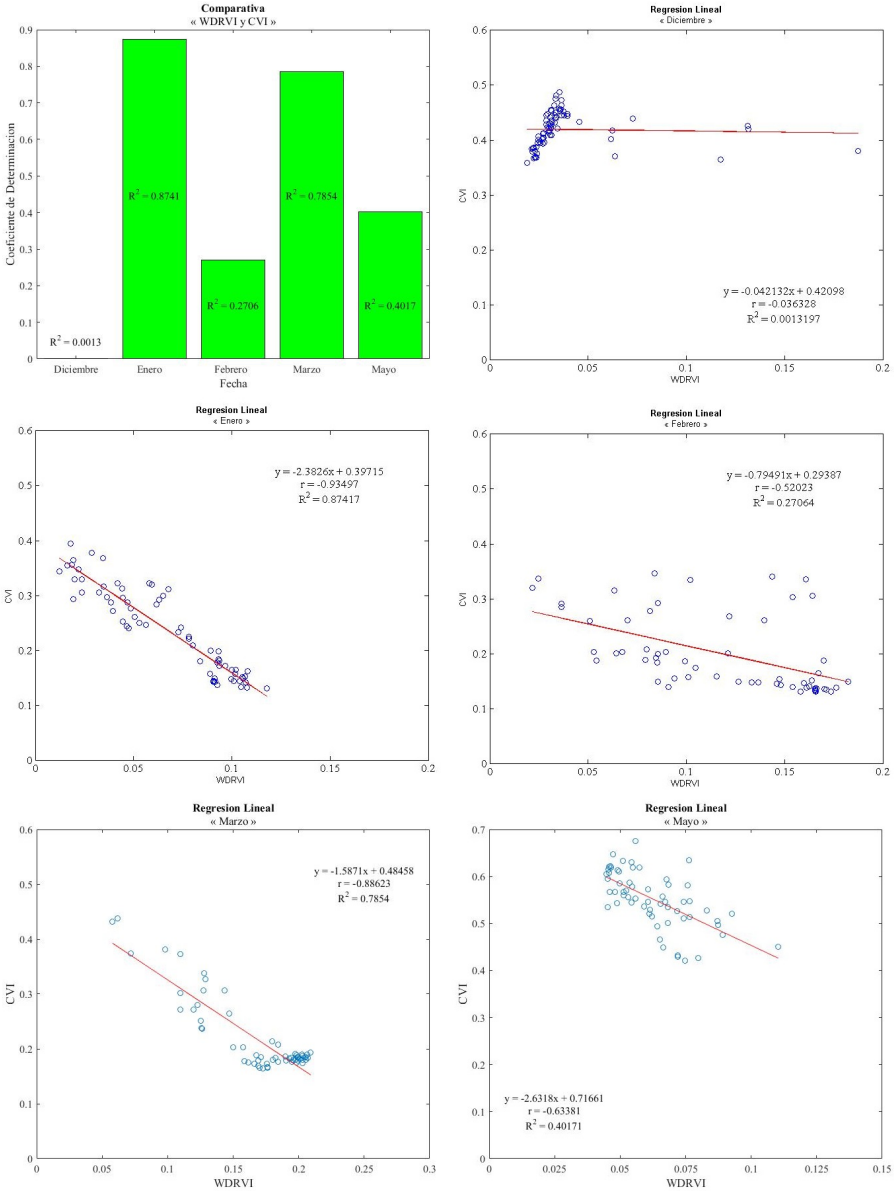


Figura 4.29: Análisis de Regresión WDRVI y CVI.

tres índices para el análisis de salud o estrés hídrico en los cultivos de maíz.

Finalmente se analizó de igual forma un factor importante en los cultivos del maíz, este factor es el IAF descrito en la ***Sección 3.4.4***, como ya se ha documentado en otras investigaciones (Maresma y Ariza, 2016) el IAF mantiene una correlación con el NDVI y por consecuente con el WDRVI, sin embargo, no se ha documentado si existe una correlación entre el IAF y el CVI, es decir, si este factor afecta el comportamiento del índice de vegetación de clorofila, para determinar esto, se realizó un análisis de regresión entre los resultados del procesamiento para el calculo del IAF de cada mes del cultivo y el CVI, el cual se puede apreciar en la ***Figura 4.30***, donde se puede apreciar que se tiene el mismo comportamiento que los demás indices, es decir, existe una correlación negativa fuerte entre el IAF y el CVI.

Para el mes de *Diciembre* se obtuvo como resultado una correlación positiva débil, donde los valores del IAF se mantienen en un rango de $0 \leq$

$IAF \leq 0{,}06$ indicando vegetación nula en el área de estudio, para el mes de *Enero* la correlación disminuye pasando a ser nula $r = 0{,}001$ a pesar que durante este mes ya hay vegetación visible en la parcela y donde los valores del IAF se encuentran en un rango de $1{,}125 \leq IAF \leq 6$. El panorama cambia dramáticamente en los meses posteriores donde el cultivo se encuentra en la última etapa vegetativa en el mes de *Febrero* y las etapas reproductivas para los meses de *Marzo* y *Mayo* donde se aprecia una correlación negativa fuerte para estos meses con $r = 0{,}82$, $r = 0{,}90$ y $r = 0{,}56$ respectivamente, llegando a la conclusión de que el IAF es sensible al CVI en las etapas fenológicas tardías del maíz por lo que es factible utilizar ambos para detectar problemas relacionados con la clorofila del maíz en las ultimas etapas de crecimiento.

