

**Sistema IoT con UAV Y GPR para Identificar Zonas con Aguas Subterráneas en el
Departamento de La Guajira - Colombia**

Rafael Alberto Daza Plata

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI
Maestría en Gestión de Tecnología de la Información
San Juan Del Cesar, La Guajira Colombia

2022

**Sistema IoT con UAV Y GPR para Identificar Zonas con Aguas Subterráneas en el
Departamento de La Guajira - Colombia**

Rafael Alberto Daza Plata

Phd. Sixto Enrique Campaña Bastidas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Maestría en Gestión de Tecnología de la Información

San Juan Del Cesar, La Guajira Colombia

2022

Nota del proyecto

Director del proyecto

Jurado

Jurado

Nota obtenida: _____

Dedicatoria

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, quien como guía está presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer. A mi familia que, con apoyo incondicional, amor y confianza permitieron que logre culminar esta maestría.

A todas las personas que me apoyaron y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de esta maestría, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidad

A mi familia ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mi mejor guía en la vida. Hoy cuando concluyo esta maestría, les dedico a ustedes este logro como una meta más conquistada.

A mi tutor Sixto Enrique Campaña Bastidas sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesite; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas, gracias por sus orientaciones.

Glosario

Agricultura: es la actividad humana tendiente de combinar diferentes procedimientos y saberes en el tratamiento de la tierra, con el objetivo de producir alimentos de origen vegetal, tales como frutas, verduras, hortalizas, cereales, entre otros.

Aguas subterráneas: es la que se encuentra bajo la superficie terrestre y ocupa los poros y las fisuras de las rocas más sólidas.

Antenas: es un dispositivo hecho para transmitir (radiar) y recibir ondas de radio (electromagnéticas).

AP: Agricultura de Precisión

APM Planner: es una aplicación de estación terrestre de código abierto para pilotos automáticos basados en MAVlink, incluidos APM y PX4 / Pixhawk, que se puede ejecutar en Windows, Mac OSX y Linux.

CMR: (Customer Relationship Management) Sistema de Gestión de las Relaciones con el Cliente es un software que administra, recopila y centraliza, en una única base de datos, toda la información de las interacciones comerciales entre la compañía y el cliente.

DARPA: Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa

Degradación del suelo: Es un cambio negativo en el estado del suelo por motivos naturales o, generalmente, por causa del hombre, disminuyendo su capacidad para producir y afectando el ecosistema.

Desertización: es el proceso a través del cual el suelo sufre una pérdida de gran parte de sus nutrientes por acción y efecto del clima.

DFT: Transformada Discreta de Fourier

ERP: (Enterprise Resource Planning) como el software de gestión empresarial compuesto por varios módulos que gestionan cada área de un negocio y automatizan sus procesos internos.

FMCW: Onda Continúa Modulada en Frecuencia

FMCW GPR: Radar Penetrante Terrestres de Onda Continúa Modulada en Frecuencia

GNU Radio: es una herramienta de desarrollo libre y abierta que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software. Puede utilizarse con hardware de RF de bajo costo para crear radios definidas por software, o sin hardware en un ambiente de simulación.

GPR: Radar de Penetración de Tierra.

GPS: es un sistema que permite posicionar cualquier objeto sobre la Tierra con una precisión de hasta centímetros

La Guajira: es un departamento colombiano en el mar Caribe, se distingue por sus paisajes desérticos, las dunas de arena gigantes y las haciendas y las villas pesqueras remotas del pueblo indígena wayuu.

GUI: Interfaz Gráfica de Usuario.

HackRF: es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz. Diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, HackRF One es una plataforma de hardware de código abierto que puede usarse como un periférico USB o programarse para un funcionamiento autónomo.

IFFT: Transformada Inversa Rápida de Fourier

IMU: Una unidad de medición inercial o IMU (del inglés inertial measurement unit), es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos.

IoT: Internet Of Things. Traducido al español, “Internet de las Cosas”, la cual es una red de objetos cotidianos interconectados.

LIDAR: (Light Detection And Ranging) es una tecnología que permite medir la distancia entre un sensor y un objeto, a través de un rayo de luz láser para obtener medidas de posicionamiento georreferenciadas mediante modelos digitales tridimensionales de alta precisión.

Linear Sweep: también llamado FMCW GPR que básicamente lo que hace es transmitir continuamente la señal para cambiar la frecuencia de la portadora por medio de un VCO, en un rango de frecuencia elegido.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Prospección: exploración del subsuelo encaminada a descubrir yacimientos minerales, petrolíferos, arqueológicos o la existencia de aguas subterráneas.

Radar: es un término que procede de un acrónimo inglés: Radio detecting and ranging (“Detección y localización por radio”).

Raspberry Pi: es un computador de bajo coste y tamaño reducido, tanto es así que cabe en la palma de la mano, pero puedes conectarle un televisor y un teclado para interactuar con ella exactamente igual que cualquier otra computadora.

RF: Radio Frecuencia.

TX: Transmisor de Señal.

RX: Receptor de Señal.

Salinización: Es cuando se acumula una gran cantidad de sales en el agua y en los suelos, lo que trae como consecuencia su deterioro. En estas condiciones, las plantas no pueden crecer, excepto las que están especialmente adaptadas, llamadas “plantas halófitas”.

SAR: acrónimo del inglés (Synthetic Aperture Radar) es un tipo de sistema radar.

SBC: Computadores de Placa Simple.

SDR: Radio Definida por Software.

Sequía: Falta de agua por la escasez prolongada de las lluvias.

SF: Frecuencia Escalonada.

SFCW: Onda Continúa de Frecuencia Escalonada.

SFWC GPR: Radar Penetrante Terrestres de Onda Continua de Frecuencia Escalonada.

Stepped Frequency: utiliza un sintetizador de frecuencia para recorrer un rango determinado espaciadas por un intervalo.

UAV: Vehículo Aéreo no Tripulado, UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicle).

UHF: Frecuencia Ultraalta.

UWB: Banda Ultra Ancha.

VHF: Frecuencia Muy Alta.

DFT: Transformada Discreta de Fourier.

Resumen

El presente documento tiene dos objetivos principales; el primero es evidenciar los efectos de las sequías extremas y la escasez de agua en el sector agropecuario del departamento de La Guajira. El segundo es mostrar que hoy en día existen alternativas tecnológicas que pueden solventar la problemática de la falta de agua. En la actualidad la sequía es uno de los problemas que más daños está provocando en el departamento de La Guajira, donde históricamente se presenta dicho fenómeno meteorológico. La Falta de rendimiento en cultivos y producciones, la dificultad con las siembras por la falta de humedad son algunas de las consecuencias que enfrentan los agricultores de la región. La Guajira es una zona que se caracteriza por un clima árido y semiárido, a pesar de tener este rasgo desfavorable, es un territorio que cuenta con extensiones importantes de recursos hídricos subterráneos que han sido poco explorados, por falta de conocimiento y recursos tecnológicos y económicos. Con este proyecto se busca ayudar a los agricultores del departamento en la identificación de aguas subterráneas viables para la agricultura, mediante el desarrollo de un sistema IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas) que utilice tecnologías UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado), y GPR (Radar de Penetración de Tierra), para mitigar el riesgo de pérdidas por sequías extremas y eventos asociados. El diseño experimental con enfoque exploratorio desarrollado en este documento sirve para identificar a través de pruebas la información pertinente que permita analizar las problemáticas y las opciones tecnológicas que le sirvan al agricultor para mejorar la producción y el rendimiento de los cultivos en el territorio a través de la prospección de agua subterránea.

Palabras claves: sequia, escasez de agua, agua subterránea, IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas), UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado), y GPR (Radar de Penetración de Tierra).

Abstract

This document has two main objectives; The first is to show the effects of extreme droughts and water scarcity in the agricultural sector of the department of La Guajira. The second is to show that today there are technological alternatives that can solve the problem of lack of water.

Currently, drought is one of the problems that is causing the most damage in the department of La Guajira, where this meteorological phenomenon historically occurs. The lack of yield in crops and productions, the difficulty with planting due to the lack of humidity are some of the consequences faced by farmers in the region. La Guajira is an area that is characterized by an arid and semi-arid climate, despite having this unfavorable trait, it is a territory that has important extensions of underground water resources that have been little explored, due to lack of knowledge and technological and economic resources. . This project seeks to help farmers in the department in the identification of viable groundwater for agriculture, through the development of an IoT (Internet of Things or Internet of Things) system that uses UAV (Unmanned Aerial Vehicle) technologies, and GPR (Ground Penetrating Radar), to mitigate the risk of losses due to extreme droughts and associated events. The experimental design with an exploratory approach developed in this document serves to identify, through tests, the pertinent information that allows analyzing the problems and technological options that serve the farmer to improve the production and yield of crops in the territory through groundwater prospecting.