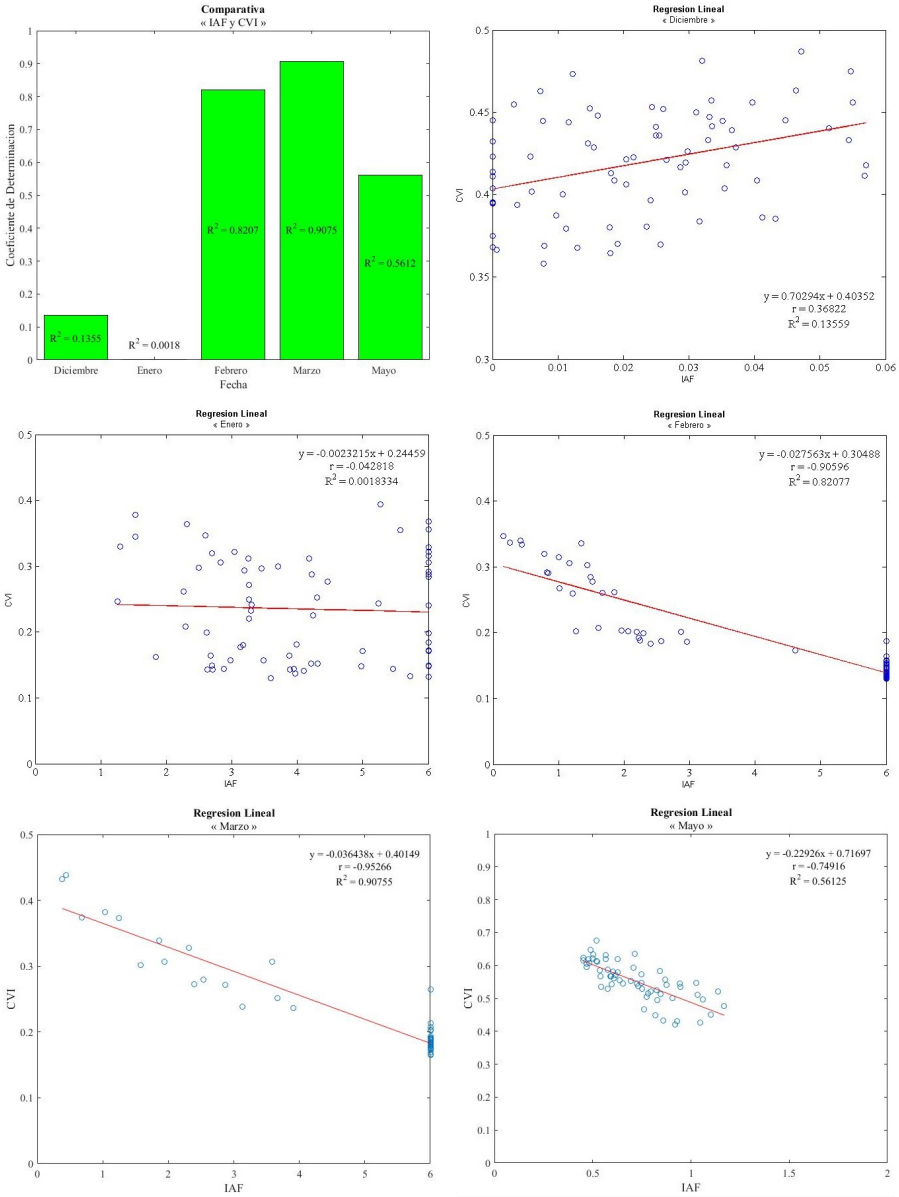


Figura 4.30: Análisis de Regresión IAF y CVI.

Con base en el desarrollo de la calidad de la vegetación para el cultivo

de maíz generado a partir del procesamiento digital de imágenes multiespectrales de los primeros cuatro meses desde la siembra, se realizó un análisis estimado del rendimiento de la parcela para lo cual su fecha de cosecha ha sido programado durante el mes de Junio del año actual, dicho análisis se puede apreciar en la ***Figura 4.31***. Para realizar la estimación de rendimiento se establecieron tres rangos en función de los ND resultantes del WDRVI por ser el índice más sensible a la densidad de vegetación, estos rangos son $0{,}1 \leq ND \leq 0{,}15$ para identificar vegetación con desarrollo *regular*, $0{,}15 \leq ND \leq 0{,}2$ para vegetación con *buen desarrollo* y finalmente $0{,}2 \leq ND \leq MAX$ para vegetación con *muy buen desarrollo*.

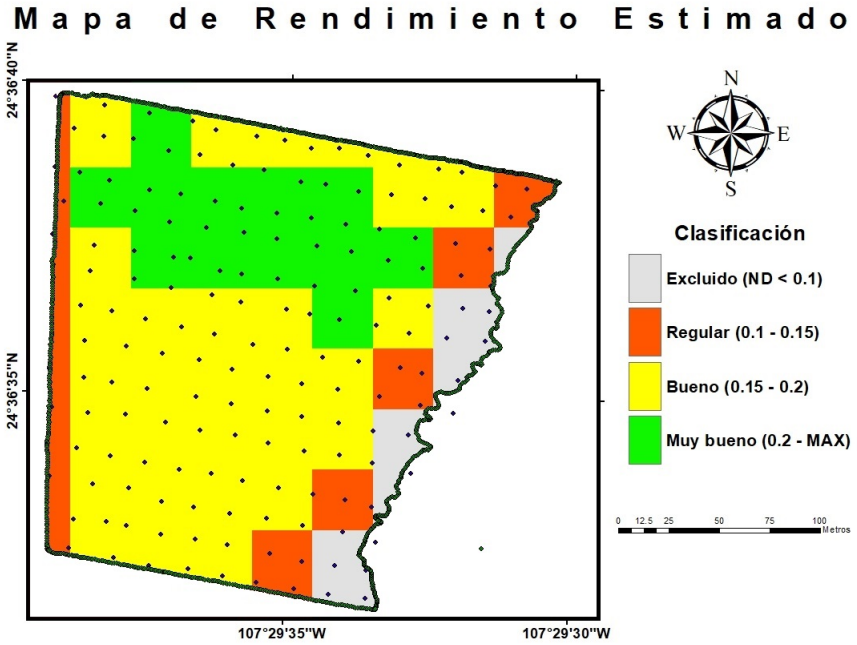


Figura 4.31: Mapa de rendimiento estimado para el cultivo de maíz.

De acuerdo con la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) para el ciclo de siembra y cosecha de Maíz del año 2017 en Sinaloa se estima en promedio un rendimiento de 10 t/ha, existiendo variaciones de $\pm$ 1 t/ha entre dichos cultivos, ademas con base en la información brindada por los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA), para el año 2017 se estima que el costo de compra del maíz ascienda hasta $4 000 MXN por tonelada de maíz, por lo tanto, de esta forma se puede llegar a estimar finalmente los beneficios económicos (si es el caso) para este año para una parcela en particular.

Cabe mencionar, además, que datos estadísticos recientes de la FIRA afirman que la inversión que hacen los productores por hectárea oscila entre $3 400 MXN y $4 195 MXN. Finalmente con base en la ***Figura 4.32*** se puede apreciar claramente como progresa el desarrollo vegetativo del cultivo hasta el mes de Marzo, en el cual este ya se encuentra en la etapa reproductiva quedando a solo 60 días para la senescencia en donde los índices de vegetación ya no son aptos para el estudio de la misma por lo que solo se contempló el mes de Marzo por ser el mes mas cercano a la cosecha (ya

que en el mes de Abril las imágenes satelitales cuentan con nubosidad en el área de estudio, debido a esta limitante este mes quedó fuera del análisis) para estimar el rendimiento que tendrá el cultivo al final de su ciclo.

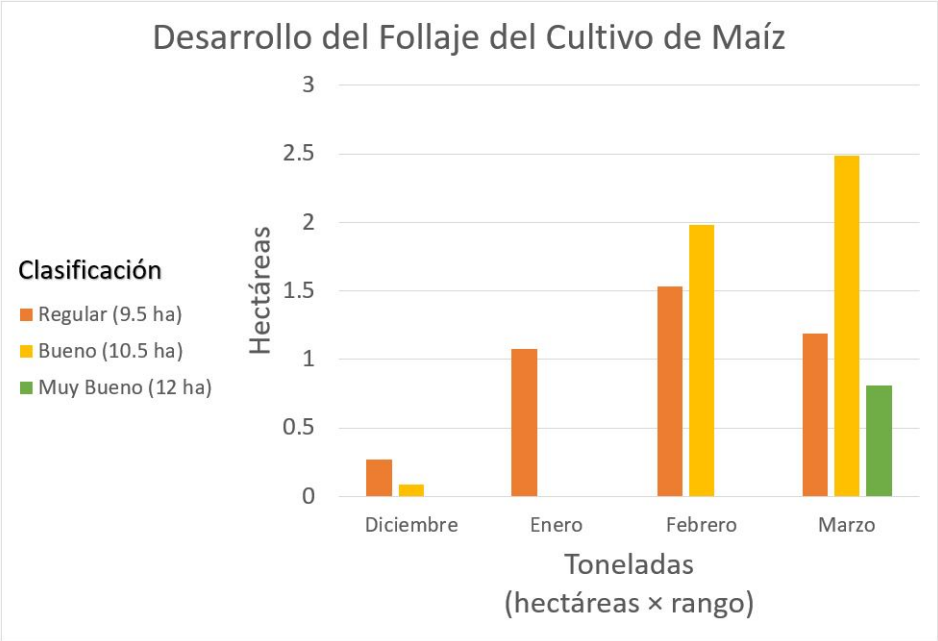


Figura 4.32: Gráfica del desarrollo de la calidad de la vegetación para el cultivo de maíz durante el ciclo de siembra y cosecha otoño - invierno 2017.

Así de este modo, en función de las estimaciones de toneladas por hectáreas de Marzo (***Tabla 4.2***) y el precio de compra del maíz para el año 2017 se llega a la conclusión de que el costo / beneficio de la parcela al final del ciclo será de aproximadamente $ 188 680 MXN.

Tabla 4.2: Cálculo económico del rendimiento estimado para el cultivo de maíz.

	Regular	**Bueno**	**Muy Bueno**
Hectáreas	1.19	2.49	0.81
Toneladas	11.305	26.145	9.72
		Total de Toneladas	47.17

Finalmente en la ***Figura 4.33*** se muestran los puntos de control cargados con el software *Google Earth*, lo cual permite visualizar fácilmente el contorno de la parcela, además como se puede apreciar, al seleccionar cualquier punto, se muestra la información generada por el prototipo electrónico, permitiendo conocer información precisa al usuario final en el área de interés. Este procedimiento puede realizarse con otros software del mercado, como por ejemplo, con ArcGIS para el cálculo geoestadístico del área o bien con CivilCAD para visualizar los puntos y determinar el contorno del área, de este modo se demuestra la portabilidad del formato de salida

de los datos para su uso con el software de preferencia, esto con el fin de apoyar al usuario final con el tratamiento de la informacion que se desee realizar.

Figura 4.33: Puntos de Control e información generados por el prototipo cargados en Google Earth.

Capítulo 5

Conclusiones

Con base en los resultados descritos en el ***Capitulo 4*** del procesamiento digital de imágenes se llegó a la conclusión de que este tipo de tecnología es capaz de extraer la información necesaria de los cultivos de maíz para la dosificación variable de fertilizantes nitrogenados en etapas tempranas de crecimiento, permitiendo al agricultor corregir y/o aplicar ciertas medidas en tiempo para que el cultivo tenga mayor rendimiento al final del ciclo del mismo.

La precisión del GPS del prototipo electrónico ($\sim 5m$) es bastante buena para este tipo de aplicaciones, en la ***Figura 4.33*** se pueden apreciar la información generada por el prototipo cargadas en la plataforma *Google Earth* donde todos los puntos se encuentran dentro del área de estudio, así mismo, cada punto de control cuenta con coordenadas, humedad y temperatura. Esta información también puede agregarse al software ArcGIS 10.3 para generar un SIG de cada mes, donde el usuario final puede consultar la información de la parcela en algún punto en especifico para su posterior análisis.