Keywords: drought, water scarcity, groundwater, IoT (Internet of Things or Internet of Things), UAV (unmanned aerial vehicle), and GPR (ground penetrating radar).

Tabla de contenido

Lista de tablas	16
Lista de figura	17
Lista de Anexos.....	20
Situación problema.	24
Definición del problema.....	24
Delimitación.....	26
Espacial	26
Temporal	26
Ubicación geográfica.....	26
Objetivos.....	27
Objetivo general	27
Objetivos específicos	27
Justificación	28
Marco Referencial.....	30
Estado del arte.....	30
Vehículo Aéreo No tripulado (UAV) y Radar de Penetración de Tierra (GPR)...	30
Aplicación de Radar de Penetración de Tierra de Onda Continua de Frecuencia Escalonada (SFCW GPR) para caracterización de la morfología del suelo agrícola.	35

Marco teórico	36
Tecnologías para UAV	36
Tecnología para GPR	38
Sequía, causas y consecuencias	42
Herramientas de la industria 4.0.....	44
Agricultura de precisión	46
Propiedades eléctricas del suelo	47
Sector agrícola de La Guajira.....	49
Metodología	55
Tipo de investigación	55
Diseño metodológico	56
Población y muestra	56
Población.....	56
Muestra.....	57
Técnicas e instrumentos de recolección de muestras	57
Instrumento de recolección de datos	57
Presupuesto	63
Presupuesto del UAV	64
Presupuesto del GPR.....	65
Costos totales del proyecto.....	66

Análisis de resultados.....	66
Variables a sensor o tener en cuenta para la detección de agua.	66
Análisis del sistema.....	77
Requerimientos funcionales	77
Requerimientos no funcionales.	80
Diseño gráfico del prototipo o solución.....	80
Elementos de hardware necesarios a nivel general para el prototipo.....	81
Elementos de software para el prototipo.	86
Diseño final propuesto.	89
Desarrollo del prototipo	91
Selección de Hardware para el diseño propuesto.....	92
Selección de software.....	97
Construcción del prototipo.....	99
Hardware	100
Software	102
Pruebas de aceptación y resultados.	104
Pruebas de funcionamiento preliminares Sistema IoT	105
Procesamiento de la señal	110
Ajustes del prototipo luego de las pruebas.....	113
Versión final del prototipo.	116

Divulgación en eventos de difusión del conocimiento.	120
Conclusiones	121
Referencias.....	124
Anexos	131

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Oferta agrícola por región geográfica de La Guajira</i>	51
Tabla 2. <i>Gastos iniciales del sistema UAV</i>	64
Tabla 3. <i>Gastos iniciales del sistema GPR</i>	65
Tabla 4. <i>Gastos totales del sistema IoT</i>	66
Tabla 5. <i>Resumen de los métodos de prospección geofísica</i>	78
Tabla 6. <i>Cuadro comparativo de las posibles antenas a utilizar en el sistema IoT</i>	81
Tabla 7. <i>Cuadro comparativo de los posibles Computadores de placa simple (SBC), a utilizar en el sistema IoT</i>	82
Tabla 8. <i>Cuadro comparativo de los posibles Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), a utilizar en el sistema IoT</i>	84
Tabla 9. <i>Cuadro comparativo de los posibles Sistema de comunicación y telemetría a utilizar en el sistema IoT</i>	86
Tabla 10. <i>Cuadro comparativo de los posibles tarjeros SDR a utilizar en el sistema IoT</i>	87
Tabla 11. <i>Cuadro comparativo de los posibles Software SDR a utilizar en el sistema IoT.</i>	88
Tabla 12. <i>Cuadro comparativo de los posibles Software para misión de vuelo UAV a utilizar en el sistema IoT</i>	89

Lista de figura

Figura 1. <i>Ubicación del corregimiento los pondores - San Juan del Cesar – La Guajira</i>	26
Figura 2. <i>Sistema GPR a bordo del UAV</i>	32
Figura 3. <i>Sistema FMCW GPR montado en UAV</i>	33
Figura 4. <i>Opciones de diseño de un GPR.</i>	41
Figura 5. <i>Procedencia del agua para regio.</i>	67
Figura 6. <i>Sistema de riego utilizado.</i>	68
Figura 7. <i>Situaciones relacionadas con el medio ambiente.</i>	69
Figura 8. <i>Disponibilidad de agua en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	70
Figura 9. <i>Acceso al agua en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	71
Figura 10. <i>Perspectiva futura del sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	72
Figura 11. <i>Condiciones futuras del sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	73
Figura 12. <i>Existencia de agua subterránea en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	74
Figura 13. <i>Adopción de la tecnología para identificar agua subterránea en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	75
Figura 14. <i>Impacto de tecnología para para mejorar la producción del sector agropecuario del corregimiento de Los Pondores.</i>	76
Figura 15. <i>Diseño de arquitectura del sistema IoT</i>	80
Figura 16. <i>Esquema de los principales subsistemas que componen el prototipo</i>	90
Figura 17. <i>Diagrama sistema IoT propuesto</i>	91
Figura 18. <i>HackRF One.</i>	92

Figura 19. <i>Antena SAW-500</i>	93
Figura 20. <i>Raspberry Pi 3</i>	94
Figura 21. <i>Tarot 650</i>	95
Figura 22. <i>Radio telemetría transceptor V3</i>	97
Figura 23. <i>Software GNU Radio</i>	98
Figura 24. <i>Software Misión Planner</i>	99
Figura 25. <i>Conexión física con la tarjeta Hack RF ONE</i>	101
Figura 26. <i>Prueba de ensamble del hardware del GPR</i>	102
Figura 27. <i>El diagrama de flujo del transmisor</i>	103
Figura 28. <i>El diagrama de flujo del receptor</i>	104
Figura 29. <i>Elementos involucrados en las pruebas del GPR</i>	106
Figura 30. <i>Lectura GPR sin elemento en la zona analizada</i>	107
Figura 31. <i>Lectura GPR con agua en la superficie de la zona analizada</i>	108
Figura 32. <i>Lectura GPR con agua a una profundidad de 25 Cm en la superficie de la zona analizada</i>	109
Figura 33. <i>Lectura GPR con agua a una profundidad de 50 Cm en la superficie de la zona analizada</i>	110
Figura 34. <i>Construcción de la señal mediante MatLab</i>	111
Figura 35. <i>Aplicación de la Transformada Rápida de Fourier a la señal procesada en MatLab</i>	112
Figura 36. <i>Filtrado de la señal mediante filtro paso alto</i>	113
Figura 37. <i>Representación de la señal A-Scan</i>	114
Figura 38. <i>Representación de la señal B-Scan</i>	115

Figura 39. <i>Sistema GPR y UAV.</i>	116
Figura 40. <i>Funcionamiento del sistema IoT.</i>	116
Figura 41. <i>Exploración del Sistema GPR y UAV en el campo.</i>	118

Lista de Anexos

Anexo A. Encuesta realizada a agricultores de Los Ponderos.....	131
Anexo B. Artículo de Avance de Investigación para Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI).....	135
Anexo C. Reconocimiento Premios ACOFI 2020 en categoría Avances en investigación.....	144
Anexo D. Video institucional.	145
Anexo E. Imagen del poster del Prototipo IoT.	146
Anexo F. Propuesta para Premios de Investigación de América Latina de Google (LARA).....	147

Introducción

La sequía y la escasez de agua han sido factores decisivos para el desarrollo humano, las grandes hambrunas han propiciado la movilización de pueblos completos, y en ocasiones su decadencia y desaparición; pero también, la sequía ha sido el motor del desarrollo tecnológico, al impulsar los avances científicos para mejorar la gestión y uso del agua.

Las sequías son uno de los eventos extremos que más pérdidas económicas causan cada año y representan un gran reto para la sociedad. El departamento de La Guajira no es una región ajena a esta realidad que afecta directamente al sector agrícola generando la reducción de la producción de los cultivos, impactando en los medios de vida de la población local, provocando menos ingresos para los agricultores, hambre, crisis alimentarias, un aumento de los precios de los alimentos y el desempleo.

La agricultura bajo riego está limitada en esta región que presenta clima árido y semiárido, por la escasa disponibilidad de recursos hídricos superficiales. El uso del agua subterránea puede modificar esta desventajosa situación, apoyando la economía rural de la región a través del rendimiento, la productividad de los cultivos y la mejora significativa de los medios de subsistencia, la seguridad alimentaria de los hogares de las comunidades agrícolas y ganaderas del departamento de La Guajira. Para aprovechar las zonas con recursos hídricos subterráneos, las tecnologías pueden convertirse en un gran aliado para los agricultores.