En cuanto al prototipo electrónico, se realizaron tres campañas *in-situ* en total, una cada mes en horario matutino donde cada sesión tuvo una duración promedio de dos horas (tiempo en que se recorrió toda la parcela con el prototipo para generar la información), esto con la finalidad de comprobar el funcionamiento del prototipo en campo y la fiabilidad de la información que este genera. El motivo por el cual se escogió un horario matutino para la fase experimental es que durante las primeras horas de la mañana se encuentra una cantidad muy alta de humedad en la vegetación por lo que la caja ABB en donde se encuentra ensamblado el prototipo debe de impedir que esta humedad u otro factor ingrese al sistema electrónico evitando así dañar el prototipo, ademas, por lo general es en este horario donde algunos agricultores comienzan fertilizar el cultivo de maíz.

El consumo de batería del prototipo fue mínimo, la suma total de horas por las tres sesiones fue de seis horas, se trabajó con una batería externa de 10 000mAh y el consumo de energía no excedió de aproximadamente el 20 % de la batería, por lo que el prototipo puede operar por jornadas de trabajo de varios días antes de que la batería deba cargarse nuevamente. Así mismo, el protocolo bluetooth utilizado permite mantener distancias entre el *smartphone* y el prototipo por aproximadamente de 10 a 15 metros, en caso de que este prototipo deba de instalarse en alguna maquinaria existiría completa libertad para instalar el prototipo y fijar el smartphone en un área cerca del panel de instrumentos de la maquinaria sin problemas.

La aplicación móvil se puede descargar e instalar en cualquier *smartphone* que cuente con el sistema operativo Android, esto lo hace accesible para

la mayoría de los dispositivos móviles y la aplicación no presentó ningún problema de comunicación con el prototipo ni para guardar la información generada por este, por lo que es completamente estable.

El SIG generado por los resultados del procesamiento multiespectral de las imágenes satelitales y los mapas de interpolación de humedad y temperatura a una resolución de 30m permite observar los estados de salud vegetal o estrés hidrico presente en los cultivos durante etapas tempranas de crecimiento (V3 a V12) para parcelas con tamaños relativamente pequeñas menor a 10 hectáreas.

El costo para fabricar un prototipo como el de esta investigación es relativamente bajo en comparación con otras tecnologías del mercado por empresas especializadas, en la ***Tabla A.2*** se pueden apreciar dichos precios en comparación con el costo total del prototipo, si bien estos productos son aditamentos que se pueden instalar en la maquinaria al igual que este prototipo cada uno tiene funciones distintas, cabe mencionar, por ejemplo, que para el caso de los GPS de *John Deere* estos tienen mejor precisión (milimétrica) que el modulo GPS utilizado en este prototipo, sin embargo quedó demostrado que con una precisión de 5m es suficiente para georeferenciar puntos en una parcela pequeña.

Otro caso particular es *GreenSeeker*, el cual es un sensor que permite estimar en tiempo real el estado de salud del cultivo utilizando el índice de vegetación NDVI para aplicación de fertilizantes nitrogenados, sin embargo, el costo de *GreenSeeker* es aun mayor que el del prototipo electrónico, por último se encuentran las cámaras multiespectrales para drones, estas cámaras tienen la peculiaridad de tener una banda muy especial del espectro electromagnético llamada *RedEdge*, esta banda abre las puertas para el uso de otros índices de vegetación para estimar directamente el contenido de nitrógeno presente en la vegetación como el *Indice de Nitrógeno de Diferencia Normalizada* (NDNI) así como otros índices cuya ecuación incluyen la banda del RedEdge para estimar la salud del cultivo, estos índices han resultado tener mejor detección del nitrógeno en comparación con los índices utilizados en esta investigación, además, la imagen generada por estas cámaras montadas en drones a una altura de aproximadamente 100 m permite obtener resoluciones aproximadas de 10 cm por pixel por lo que se puede observar a detalle el estado de nutrición del cultivo, sin embargo, el costo de estas cámaras es relativamente elevado y son poco accesibles.

En conclusión general la ventaja de este prototipo con respecto a otras tecnologías destaca el costo de fabricación de aproximadamente $1 485 MXN y en conjunto con la adquisición de imágenes satelitales sin costo se pudo obtener un SIG capaz de brindar al agricultor la información necesaria para atender problemas del cultivo de maíz referente a la aplicación de fertilizantes nitrogenados en etapas tempranas de crecimiento. Para el área de estudio y con base en lo analizado en la ***Sección*** 4.3 se identificaron diferencias entre el crecimiento y/o salud del maíz dentro de la parcela, dentro de los primeros 90 días a partir de la siembra existen deficiencias en salud en la zona sur de la parcela, por lo que esta zona requiere atención inmediata, requiriendo mas fertilizante nitrogenado, así como pequeñas porciones en la zona norte de la parcela donde el maíz presenta muy buen crecimiento requiriendo así menos concentración de fertilizante.

Apéndice A

Anexos

A.1. Costos de Fertilizantes y Tecnologías para Agricultura Moderna

Tabla A.1: Precios Fertilizantes Agrícolas (MXN).

Fecha	Producto	Concentración	Presentación	Precio
30/11/2016	Agresor 600 ls	50	Litro	215.00
30/11/2016	Ambush 34	34	Litro	476.00
30/11/2016	Bravo 720	54	Litro	332.00
30/11/2016	Captan 50 ph	50	Litro	201.00
30/11/2016	Cloruro de Potasio	00-00-60	Tonelada	10,268.76
30/11/2016	Complejo npk	17-17-17	Tonelada	10,310.00
30/11/2016	Diazinon 25 e	25	Litro	180.00
30/11/2016	Esteron 47 m	49.2	Litro	105.00
30/11/2016	Faena	41	Litro	140.00

Tabla A.2: Comparación de Costos de Tecnologías para Agricultura de Precisión en México vs el prototipo electrónico (Fecha de Cotización de Costos: 09/05/2017.