La transformación digital ha provocado una ola de cambios importantes en todas las áreas donde ha sido aplicada, incluida la educación, la medicina, los negocios y el mundo industrial; la agricultura no puede escapar al impacto de esta revolución tecnológica. Conociendo este hecho y teniendo en cuenta las dificultades de tiempo para aumentar la productividad agrícola (tales como alteraciones climáticas, escasez de lluvias, sequías extremas, el avance de la desertización,

crecimiento de la población urbana, etc.), las tecnologías relacionadas con IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas), UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado), y GPR (Radar de Penetración de Tierra), son una oportunidad para que la industria agrícola mejore significativamente la eficiencia, productividad y garantice la demanda alimentaria regional, local y nacional de las generaciones venideras. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), realizó un estudio que reveló que en 2050 se requerirá un 70% más de producción agrícola a nivel mundial, lo que representa duplicar las cifras actuales de producción.

Por tanto, el uso de las nuevas tecnologías en la agricultura permite ser más eficientes y precisos en la identificación de zonas con recursos hídricos subterráneos y en consecuencia conseguir un mayor retorno económico, además de mitigar riesgos personales y ambientales. Por consiguiente, se propone un prototipo de bajo costo para que los agricultores de la región puedan identificar las zonas con agua subterránea en menor tiempo y con mayor precisión, minimizando las extensas horas de trabajo en el proceso de identificación, por otra parte, no se requiere de poner en riesgo a el personal para realizar los estudios en lugares de difícil acceso. El sistema propuesto se basa en el diseño de un prototipo IoT (Internet de las Cosas) que permite explorar el subsuelo, controlado remotamente por una terminal conectada a Internet, ya sea un teléfono móvil, una Tablet o un computador, donde se puede visualizar el recorrido que hace el dispositivo y los hallazgos que identifique, este proceso se apoya en el uso de tecnologías GPR (Radar de Penetración de Tierra) y UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado); el primero para hacer análisis del subsuelo que abarque el dispositivo y el segundo para hacer el sobrevuelo de los lugares objetivo y que se ha estimado podrían tener agua subterránea. El prototipo propuesto se fundamenta en una investigación cuantitativa exploratoria que intenta medir la magnitud de un fenómeno utilizando técnicas y estadísticas para el análisis de los datos recopilados.

A continuación, se presentan, en ocho capítulos, los conocimientos necesarios para entender el impacto desfavorable del cambio climático en el sector agropecuario del departamento de La Guajira e identificar las generalidades de las aguas subterráneas, establecer los mecanismos para su identificación, monitoreo y las recomendaciones para realizar una gestión integral adecuada. Durante el recorrido por el primer y el segundo capítulo el lector encontrará el desarrollo de los objetivos, el planteamiento del problema, la justificación y delimitación, el tercer y cuarto capítulo lo conforman el marco teórico, referencial, conceptual y el diseño metodológico; este documento además contiene en los capítulos sexto, séptimo y octavo detalles de la solución propuesta, diseño del prototipo, costos, diferentes pruebas y ensayos tecnológicos para la prospección de agua subterránea, de tal forma que suministre a los agricultores claridad frente a lo que debe hacer en cuanto al, uso y aprovechamiento de las tecnologías como el IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas), UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado), y GPR (Radar de Penetración de Tierra).

Situación problema.

Definición del problema

La sequía, es un riesgo devastador, no solo natural sino también causado por la acción del ser humano, afecta a una porción significativa de la población mundial, particularmente a aquellos que viven en regiones semiáridas y áridas. Las consecuencias para las comunidades agrícolas pueden ser severas, frecuentemente revirtiendo los logros en seguridad alimentaria y reducción de pobreza, entorpeciendo los esfuerzos por lograr los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)(Reino et al., 2017) .

La Guajira es una de las regiones más vulnerables al cambio climático y está sujeta a fenómenos hidrometeorológicos cada vez más intensos, que ocasionan sequías, afectando la disponibilidad de agua para los distintos usos (Sofía et al., 2017). Uno de los sectores que está siendo más afectado, es el agrícola, puesto que en la región “Entre el 80 - 98%”de los rubros agrícolas dependen de la lluvia (Niño et al., 2018).

La escasez de agua para la actividad agropecuaria hace que la producción de alimentos sea más difícil que en otras regiones, lo que pone en evidencia la dificultad que tienen los habitantes en La Guajira, en especial las comunidades en las zonas rurales, para asegurar su sostenibilidad alimentaria, la producción y el rendimiento de los cultivos.

Debido a las características hidrológicas de la región, la falta de agua constituye un factor que limita su desarrollo: amenaza el sector agrícola, las actividades económicas, frena el incremento de actividades productivas y condiciona la conservación del medio ambiente.

Los principales efectos que la sequía está produciendo en el departamento de La Guajira se mencionan a continuación, partiendo principalmente de los generados en el sector agrario: Falta de rendimiento en cultivos y producciones, dificultad con las siembras por la falta de

humedad, problemas en los regadíos, carencia de agua de bebida y de pastos para el ganado, encarecimiento de los forrajes en ganadería. Por otro lado, se encuentran consecuencias ambientales, como la degradación de la flora y fauna, el deterioro de la calidad del agua, la pérdida de vida silvestre y el aumento de los fuegos forestales.

Así mismo las consecuencias sociales y económicas para la población guajira se identificó, el deterioro de la seguridad alimentaria, malnutrición, deshidratación y enfermedades (La consecuencia más visible de esta situación se evidencia en la incidencia de la desnutrición, que en población menor de 5 años es de 750,4 casos por cada 100.000 niños, superior al promedio nacional. La muerte por esta causa es de 45 por cada 100.000 niños, lo que representa el indicador más alto del país(Guajira, 2021)., hambruna debida a la escasez de alimentos, la disminución en la calidad de vida, el impedimento del desarrollo económico, el aumento en los precios de alimentos y el deterioro del turismo.

Por otro lado los métodos de identificación de agua en zonas de clima árido y semiárido, como el que presenta el departamento de La Guajira, el método más común es el ZAHORI, un procedimiento que presenta varias limitaciones dado que funciona solamente en aguas subterráneas en movimiento, no es preciso en la búsqueda de recursos hídricos subterráneas en campos electromagnéticos(presencia de energía eléctrica),por otra parte la falta de experiencia en el momento de la ejecución del método ZAHORI, y la de concentración genera una pérdida de tiempo, dinero, agotamiento y desgaste de recurso humano evidenciando la falta de eficiencia en la exploración del terreno para la prospección de agua subterránea.

Lo que genera la siguiente pregunta: ¿Es posible apoyar al sector agrícola del departamento de La Guajira con una solución tecnológica que le facilite encontrar agua subterránea para el desarrollo de las actividades que comprende este sector en el departamento?

Delimitación

Espacial

Este estudio se realizó en San Juan del Cesar, específicamente en el corregimiento de los Pondores; donde se encuentra la mayor concentración de predios con presencia de agua subterránea.

Temporal

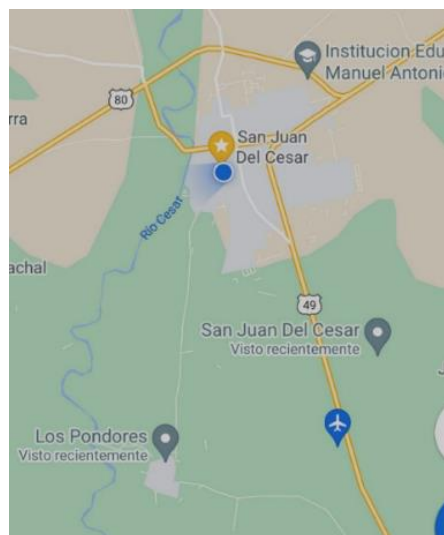
La investigación se llevó a cabo en un periodo de doce (12) meses.

Ubicación geográfica

El municipio de San Juan del Cesar está dividido territorialmente de la siguiente manera: 35 barrios, 10 corregimientos, 14 centros poblados y 23 veredas; de los cuales el corregimiento de Los Pondores es el lugar donde se desarrolla dicho proyecto, y su ubicación exacta se puede apreciar en la figura 1.

Figura 1

Ubicación del corregimiento los pondores - San Juan del Cesar – La Guajira.



Fuente. Google maps <https://goo.gl/maps/QZApWsQ84DrwL9cS8>.

Objetivos

Objetivo general

Ayudar a los agricultores del departamento de La Guajira en la identificación de aguas subterráneas viables para la agricultura, mediante el desarrollo de un sistema IoT que utilice tecnologías UAV y GPR, el cual mitigue el riesgo de pérdidas por sequías extremas y eventos asociados.

Objetivos específicos

Desarrollar un estado del arte del tema de investigación propuesto, que contenga los métodos y técnicas de prospección de agua subterránea mediante GPR y UAV.

Investigar referentes bibliográficos relacionados y otras fuentes de información que incluyan métodos y técnicas de prospección de agua subterránea mediante GPR y UAV.

Diseñar el sistema de rastreo de agua subterránea IoT con GPR y UAV, de acuerdo con las variables de profundidad máxima de penetración, tecnologías de hardware necesarias.

Desarrollar el prototipo del sistema para identificación de aguas subterráneas mediante GPR a bordo de un UAV, acorde con el diseño determinado.

Realizar pruebas de aceptación y ajustes al sistema propuesto.

Presentación del sistema implementado en diferentes eventos de difusión del conocimiento.

Justificación

La presente investigación se basa en entender las complicaciones del sector agrícola en el departamento de La Guajira, por los efectos del cambio climático y la baja disponibilidad de agua, una de las características más comunes en las zonas de clima árido y semiárido, por tal razón la producción y el rendimiento de los diferentes cultivos ha disminuido, generando consecuencias, tales como escasez y alza en el precio de los alimentos, encarecimiento de los forrajes en ganadería, el deterioro de la seguridad alimentaria, malnutrición, deshidratación y enfermedades.

El cambio climático es un fenómeno que requiere la generación de nuevos conocimientos para desarrollar la agricultura en áreas desfavorecidas por su clima árido y semiárido, además este supone que, en las próximas décadas, zonas de clima templado y suelos fértiles se verán afectados por la escasez de lluvias y una tendencia a la salinización.

La tecnología es un gran aliado para este sector que está en constante búsqueda de soluciones para producir en condiciones extremas, de ahí la necesidad de implementar estrategias tecnológicas para identificar zonas con recursos hídricos subterráneos aptos para el riego de los cultivos, tales como el IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas), UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado), y GPR (Radar de Penetración de Tierra) que suponen una gran ayuda para la digitalización y mejora de la productividad agrícola; dado que estas tecnologías permiten tener un conocimiento sobre, la identificación y prospección de aguas subterráneas, de esta manera se podrá hacer una exploración más eficiente de este recurso, lo que se traducirá inmediatamente en un incremento de la rentabilidad y en la optimización del tiempo, reducción de costes y en mitigar riesgos personales.

Las presiones cada vez son mayores por el uso del agua en zonas con recursos hídricos limitados y el deterioro de la calidad del agua superficial ha aumentado la necesidad de comprender y utilizar las aguas subterráneas.

Existen bajos niveles de conocimiento, preparación técnica y académica sobre las aguas subterráneas, así como un escaso beneficio de las tecnologías para la prospección de dicho recurso, en los diferentes niveles regional, departamental y municipal, que permita contar con información y soporte tecnológico para la identificación y manejo integral del recurso hídrico subterráneo.

Por tales razones se propone un prototipo de bajo costo para que los agricultores de la región puedan identificar las zonas con agua subterránea en menor tiempo y con mayor precisión, minimizando las extensas horas de trabajo en el proceso de identificación, por otra parte, no se requiere de poner en riesgo a el personal para realizar los estudios en lugares de difícil acceso.

El sistema propuesto se basa en el diseño de un prototipo IoT (Internet de las Cosas) que permite explorar el subsuelo, controlado remotamente por una terminal conectada a Internet, ya sea un teléfono móvil, una Tablet o un computador, donde se puede visualizar el recorrido que hace el dispositivo y los hallazgos que identifique, este proceso se apoya en el uso de tecnologías GPR (Radar de Penetración de Tierra) y UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado); el primero para hacer análisis del subsuelo que abarque el dispositivo y el segundo para hacer el sobrevuelo de los lugares objetivo y que se ha estimado podrían tener agua subterránea.

Marco Referencial

Estado del arte

Actualmente, Internet de las cosas (IoT) está evolucionando hacia un poderoso paradigma tecnológico en el que una gran variedad de dispositivos están interconectados para recopilar datos para diferentes propósitos en diferentes escenarios de aplicación (por ejemplo, fábricas inteligentes, ciudades inteligentes y agricultura inteligente) (Ji et al., 2019).

Paralelamente a la revolución de IoT, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se consideran soluciones prometedoras para numerosas aplicaciones como vigilancia aérea, fotografía, agricultura de precisión, control de tráfico, telecomunicaciones y, en particular, búsqueda y salvamento (Zeng et al., 2019). Los UAV de baja altitud en particular han recibido mucha atención en la investigación relacionada con las comunicaciones seguras debido a su movilidad, posiciones elevadas y costo relativamente bajo, lo que los convierte en una forma fácil y económica de llegar a una variedad de áreas de vigilancia (Tang et al., 2019).

Como resultado, los UAV pueden ayudar a superar las limitaciones de la infraestructura terrestre de un sistema de IoT. En particular, la integración de UAV en un sistema de IoT puede permitir que dicho sistema eluda obstáculos que pueden bloquear la comunicación directa entre un transmisor y un receptor (por ejemplo, bosques, montañas o edificios altos) (Mozaffari et al., 2019).

Vehículo Aéreo No tripulado (UAV) y Radar de Penetración de Tierra (GPR)

Inicialmente se busca analizar los retos que plantea esta integración de estas dos tecnologías, por ejemplo, los GPR se montan en carros o carriolas y se usan en contacto muy cerca del suelo, con un gran tamaño y peso (M. Schutz, C. Decroze, 2019), lo que significa una dificultad para ser incorporados en un UAV.

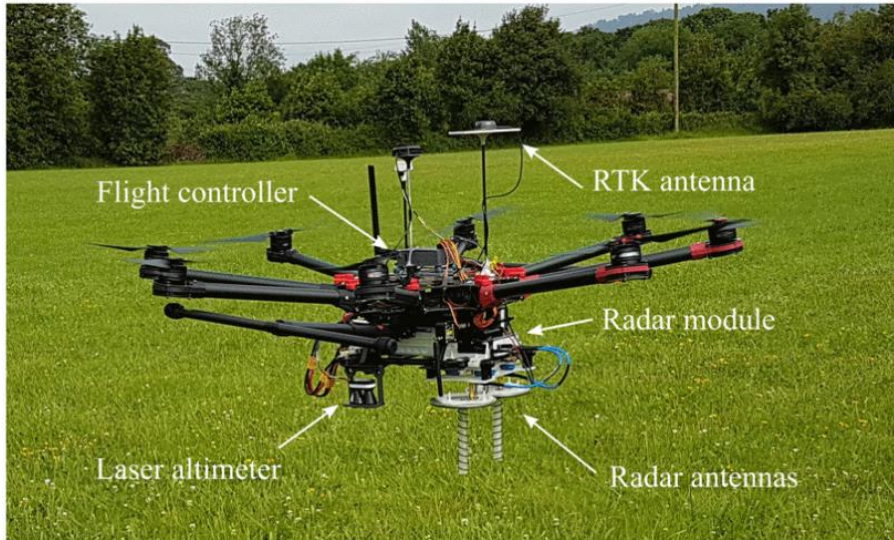
Recientemente, se han llevado a cabo investigaciones y pruebas para integrar el sistema de radar en un mini UAV. Este uso relevante permite la detección sin contacto de objetos enterrados tales como minas (R. Burr, M. Schartel, P. Schmidt, W. Mayer, 2018), (Garcia-Fernandez et al., 2018); imágenes de grandes áreas que son difíciles de alcanzar (Yarleque et al., 2017), y explorar las aguas subterráneas (Beauchamp et al., 2018).

Detección de minas terrestres.

El simple hecho de integrar un GPR a bordo de un UAV ha contribuido significativamente en acelerar el proceso de liberación de tierras en el desminado humanitario. Este proceso consiste en que el UAV vuele a baja altitud para detectar la presencia y ubicación aproximada de minas terrestres, la detección de estas minas se hace gracias al módulo de GPR permitiendo la detección hasta una profundidad de 20 cm (Schartel et al., 2018), y el procesamiento de la imagen se realiza sin conexión utilizando un algoritmo de retroproyección. De igual manera posee otros sensores que contribuyen en la optimización del proceso los cuales son: un LIDAR altímetro y un sistema satelital de navegación global cinemático en tiempo real (RTK GNSS), como se puede ver en la figura 2.

Figura 2

Sistema GPR a bordo del UAV.