Producto	Marca	Precio (MXN)	Función
Harvest Doc	John Deer	99 900	Monitor de Rendimiento
StarFire SF1	John Deer	49 900	GPS
StarFire SF2	John Deer	89 900	GPS
GreenSeeker	Trimble	8 402	Sensor
Sequoia	Parrot	70 000	Camara Multiespectral
RedEdge	MicaSense	103 900	Camara Multiespectral
Arduino UNO	Arduino	145	Procesador
SHT-31	Sensirion	151	Sensor
SKM-53	SkyLab	700	GPS
JY-MCU	HC06	369	Bluetooth
Box w/knockouts	ABB	120	Protector

A.2. Estadísticas del Estudio Temporal

Tabla A.3: Estadísticas de Diciembre.

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI	Humedad	Temperatura
Mínima	0.097	0.019	0.357	42.04	23.15
Máxima	0.437	0.187	0.486	81	33.889
Media	0.137	0.037	0.419	60.83	26.442
Mediana	0.123	0.030	0.421	59.19	25.52
Desv. Std.	0.052	0.027	0.031	8.023	2.379

Tabla A.4: Estadísticas de Enero.

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI	Humedad	Temperatura
Mínima	0.151	0.012	0.13	57.13	25.05
Máxima	0.837	0.117	0.394	68.73	28.79
Media	0.594	0.067	0.235	63.81	26.44
Mediana	0.649	0.073	0.236	64.02	26.20
Desv. Std.	0.211	0.031	0.079	2.603	0.913

Tabla A.5: Estadísticas de Febrero.

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI	Humedad	Temperatura
Mínima	0.212	0.021	0.13	50.34	21.33
Máxima	0.867	0.182	0.346	83.349	29.379
Media	0.717	0.118	0.199	64.165	26.338
Mediana	0.782	0.124	0.178	60	28.16
Desv. Std.	0.161	0.045	0.07	11.012	2.95

Tabla A.6: Estadísticas de Marzo.

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI
Mínima	0.304	0.057	0.164
Máxima	0.871	0.209	0.438
Media	0.786	0.166	0.22
Mediana	0.845	0.176	0.185
Desv. Std.	0.127	0.038	0.069

Tabla A.7: Estadísticas de Mayo.

Estadística	NDVI	WDRVI	CVI
Mínima	0.345	0.044	0.421
Máxima	0.551	0.11	0.675
Media	0.435	0.062	0.552
Mediana	0.433	0.060	0.552
Desv. Std.	0.057	0.014	0.059

A.3. Programa para Arduino

El siguiente código para Arduino es el correspondiente para el prototipo desarrollado en esta investigación:

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS.h>
#include "cactus_io_SHT31.h"

cactus_io_SHT31 sht31;
TinyGPS gps;
SoftwareSerial ss(2, 3); //GPS Software Serial

void smartdelay(unsigned long ms);
void print_float(float val, float invalid, int len, int prec);
void print_int(unsigned long val, long invalid, int len);
void print_int2(unsigned long val, long invalid, int len);
void print_date(TinyGPS &gps);
void print_str(const char *str, int len);

int ledPin5 = 5;
int ledPin4 = 4;

void setup()
{
Serial.begin(9600);

pinMode(ledPin5, OUTPUT);
pinMode(ledPin4, OUTPUT);
digitalWrite(ledPin4, HIGH);
digitalWrite(ledPin5, LOW);

if (!sht31.begin()) {
Serial.println("Sensor no Encontrado");
while (1) delay(1);
}

ss.begin(9600);

}
```

```
void loop()
{
char val;
float flat, flon;
unsigned long age, date, time, chars = 0;
unsigned short sentences = 0, failed = 0;

if(Serial.available() > 0)
{
val = Serial.read();
if(val == '1')
{
print_float(flat, TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE, 10, 6);
Serial.print("\n");
print_float(flon, TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE, 11, 6);
Serial.print("\n");
Serial.print(sht31.getHumidity());
Serial.print("\n");
Serial.print(sht31.getTemperature_C());
}
if(val == '2')
{
print_float(flat, TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE, 10, 6);
Serial.print("  ");
print_float(flon, TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE, 11, 6);
Serial.print("  ");
Serial.print(sht31.getHumidity());
Serial.print("  ");
Serial.print(sht31.getTemperature_C());
Serial.print("\n");
}
}

print_int2(gps.satellites(),TinyGPS::GPS_INVALID_SATELLITES,5);
gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);

gps.stats(&chars, &sentences, &failed);
smartdelay(1000);
}

static void smartdelay(unsigned long ms)
{
unsigned long start = millis();
do
{
while (ss.available())
gps.encode(ss.read());
} while (millis() - start < ms);
}
```

```
void print_float(float val, float invalid, int len, int prec)
{
if (val == invalid)
{
while (len-- > 1)
Serial.print('*');
Serial.print(' ');
}
else
{
Serial.print(val, prec);
int vi = abs((int)val);
int flen = prec + (val < 0.0 ? 2 : 1);
flen += vi >= 1000 ? 4 : vi >= 100 ? 3 : vi >= 10 ? 2 : 1;
for (int i=flen; i<len; ++i)
Serial.print(' ');
}
smartdelay(0);
}

void print_int(long val, long invalid, int len)
{
char sz[32];
if (val == invalid)
strcpy(sz, "*******");
else
{
sprintf(sz, "%ld", val);
}
sz[len] = 0;
for (int i=strlen(sz); i<len; ++i)
sz[i] = ' ';
if (len > 0)
sz[len-1] = ' ';
Serial.print(sz);
smartdelay(0);
}

void print_int2(long val, long invalid, int len)
{
char sz[32];
if (val == invalid)
strcpy(sz, "*******");
else
{
sprintf(sz, "%ld", val);
digitalWrite(ledPin4, LOW);
digitalWrite(ledPin5, HIGH);
}
sz[len] = 0;
for (int i=strlen(sz); i<len; ++i)
```