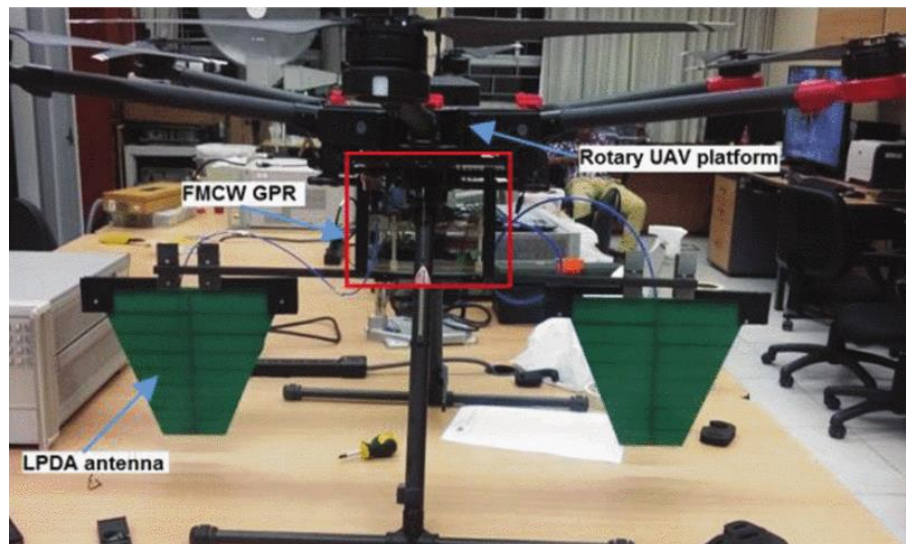
Fuente. (Soldovieri et al., 2011).

Obtención de imágenes de grandes áreas.

La exploración de grandes áreas para detectar y generar imágenes subterráneas utilizando técnicas SAR (Synthetic Aperture Radar) como motor de procesamiento, es posible gracias a la implementación del sistema FMCW GPR montado en un mini UAV (Yarleque et al., 2017). Los primeros resultados de este sistema muestran la detección de un objeto metálico enterrado a 0,4 m bajo tierra, gracias a su capacidad para adquirir, digitalizar y almacenar datos por medio de un modelo Raspberry Pi 2, estos datos son procesados posteriormente. El sistema GPR se compone de un radar FMCW portátil y dos antenas LPDA representada en la figura 3.

Figura 3

Sistema FMCW GPR montado en UAV.



Fuente. (Daniels, 1989).

Explorar las aguas subterráneas.

La utilización de agua subterránea para la agricultura de riego es aproximadamente el 43% del agua utilizada en todo el mundo (Siebert et al., 2010), y la necesidad de agua potable se espera que aumente en un 50% en las próximas décadas (Reid et al., 2010). De allí radica la importancia de identificar agua subterránea y garantizar la sostenibilidad futura de los recursos hídricos.

De esta manera se presenta una investigación inicial que permita las observaciones de la dinámica de los sistemas hidrológicos, revisando de manera específica los desafíos técnicos y las capacidades de los conceptos de GPR en el aire con aplicaciones para la detección de acuíferos, más exactamente la parte superior de nivel freático. De igual manera también se analizan las capacidades y los requisitos tecnológicos asociados (y las limitaciones) para lograr el sondeo del

radar a profundidades suficientes para detectar el agua en las regiones áridas del desierto (Beauchamp et al., 2018).

Por otra parte, en la búsqueda de conocer y explorar los métodos y técnicas de prospección de agua subterránea mediante GPR se evidencia un alto uso a nivel de investigación, como se evidencia en (Paz et al., 2017) el GPR (Radar de Penetración de Tierra) es ideal para caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de los ecosistemas dependientes del agua subterránea (GDE). Dicha investigación de GDE ha permitido la construcción de una base de datos que comprende 91 estudios de casos de GPR en todo el mundo, con los cuales se ha podido concluir que los escenarios menos estudiados corresponden a los ambientes de margas meteorizadas y rocas cristalinas, así como la delimitación de interfaces de salinidad en áreas costeras e interiores; por el contrario, formaciones aluviales, coluviales y glaciares continentales son los entornos geológicos más cubiertos.

La inspección no invasiva de la infraestructura vial es otro claro ejemplo que permite realizarse gracias a los vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con cámaras térmicas infrarrojas y antenas de radar de penetración terrestre (GPR), como lo manifiesta (Massaro et al., 2021) los cuales son capaces de detectar el estado de salud de carreteras y puentes para saber cuándo aplicar un mantenimiento predictivo.

Otro avance significativo en el ámbito de prospección mediante Radar de Penetración de Tierra (GPR), es el que presenta (Omwenga et al., 2019) el cual consiste en un radar de penetración terrestre cognitivo autónomo (ACGPR), transportado por drones u otras plataformas robóticas, este dispositivo tiene la particularidad de realizar una detección y reconocimiento de objetos subterráneos robustos y precisos en diversos entornos basados en el procesamiento de datos y la toma de decisiones mediante una metodología que permite a radar de penetración

terrestre cognitivo autónomo (ACGPR) aprender a tomar decisiones en misiones explorando un entorno desconocido.

Por último, se evidencia en china la implementación de un método novedoso para rastrear automáticamente la capa de hielo; la detección regular del espesor del hielo es importante para la alerta temprana de los desastres relacionados. Esta detección ha sido posible (Bai et al., 2020) gracias a la adopción de un sistema de hardware de detección de espesor de hielo basado en el dispositivo de adquisición de Radar de Penetración Terrestre (GPR) montado en el Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV); el cual ha permitido obtener unos resultados que evidencian que el método propuesto puede manejar los datos recopilados por el UAV con grandes fluctuaciones de manera efectiva, con un rendimiento mejor que el método de detección de correlación en el seguimiento automático de la capa de hielo.

Aplicación de Radar de Penetración de Tierra de Onda Continua de Frecuencia Escalonada (SFCW GPR) para caracterización de la morfología del suelo agrícola.

Es un estudio que busca explorar la aplicación de un radar penetrante de onda continua de frecuencia escalonada (SFCW GPR) que permitió obtener información de las propiedades del suelo en sitios agrícolas para optimizar la calidad del cultivo. Esta información es de notable importancia para determinar la eficiencia del uso del agua y planificar programas de agricultura de precisión. Al aplicar estas tecnologías brinda un impacto positivo, gracias al valor que representa los resultados de las imágenes para lograr altas eficiencias de riego y minimizar los impactos ambientales potenciales de la agricultura.

Las mediciones también sugieren que la correlación de las variaciones delineadas podría ayudar en la identificación de características extendidas y la clasificación de áreas que poseen

propiedades similares con el fin de aumentar la confianza en el monitoreo de los recursos del suelo (Lombardi & Lualdi, 2019).

Marco teórico

Tecnologías para UAV

Concepto de Drones.

Según la definición internacional del Sistema de Vehículos no Tripulados (UVS), un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) es un diseño de avión genérico para operar sin piloto humano a bordo (RPS Info, n.d.). El término simple UAV se usa comúnmente en la comunidad de geomática, pero también existen otros términos como: “Dron”, Vehículo pilotado a Distancia (RPV), Aeronave Operada a Distancia, Sistemas de Aeronave Piloteada a Distancia (RPAS).

Tipo de Drones.

Hoy en día existe una variedad de UAV que se puede clasificar según: el tamaño, el peso, la resistencia, el alcance y la altitud de vuelo. UVS International (RPS Info, n.d.) define tres categorías principales de UAV de la siguiente manera:

UAV tácticos: la masa varía desde unos pocos kilogramos hasta 1.000 kg, el rango desde unos pocos kilómetros hasta 500 km, la altitud de vuelo desde unos pocos cientos de metros hasta 5 km, y la resistencia desde unos minutos hasta 2-3 días.

UAV estratégicos: que incluyen sistemas de resistencia a larga altitud, estratosféricos y exoestratosféricos a gran altitud que vuelan a más de 20,000 m de altitud y tienen una resistencia de 2 a 4 días.

Tareas especiales UAV: clasificados como vehículos autónomos de combate no tripulados, sistemas letales y señuelos.

Características.

Dado que los UAV pueden cubrir un área amplia y tienen una alta flexibilidad, podemos desplegar ampliamente los UAV para realizar las tareas asignadas en la región de interés. Los UAV poseen un bajo costo y pueden equiparse con diferentes tipos de sensores para cumplir con diferentes tareas de detección, como la detección remota y el monitoreo del entorno. (Sun, 2021). Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) tienen las ventajas de alta movilidad, notable versatilidad y despliegue bajo demanda (Liu et al., 2021).

Aplicaciones.

La participación actual de los vehículos aéreos no tripulados en la industria es principalmente indirecta en forma de monitoreo de máquinas, seguimiento e informes de materias primas en depósitos de almacenamiento y datos visuales de áreas remotas difíciles. Industrias como la minería y el transporte utilizan vehículos aéreos no tripulados para obtener imágenes aéreas y crear mapas en 3D de la región objetivo. La inspección de vehículos aéreos no tripulados de áreas remotas e inaccesibles en líneas de transmisión de alta potencia potencialmente peligrosas es también uno de los reemplazos aceptados y emergentes para la inspección manual en la industria de generación y distribución de energía (Pathak et al., 2021).

Drones Agrícolas.

El desarrollo de sistemas de teledetección basados en drones ha avanzado en el campo de la agricultura de precisión (AP) y la teledetección. El uso de UAV para el monitoreo de cultivos ofrece un gran potencial para obtener datos de campo de una manera más simple, rápida y económica que con los métodos tradicionales. La tecnología IoT basada en UAV se considera el futuro de la teledetección en la agricultura de precisión. La capacidad del dron para volar a bajas

altitudes proporciona imágenes de cultivos con una resolución espacial extremadamente alta (es decir, varios centímetros).

Los drones se están utilizando para mejorar una variedad de actividades agrícolas. Los drones terrestres y aéreos se utilizan en la agricultura para la evaluación de la salud de los cultivos, el riego, el monitoreo, la fumigación, la siembra, el análisis de suelos y campos. Los principales beneficios de usar un dron incluyen imágenes de la salud de los cultivos, mapeo SIG integrado, facilidad de uso, ahorro de tiempo y el potencial para aumentar la productividad y el rendimiento (Carreño, 2020).

Tecnología para GPR

Definición.

El radar de penetración terrestre (GPR) es una tecnología electromagnética que se utiliza para detectar cambios en las propiedades físicas. Al enviar ondas electromagnéticas de alta frecuencia bajo tierra para que se propaguen en varios medios, las lecturas GPR poseen diferentes propiedades y se convierten en imágenes de radar. La tecnología de detección GPR puede realizar una detección subterránea real, rápida, no destructiva y de alta resolución. Actualmente, la frecuencia GPR utilizada para la detección se encuentra principalmente entre 100 MHz y 7 GHz, y la profundidad de detección es de alrededor de 1 metro, que es suficiente para detectar la mayoría de los objetivos. Como método de prueba no destructivo, la tecnología de detección GPR presenta un posicionamiento preciso, alta eficiencia y flexibilidad y se usa ampliamente en la detección de infraestructura urbana, detección de capas de estructura de túneles, detección de minas terrestres y otras áreas.

Elementos GPR.

Los GPR convencionales consta de tres partes, las cuales son:

Antenas: Se suelen emplear antenas que trabajen en modo biestático, esto significa que una antena envía y la otra recibe, o en modo monoestático, la misma antena emite y recibe. Desde hace tiempo se vienen empleando dos tipos de antenas: dispersivas (espiral, Vivaldi) y no dispersivas (bicónicas, de pajarita). La mayoría de los sistemas GPR emplean antenas biestáticas, estando estas protegidas por una carcasa.

Unidad de control: La unidad de control es la encargada de coordinar y controlar los sistemas electrónicos de la antena y de los demás accesorios del GPR. En ella se configura la adquisición y salida de datos, así como la gestión y ajuste de las antenas. La configuración de la unidad de control se lleva a cabo desde un software (característico de cada marca comercial) instalado en el computador.

Batería: Es la encargada de proveer la electricidad suficiente para la operación del GPR al momento de realizar la prospección permitiendo que esa actividad se realice de manera libre e independiente.

Aplicaciones.

El radar de penetración terrestre es una técnica de radar para localizar y obtener imágenes de objetos o interfaces que están enterrados bajo tierra. Tiene muchas aplicaciones en una amplia variedad de campos. En el descubrimiento científico, GPR se utiliza para investigaciones arqueológicas o geofísicas. En ingeniería civil, GPR es una herramienta popular para mapear estructuras subterráneas, reconocer tuberías y cables y evaluar el estado de la construcción. En aplicaciones militares, el GPR se puede utilizar para detectar y eliminar de manera eficiente las minas terrestres no metálicas. El sistema GPR tradicional generalmente está diseñado para

aplicaciones generales donde la estructura y configuración del sistema son fijas (Zhang et al., 2021).

Funcionamiento.

Dicho funcionamiento parte de la emisión pulsos de alta frecuencia de forma activa. Luego, en el proceso de propagación, las señales de pulso de alta frecuencia se reflejarán cuando se encuentren interfaces con diferentes constantes dieléctricas a diferentes profundidades. Después de ser recibidas por la antena receptora, las señales reflejadas se cargarán en la computadora para el procesamiento de datos mediante técnica de filtrado de señales.

Tipos de Radar de Penetración de Tierra (GPR).

Existen varios tipos de sistemas Radar de Penetración de Tierra (GPR) que dependen principalmente de su función en el dominio del tiempo, de la frecuencia y del espacio.

Los tipos de GPR utilizados en el dominio del tiempo son según (Jol, 2008):

GPR de pulso con portadora: consiste en enviar un pulso con una frecuencia portadora, la cual está modulada por una envoltura (cuadrada). La mayoría de los GPR disponibles comercialmente pertenecen a esta familia.

UWB GPR (Ultra Wide Band): es llamado así debido a su gran ancho de banda que maneja, donde la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA) [8], define un sistema de radar como UWB si su ancho de banda fraccional es mayor al 25%.

Los tipos de GPR para el dominio de la frecuencia son:

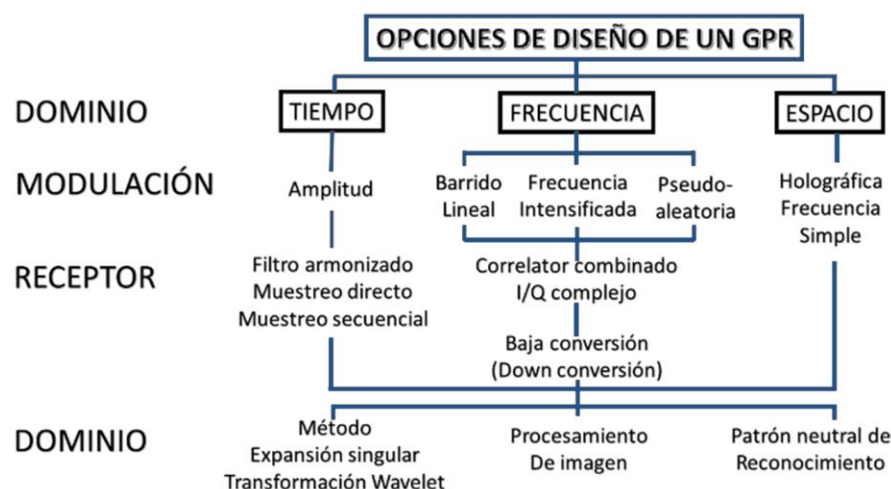
Linear Sweep: también llamado FMCW GPR que básicamente lo que hace es transmitir continuamente la señal para cambiar la frecuencia de la portadora por medio de un VCO, en un rango de frecuencia elegido.

Steppep Frequency: utiliza un sintetizador de frecuencia para recorrer un rango determinado espaciadas por un intervalo.

En función de los tipos de GPR, se deriva el diseño de un sistema basado en SDR como se puede apreciar en la figura 4, dicho sistema puede ser más dinámico y versátil según sean los métodos de modulación y su dominio de trabajo (tiempo, frecuencia, espacio) que más se ajusten a las aplicaciones requeridas (Jol, 2008).

Figura 4

Opciones de diseño de un GPR.



Fuente. autor.

Radar de Penetración de Tierra de Frecuencia Escalonada.

Un radar de onda continua de frecuencia escalonada (SFCW) de banda ultra ancha (UWB) que opera en el dominio de la frecuencia captura tanto la amplitud como la fase de las señales de retorno (Borrion et al., 2019).

En la frecuencia escalonada (SF) se envían pulsos de radar de diferentes frecuencias (generalmente las frecuencias de los pulsos consecutivos difieren en la misma cantidad, el paso

de frecuencia) y se miden los retornos. La principal ventaja del radar SF es el ancho de banda de RF instantáneo reducido, que está relacionado con el paso de frecuencia. Su resolución depende del ancho de banda total utilizada, que a su vez depende del número total de pulsos con diferentes frecuencias empleadas y del paso de frecuencia. Sin embargo, el radar SF requiere más tiempo para enviar todos esos pulsos, lo que resulta en un mayor tiempo de medición (Kafedziski, 2019).

Sequía, causas y consecuencias

Concepto de sequía.

La sequía es una condición climática grave que afecta a muchas partes del mundo y, de hecho, es el peligro natural más complejo. La severidad de la sequía a menudo se mide usando una combinación de factores, que incluyen temperatura, lluvia, viento, humedad, humedad del suelo y curso de los arroyos. Debido a que la sequía se extiende sobre amplias zonas, su evolución es lenta, tiene una dinámica compleja y carece de una definición universal, es difícil de monitorear (Jalili et al., 2014).

Causas.

Las sequías son causadas por la escasez de precipitaciones durante un largo período de tiempo. Las condiciones atmosféricas como el cambio climático, las temperaturas del océano, los cambios en la corriente en chorro y los cambios en el paisaje local contribuyen a la sequía.

Tipos de sequía.

La sequía a menudo se divide en tres tipos: meteorológica, agrícola e hidrológica. La sequía meteorológica se define como una situación en la que la precipitación normal en un área disminuye significativamente durante un período de tiempo.