```
sz[i] = ' ';
if (len > 0)
sz[len-1] = ' ';
smartdelay(0);
}

static void print_str(const char *str, int len)
{
int slen = strlen(str);
for (int i=0; i<len; ++i)
Serial.print(i<slen ? str[i] : ' ');
smartdelay(0);
}
```

A.4. Programa para Procesar los Datos del Prototipo Electrónico

El código que se muestra a continuación escrito en lenguaje *C-ANSI* fue utilizado para procesar los archivos generados por la aplicación móvil para procesar la información agregándole atributos y puntos de interés.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <ctype.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <unistd.h>

void main(int argc, char **argv)
{
if(argc <= 1)
{
printf("\n\n  %s [File_Source.txt]\n\n", argv[0]);
exit(1);
}
FILE *fp, *fw;
struct stat st = {0};
int i, j, k, cont = 0, files = 0;
float val;
if(stat("/home/Escritorio/FarmWare/newfiles", &st) == -1)
mkdir("/home/Escritorio/FarmWare/newfiles", 0700);
for(k = 1; k < argc; k++)
{
fp = fopen(argv[k], "r");
if(fp == NULL)
{
printf("\n\n Archivo %s NO Encontrado!!!!\n\n", argv[k]);
continue;
}
```

```
while(fscanf(fp, "%f", &val) != EOF)
{
cont++;
}
rewind(fp);
cont /= 4;
float mat[cont][4];
for(i = 0; i < cont; i++)
for(j = 0; j < 4; j++)
fscanf(fp, "%f", &mat[i][j]);
fclose(fp);
chdir("/home/carlos/Escritorio/FarmWare/newfiles");
fw = fopen(argv[k], "w+");
files++;
fprintf(fw, "Nombre X Y Humedad Temperatura\n");
for(i = 0; i < cont; i++)
{
if(i < 9)
fprintf(fw, "PC0%d ", i + 1);
else
fprintf(fw, "PC%d ", i + 1);
for(j = 0; j < 4; j++)
{
fprintf(fw, "%f ", mat[i][j]);
}
fprintf(fw, "\n");
}
cont = 0;
printf("\n");
printf(" Archivo %s  >> PROCESADO!!!\n", argv[k]);
fclose(fw);
chdir("/home/carlos/Escritorio/FarmWare");
}
printf("\n Archivos Procesados = %d\n\n", files);
}
```

A.5. Código de App Inventor para la Aplicación Móvil

El siguiente conjunto de imágenes muestran el código en bloques de la aplicación móvil creada en App Inventor.

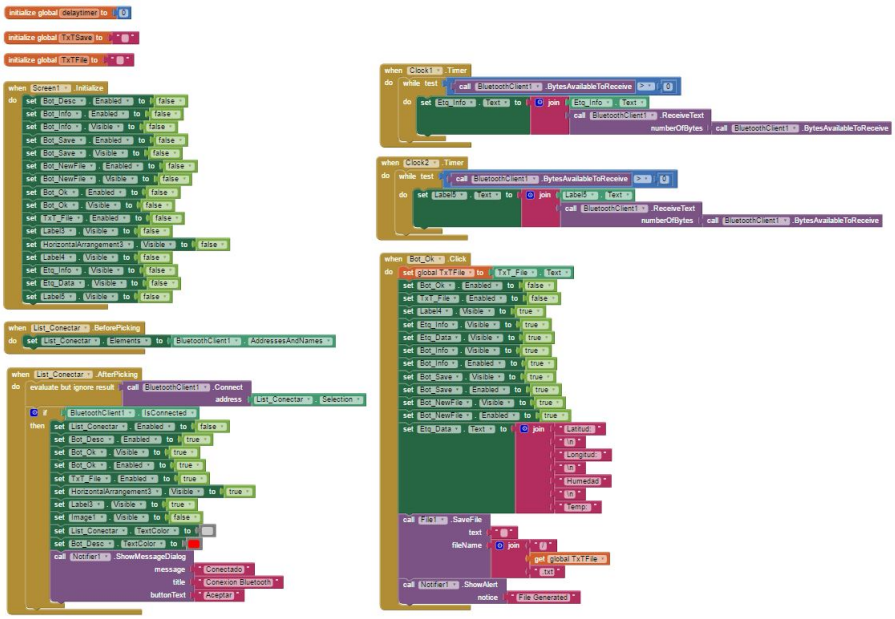


Figura A.1: Programa Parte 1.

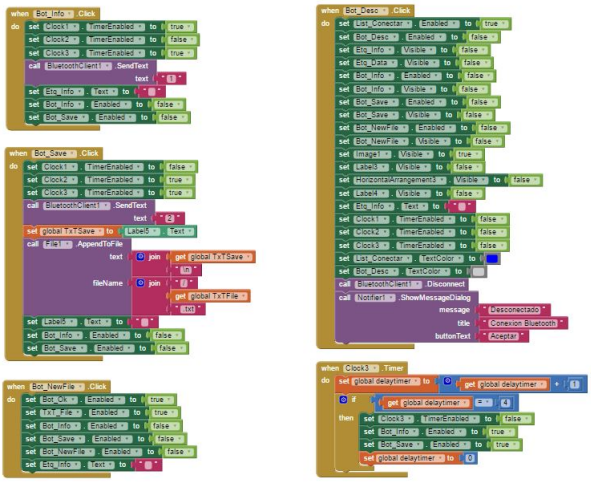


Figura A.2: Programa Parte 2.

Bibliografía

Acosta, D. E. (2008). «Relacion entre el Indice de Area Foliar y Rendimiento en Frijol bajo Condiciones de Secano.» En: *INIFAP.* 1.1, págs. 1-11.

Albarenque, S.M. y J.P. Velez (2011). «Tecnicas para el procesamiento de mapas de rendimiento.» En: *INTA* 1.1, págs. 12-26.