Una sequía agrícola ocurre cuando el suelo no tiene suficiente humedad para permitir que un cultivo en particular se desarrolle en una de sus etapas de crecimiento. Dado que la cantidad de agua para cada cultivo es diferente y puede variar incluso durante el crecimiento de una misma planta, no es posible establecer umbrales válidos para la sequía agrícola para una sola área geográfica.

La sequía hidrológica se refiere a la falta de caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, lagos, etc.). Si hay un desfase entre la ausencia de lluvia o nieve y la disminución del caudal de los ríos o del nivel de los lagos y embalses, las mediciones hidrológicas no pueden utilizarse como indicador del inicio de la sequía, sino de su intensidad.

Consecuencia.

El agua es de vital importancia para el planeta y los seres humanos. Las consecuencias de las sequías son negativas y en algunos casos incluso devastadoras.

Estas son algunas de las consecuencias más comunes:

- Pérdida de producción agrícola y tierras para la ganadería, con la consecuente pérdida de ingresos y alimentos. Dado que ciertos alimentos se producen de manera deficiente, sus precios aumentan debido a la ley de la oferta y la demanda.
- Desnutrición, deshidratación y enfermedades.
- Hambruna por escasez de alimentos.
- Migración de seres humanos y especies animales.
- Degradación del hábitat.
- Pérdida de la biodiversidad, o lo que es equivalente, la reducción o incluso la extinción de especies vegetales y animales.

- Tormentas de polvo por desertificación y erosión.
- Inestabilidad global que puede conducir a conflictos y guerras por los recursos naturales

Herramientas de la industria 4.0

Concepto de herramientas de la industria 4.0.

El término Industria 4.0 debería implicar nada menos que una “cuarta revolución industrial”

Los líderes de la industria, especialmente de Alemania, donde nació el término “Industria 4.0” en 2011, son extremadamente optimistas y despiertan grandes expectativas para esta nueva “revolución” en la industria, probablemente con el objetivo tácito de dar respuesta a las enormes inversiones que realizan los nuevos cuatro "(Amazon, Google, Apple, Facebook) que están acelerando sus actividades para penetrar en nuevas industrias y arrebatarse una participación a un mercado desproporcionadamente grande". en comparación con el líder del mercado consolidado actual.

Uno de los pilares de la Industria 4.0 es el uso extensivo de Internet no solo como un canal rentable para conectar máquinas, dispositivos, sensores y personas, sino también como una oportunidad para crear nuevas funciones de productos y características en torno al uso de Internet. como fuente de información. En este sentido, el diagnóstico avanzado y el mantenimiento predictivo basados en la recopilación de datos de grandes cantidades de datos de sensores de múltiples ubicaciones y plantas reducirán significativamente los costos de mantenimiento, aumentarán la disponibilidad de la planta y crearán nuevos modelos comerciales basados en el uso.

Aplicaciones.

La industria 4.0 se implementa con la ayuda de tecnología avanzada. Big data, inteligencia artificial (IA), robótica, Internet de las cosas (IoT), computación en la nube e impresión 3D son las tecnologías más importantes que se utilizan para implementar con éxito la Industria 4.0.

Big Data y AI Analysis: Industry 4.0 recopila macrodatos de una variedad de fuentes, desde fábricas y dispositivos de Internet de las cosas (IoT) hasta sistemas ERP (Enterprise Resource Planning), CRM (Customer Relationship Management), aplicaciones meteorológicas y de tráfico.

Robots autónomos: Industria 4.0 presenta una nueva generación de robots autónomos. Los robots autónomos están programados para realizar tareas con una mínima intervención humana y son de gran tamaño y funcionalidad, desde drones para escanear inventario hasta robots móviles autónomos para operaciones de pick-and-place. Equipados con el último software, inteligencia artificial, sensores y visión artificial, estos robots pueden realizar tareas difíciles y delicadas y reconocer, analizar y reaccionar a la información recibida del entorno.

Internet de las cosas industrial (IIoT): los dos términos se utilizan a menudo como sinónimos porque la Internet de las cosas (IoT), especialmente la Internet de las cosas industrial, está en el corazón de la Industria 4.0. La mayoría de las cosas físicas en la Industria 4.0 (dispositivos, robots, máquinas, sistemas, productos) utilizan etiquetas y sensores RFID para proporcionar datos sobre el estado, el rendimiento o la ubicación. Esta tecnología permite a las empresas ejecutar sus cadenas de suministro de manera más fluida, diseñar y cambiar productos

más rápidamente, evitar el tiempo de inactividad de los equipos, rastrear las preferencias de los consumidores, rastrear productos e inventario, y más.

Computación en la nube: la computación en la nube es el "gran facilitador" de la Industria 4.0 y la transformación digital. La tecnología de nube actual va mucho más allá de la velocidad, la escalabilidad, el almacenamiento y la rentabilidad. Desde la inteligencia artificial y el aprendizaje automático hasta la Internet de las cosas, proporciona la base para la tecnología de vanguardia y permite a las empresas impulsar la innovación. Los datos que impulsan la tecnología de la Industria 4.0 están en la nube, y los sistemas ciberfísicos en el corazón de la Industria 4.0 utilizan la nube para la comunicación y la coordinación.

Fabricación aditiva / impresión 3D: la fabricación aditiva o la impresión 3D es otra tecnología clave que impulsa la Industria 4.0. Originalmente utilizada como una herramienta de creación rápida de prototipos, la impresión 3D ahora ofrece una amplia gama de aplicaciones, desde la personalización masiva hasta la fabricación distribuida. Por ejemplo, la impresión 3D guarda piezas y productos como archivos de construcción en un inventario virtual y los imprime según sea necesario, lo que reduce tanto las rutas como los costes de transporte.

Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y la combina con otra información para respaldar decisiones basadas en la volatilidad estimada de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola. La agricultura inteligente basada en IoT crea sistemas de monitoreo de cultivos que tienen como objetivo automatizar una serie de actividades agrícolas

importantes, como el monitoreo del crecimiento, los procedimientos de riego, la fertilización y la detección de enfermedades.

La automatización de eventos agrícolas basada en Internet de las cosas (IoT) puede transformar la industria agrícola de estática y manual a dinámica e inteligente, reduciendo la mano de obra, mejorando la producción y el rendimiento.

Propiedades eléctricas del suelo

Conductividad.

La conductividad eléctrica, influye significativamente, dado que de esta condición depende la velocidad de propagación de la honda emitida por el Radar de Penetración Terrestre (GPR).

Permitividad.

Permite saber cómo varía un campo eléctrico a su paso por un medio o material. Esta propiedad es característica de cada medio.

En los lugares de prospección es muy frecuenten contar con la presencia de piedras y arena, los cuales son materiales secos con alta densidad de moléculas, lo que implica que poseen menor espacio para albergar moléculas de aire o agua, obteniendo como resultado una permitividad relativa de menor tamaño, arrojando como resultado un alcance superior en la penetración del suelo.

Permeabilidad.

Permite determinar la capacidad de un material para dejar pasar a través de él los campos magnéticos.

Contenido de humedad.

La humedad del suelo es probablemente el factor que determina sus constantes eléctricas. Las mediciones de laboratorio han demostrado que el valor aumenta a medida que aumenta el contenido de humedad desde un valor bajo, y alcanza su punto máximo tan pronto como el contenido de humedad se acerca a los valores normales del suelo. A una profundidad de 1 m, la humedad del suelo en ciertas áreas parece ser significativamente constante durante todo el año y puede aumentar con la lluvia, pero el drenaje del suelo y la evaporación de la superficie generalmente hacen que la humedad vuelva a la normalidad inmediatamente después de que la lluvia ha cesado. Sin embargo, la humedad del suelo varía mucho de un lugar a otro, ya que las diferencias en la formación geológica generalmente mejoran el drenaje de un lugar a otro.

Temperatura.

Las mediciones en laboratorio de las características eléctricas del suelo han demostrado que, a bajas frecuencias, el coeficiente de temperatura de la conductividad es del orden del 3% por grado Celsius, mientras que el correspondiente a la permitividad es despreciable. En el punto de congelación se produce generalmente una gran disminución tanto de la permitividad como de la conductividad. Aunque estas variaciones son apreciables, se debe tener en cuenta que la gama de variación de la temperatura durante el año disminuye rápidamente con la profundidad, de manera tal que los efectos de la temperatura pueden ser importantes sólo en frecuencias elevadas, para las cuales la penetración de las ondas es pequeña, o cuando la tierra está helada hasta una profundidad considerable.

Penetración y dispersión de las ondas.