Andrade, F.H. y S. Uhart (1991). «Rendimiento potencial de maíz en Balcarce; análisis de los factores que lo determinan.» En: *INTA* 101.2, págs. 1-11.

Android (2011). «A Developers First Look At Android.» En: *Overview Developers.* 1.1, págs. 1-3.

Axelson, J. (2007). «Serial Port Complete: The Developer Guide.» En: *Lakeview Research LLC.* 1.1, págs. 45-66.

Bragachini, M. y A. Bianchini (1999). «Nueva Herramienta de Agricultura de Precision: Banderilleo Satelital DGPS como Guia de Pulverizadoras, Fertilizadoras y Sembradoras.» En: *INTA Manfredi.* 1.1, págs. 2-7.

Bragachini, M. y A. Martini (2000). «Componentes de Agricultura de Precision.» En: *Inta Manfredi.* 1.1, págs. 15-19.

Bragachini, M. y M. Mendez (2006). «Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas». En: *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.* 1.1, págs. 25-37.

Broge, N. y E. LeBlanc (2001). «Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density.» En: *Remote Sensing of Environment* 76.1, págs. 156-172.

Cabrera, E. y G. Galindo (2011). «Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escalas Gruesa y Escala Fina.» En: *Instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios Ambientales.* 1.1, págs. 1-20.

Camacho, R. G. (1995). «Caracterizacion de Nueve Genotipo de Maiz en relacion a Area Foliar y Coeficiente de Extincion de Luz.» En: *Universidad Central de Venezuela.* 1.1, págs. 1-11.

Chandler, J. y J. Nardmann (2008). «Plant Development Revolves Around Axes.» En: *Trend Plant Sci.* 13.13, págs. 78-84.

Chuvieco, E. (1995). «Fundamentos de Teledeteccion Espacial». En: *Ediciones Rialp* 2.1, págs. 45-87.

Curran, P. (1980). «Remote Sensing Systems for Monitoring Crops and Vegetation». En: *Progress in Physical Geography* 4.4, págs. 315-341.

Electronics, Core (2012). «JYMCU Bluetooth to UART Wireless Serial Port Module for Arduino.» En: *JYMCU Datasheet.* 1.1, págs. 2-6.

Fadhlan, M. y A. Lothfy (2015). «Vehicle Tracking and Locking System Using Global Positioning System And Global System Mobile.» En: *Universidad Tecnica de Melaka.* 1.1, págs. 7-14.

Fassio, A. y A.I. Carriquiry (1998). «Maiz: Aspectos sobre Fenologia.» En: *INIA* 1.1, págs. 5-55.

Fischer, K.S. y F.E. Palmer (1984). «Tropical maize. ln The physiology of tropical field crops.» En: *Goldsworthy* 1.1, págs. 213-248.

Freedman, Y. y S. Zemansky (2009). «Fisica Universitaria.» En: *Pearson.* 2.12, págs. 3-13.

García, E. y F. Flego (2014). «Agricultura de Precision». En: *Tecnologia Agropecuaria* 72.12, págs. 99-116.

Gitelson, A. (2004). «Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation.» En: *Elsevier.* 1.1, págs. 1-11.

Gitelson, A. y M. Merzlyak (1994). «Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation.» En: *Journal of Plant Physiology* 3.3, págs. 286-292.

Haining, R. (2003). «Spatial Data Analysis: Theory and Practice.» En: *Cambridge* 1.2, págs. 15-43.

Hantson, S. y E. Chuvieco (2011). «Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección.» En: *Revista de Teledeteccion.* 1.1, págs. 1-11.

Harris, R. (1987). «Satellite Remote Sensing, An Introduction.» En: *Routledge Kegan* 1.1, págs. 5-16.

Hofmann, B. y H. Lichtenegger (1997). «Global Positioning System, Theory and Practice». En: *Springer-Verlag* 1.1, págs. 14-21.

Huete, A.R (1987). «Spectral Signatures and Vegetation Indices.» En: *Photogrammetric Workgroup* 2.1, págs. 13-26.

Instruments, N. (2006). «Comunicacion Serial: Conceptos Basicos.» En: *digital.* 1.1, págs. 1-5.

Jordan, C. (1969). «Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor.» En: *Ecology* 50.1, págs. 663-666.

Kemerer, A. y C. Di Bella (2007). «Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en campos de maíz.» En: *Asociacion Española de Teledeteccion* 1.1, págs. 1-5.

Kiesselbach, T.A. (1980). «The Structure and Reproduction of Corn.» En: *Agronomy.* 1.1, págs. 77-93.

Kleinjan, J. y D. Carlson (2007). «Developing productivity zone from multiple years of yield monitor data.» En: *GIS Applications in Agriculture* 1.1, págs. 65-79.

Landau, E.C (2003). «Sistemas de Informações Geográficas e Técnicas de Sensoriamento Remoto como Ferramentas para o Planejamento de Estratégias de Conservação da Diversidade Biológica.» En: *Prado P.I* 1.3, págs. 1-14.

Lopez, J.B. y W. Werr (2009). «The role of nutrient availability in regulating root architecture.» En: *Plant Biol.* 6.6, págs. 280-287.

Mantovani, E.C. y C. Magdalena (2014). «Manual de Agricultura de Precision.» En: *IICA* 1.1, págs. 12-158.

Mantovani, E.C y J. Olivera (2004). «Estabelecimento de critérios para intervenção em áreas de produção de milho utilizando conceitos de agricultura de precisão.» En: *Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisao.* 1.33, págs. 1-5.

Maresma, A. y M. Ariza (2016). «Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize from a Standard UAV Service.» En: *Remote Sensing.* 1.1, págs. 3-13.

Martini, A. y A. Bianchini (1999). «Sistemas de Posicionamiento». En: *INTA Manfredi* 69.3, págs. 1-12.

Martini, A. y A. Mendez (2003). «Potencialidad de la información de los Mapas de Rendimiento en la Interpretación del Manejo de Factores de Rendimiento y su Respuesta Sitio Específica en el Cultivo de Soja.» En: *INTA Manfredi* 1.1, págs. 3-7.

Miller, B.A. y C. Bisdikian (2001). «Bluetooth revealed: the insider guide to an open specification for global wireless communication.» En: *Prentice Hall PTR.* 1.1, págs. 127-156.

Monk, S. (2013). «Programming Arduino Next Steps: Going Further with Sketches.» En: *Science.* 1.1, págs. 12-48.

Moreno, M.A. (2001). «Apuntes de Control PID.» En: *Universidad Mayor de San Andres.* 1.1, págs. 53-91.

Murtha, P.A (1978). «Remote Sensing and Vegetation Damage: A Theory for Detection and Assessment.» En: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44.1, págs. 1147-1158.

Nardmann, J. y W. Werr (2009). «Patterning of the maize embryo and the perspective of evolutionary developmental biology.» En: *Springer.* 13.1, págs. 105-119.

OECD (2003). «Consensus Document on the Biology of Zea mays subsp. mays (Maize).» En: *Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology.* 27.27, págs. 18-25.

Pask, A. y D. Mullan (2013). «Fitomejoramiento fisiologico II: una guia de campo para la caracterizacion fenotipica de trigo.» En: *CIMMYT* 2.2, págs. 97-112.

Philip, G. y D. Watson (1982). «A Precise Method for Determining Contoured Surfaces.» En: *Australian Petroleum Exploration Association Journal.* 1.1, págs. 1-11.

Reho, A. (2015). «Características principales del Estado de Sinaloa con enfoque en agricultura». En: *Sinaloa en Cifras* 69.3, págs. 1-5.

Richard, A. y M. Tasumi (2002). «Surface Energy Balance Algorithms for Land.» En: *SEBAL.* 1.1, págs. 3-13.

Ritchie, S.W. y J.J. Hanway (1986). «How a corn plant develops.» En: *Special Report* 48.48, págs. 8-21.

Rivera, R. y F. Gavi (2002). «Utilizacion de Imagenes de Satelite para Determinar Areas con Problemas de Lixiviacion de Nitratos.» En: *Revista Chapingo* 1.1, págs. 31-37.

Ruiz, R.L. y J.A. Vasquez (2004). «Implementacion del protocolo Bluetooth para la conexion inalambrica de dispositivos electronicos programables.» En: *Scientia Et Technica.* 1.1, págs. 12-18.

Schmidt, M. (2014). «Arduino: A Quick Start Guide.» En: *Pragmatic Bookshelf.* 1.1, págs. 23-37.

Sensirion (2016). «Datasheet SHT3x.DIS.» En: *SHT31 Datasheet.* 2.2, págs. 3-8.

Shaw, R.H. (1988). «Climatic requirement ln Corn and corn improvement.» En: *Madison ASA.* 3.3, págs. 609-638.

Singh, V. y D.R. Jordan (2010). «Morphological and architectural development of root systems in maize.» En: *Plant Soil.* 2.2, págs. 287-299.

Sivakumar, M.V.K. y P.S. Roy (2004). «Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology.» En: *World Meteorological Organisation* 11.7, págs. 18-27.

SkyLab (2010). «GPS Module DataSheet.» En: *SKM53 Datasheet.* 1.1, págs. 1-6.

Tinoco, C. (2008). «Arreglo Espacial de Hibridos de Maiz, Indice de Area Foliar y Rendimiento.» En: *INIFAP.* 1.1, págs. 3-13.

Tollenaar, M. (1977). «Sinksource relationship during reproductive development in maize: a review.» En: *Maydica.* 22.22, págs. 49-75.

Vincini, M. y E. Frazzi (2011). «Comparing narrow and broad-band vegetation indices to estimate leaf chlorophyll content in planophile crop canopies.» En: *Precision Agriculture* 12.3, págs. 334-344.

Warnok, R. (2006). «Area Foliar, Componentes del Area Foliar y Rendimiento de Seis Genotipos de Caraota.» En: *Universidad Central de Venezuela.* 1.1, págs. 3-13.

Watson, D. y G. Philip (1985). «A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation.» En: *Geoprocessing.* 1.1, págs. 3-13.

Wolver, D. y H. Abelson (2011). «App Inventor.» En: *Reilly Media Inc.* 1.1, págs. 21-37.

Zubair, A.M. (2015). «Bus tracker by using Global Positioning System And Global System Mobile.» En: *Universidad Tecnica de Melaka.* 1.1, págs. 12-20.

Glosario de Terminologia y Constantes Fisicas

GPS	**G**lobal **P**ositioning **S**ystem
GIS	**G**eografic **I**nformation **S**ystem
NDVI	**N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex
NAVSTAR	**NAV**igation **S**ystem with **T**iming and **R**anging
DGPS	**D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem
GNSS	**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem
PWM	**P**ulse **W**idth **M**odulation
UART	**U**niversal **A**synchronous **R**eceiver and **T**ransmitter
RINEX	**R**eceiver **IN**dependent **EX**change
UTM	**U**niversal **T**ransverse **M**ercator

Velocidad de la Luz	$C = 2{,}99792458 \times 10^8 ms^{-1}$
Constante de Planck	$6{,}6 \times 10^{-34} Js^{-1}$
Constante de Pista 1	$K_1 = 0{,}0647$
Constante de Pista 2	$K_2 = 0{,}4281$
Constante de Pista 3	$K_3 = 0{,}6732$

Hectárea (ha)	m^2
Energía Radiante (Q)	J
Densidad Radiante (W)	J/m^3
Flujo Radiante (ϕ)	$vatios(W)$
Emitancia Radiante (M)	W/m^2
Irradiancia (E)	W/m^2
Intensidad Radiante (I)	W/sr
Emitancia Radiante (L)	W/m^2sr
Radiancia Espectral (L_λ)	$W/m^2sr\mu m$