El grado en que las capas inferiores influyen en las características eléctricas efectivas depende de la profundidad de penetración de la energía radioeléctrica, que se define como la

profundidad a la cual la onda queda atenuada a $1/e$ (ó 37%) de su valor en la superficie. se muestra la profundidad de penetración en función de la frecuencia para diferentes tipos de terrenos y aguas. Si la profundidad de penetración es menor que el espesor de la capa, los estratos subyacentes tienen escasa influencia. Si es mucho mayor que el espesor de la capa superior, la propagación viene determinada por las características eléctricas de los estratos inferiores (Eléctricas et al., 1978).

En las frecuencias más bajas, excepto en el caso del agua de mar, es necesario considerar capas a una profundidad de 100 m o más. Esto es especialmente importante cuando la capa superior tiene baja conductividad y la energía puede penetrar fácilmente en la capa inferior. Por ejemplo, estos casos ocurren en regiones lacustres y oceánicas cubiertas de hielo.

La energía radioeléctrica recibida en un punto se transmite no solo por la ruta directa del transmisor, sino también por varias rutas indirectas distribuidas a ambos lados del transmisor. Por lo tanto, es necesario considerar las características eléctricas, no sólo en el propio trayecto, sino también en la zona cubierta por la dispersión lateral de la onda (Fabregat-Santiago et al., 1999).

Sector agrícola de La Guajira

Cultivos en La Guajira.

El departamento de La Guajira cuenta con suelos fértiles que favorecen su amplia oferta agropecuaria. Al mismo tiempo, dispone de una buena proporción de hectáreas sembradas y de uso adecuado del suelo, lo que se convierte en una importante fortaleza para su desarrollo agropecuario y rural. Esto se suma a un número importante de productos promisorios y a una amplia variedad de alternativas productivas agropecuarias para la comercialización.

Según un estudio de mercado de productos agropecuarios realizado por el ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, las principales alternativas productivas agropecuarias de La Guajira son, el aguacate, la ahuyama, el arroz de riego, el banano de exportación, el café, el coco, el frijol, el maíz tradicional, la malanga, el ñame, la palma de aceite, la patilla, el plátano, la yuca, el mango, los caprinos y ovinos, y la pesca y acuicultura (UPRA, 2020); los cuales se ven clasificados en la tabla 1. Por su lado, los productos con mayor número de hectáreas sembradas en áreas de aptitud para su desarrollo son: el maíz tecnificado en clima cálido en el semestre II; la palma africana y el maíz tecnificado en clima cálido en el semestre I; y la piña, el ají tabasco y la cebolla de bulbo en el semestre (Guajira, 2021).

Tabla 1*Oferta agrícola por región geográfica de La Guajira.*

Selección por área y producción regional			
Alternativas /Región	Alta	Media	Baja
1. Aguacate			X
2. Ahuyama	X	X	X
3. Arroz Riego		X	X
4. Banano exportación		X	
5. Café		X	X
6. Coco		X	
7. Fríjol	X	X	X
8. Maíz tradicional	X	X	X
9. Malanga		X	X
10. Ñame		X	
11. Palma de aceite		X	
12. Patilla	X		
13. Plátano		X	X
14. Yuca	X	X	X
15. Mango			X

Fuente. (Guajira, 2021).

Riego de los cultivos en La Guajira.

- **Distritos de riego**

El departamento de La Guajira cuenta con 16 distritos de riego, que cubren 1.273 hectáreas y benefician a 497 usuarios en los cultivos de cítricos, piña, patilla, papaya, mango y

maracuyá. Estos distritos son, Los Haticos, Los Pondores, Marocao, Pozo No. 4 y Zambrano en el municipio de San Juan del Cesar; Conejo, Marimondas y Quebrachal en Fonseca; Cabrerías y San Pedro en Barranca; Piña, y Parquezote en Las Jaguas del Pilar; Angostura en Hatonuevo; Dibulla en Dibulla; Matitas en Riohacha y Molino en El Molino. Las únicas fuentes superficiales permanentes de agua disponibles en la parte plana de La Guajira son las que nacen en la Sierra Nevada de Santa Marta, que surten los ríos Tapias y Jerez. La verdadera posibilidad para el desarrollo de cultivos comerciales de frutales en La Guajira es a través del megaproyecto Ranchería, que tiene una cobertura de 18.000 hectáreas, entre los municipios de Fonseca y Distracción (Tafur Reyes et al., 2006).

- **Disponibilidad de agua para riego.**

Las fuentes superficiales permanentes de agua casi en su totalidad son de corto desplazamiento en la zona plana, sin embargo, existe la posibilidad que sus caudales sean represados y utilizados para riego, siendo este el caso para las fuentes de aguas que nacen en la sierra Nevada de Santa Marta. En la actualidad se aprovecha para riego el recurso hídrico que ofrecen los ríos Tapias y Jerez. En el departamento de La Guajira las lagunas son pocas, entre las cuales se encuentran: Guarongoro, Carazúa, Soledad, Pájaro, Saraipa, Cuiza y Pachipachi, que en época de prolongados veranos se secan; de todas, la de Cuiza es de mayor importancia por extensión y gran volumen, la cual es utilizada durante todo el año de abrevadero y para uso doméstico (Tafur Reyes et al., 2006).

Condiciones de clima y suelo en La Guajira.

El clima.

En el departamento de La Guajira, el clima es preeminentemente seco y árido. La temperatura promedio es de 28 ° C y varía entre 12 ° C y 40 ° C excepto por la corta temporada

de lluvias. En octubre y noviembre, el viento del mar continúa soplando del noreste y la humedad aumenta.

Las Temperaturas medias anuales superan a los 24°C, en la Media y Alta Guajira y parcialmente en la Baja Guajira. Temperaturas inferiores a los 12°C se presentan en la Sierra Nevada de Santa Marta, estas constituyen un pequeño porcentaje del total del departamento, aproximadamente un 1% del área de La Guajira.

Las precipitaciones tienen un carácter bimodal, con un primer período en los meses de abril, mayo y junio, el segundo periodo es más típico principalmente en septiembre y octubre, este puede extenderse hacia noviembre e iniciar a finales del mes de agosto.

De igual modo, los dos períodos más secos se registran en los meses de junio y julio, otro en enero, febrero y marzo, con temperaturas medias de hasta 34.3°C en la región Subtropical y de 30°C en la Tropical.

Debido a las altas temperaturas, la evapotranspiración potencial excede a la precipitación, Por lo tanto, cuando la tierra se utilice para actividades agrícolas, aumentará la cantidad de agua necesaria para el riego.

El suelo.

Los suelos en el departamento de La Guajira están delimitados con base en las formas del relieve, de la siguiente manera:

Formaciones Litorales. Son suelos de origen marino, sedimentarios, poco evolucionados, mal drenados y con una cubierta vegetal delgada. El aprovechamiento para fines agropecuarios es nulo. Se originan diversos tipos de relieve: costas, llanuras fluvio-marinas y terrazas.

Formaciones aluviales y lacustres. Son áreas casi planas, ubicadas por debajo de los 100 metros de altitud y localizadas básicamente en la Media y Baja Guajira. Son suelos con buen

espesor, ricos en nutrientes, bien drenados y de texturas gruesas a medias. Los suelos de los valles de los ríos Cesar y Ranchería, principalmente, permiten un aprovechamiento continuo en pastos mejorados y cultivos como maíz, yuca y frutales y los suelos de la zona entre la costa y la Sierra Nevada de Santa Marta.

Formaciones de planicie eólica. Son depósitos de arenas eólicas que se localizan en la Media y Alta Guajira. Las texturas de estos suelos son gruesas y su estructura poco consistente. Su utilización es muy escasa.

Formaciones de planicie aluvial de piedemonte. Compuestas por suelos ligeramente evolucionados, se localiza en la Alta y Baja Guajira. Generalmente presentan problemas de salinidad y sodicidad lo cual determina una vegetación muy pobre. En la parte sur del departamento, a mayores alturas, presenta menos sales por lo que los suelos presentan mayor productividad haciéndolos propicios para el cultivo de pastos, maíz, sorgo, plátano, algodón y arroz.

Formaciones de colinas. Son suelos desarrollados a partir de materiales ígneos y metamórficos. La mayor parte se encuentran en la Alta Guajira en altitudes menores de 800 m, presentando poca evolución y textura gruesa. La vegetación predominante es espinosa rala.

Suelos de cordillera. Ubicados en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta y de la serranía del Perijá, entre 2.000 y 2.500 m de altitud. Existe gran variedad de estos suelos, dependiendo de los materiales, altitud y topografía. El uso predominante es el de pastos naturales, cultivos de café y plátano (ANEXO, 2016).

Metodología

Tipo de investigación

Para dar respuesta a la pregunta ¿Es posible apoyar al sector agrícola del departamento de La Guajira con una solución tecnológica que le facilite encontrar agua subterránea para el desarrollo de las actividades que comprende este sector en el departamento?, el proyecto fue abordado con un enfoque de investigación cuantitativo de carácter exploratorio.

En este trabajo, se propone una investigación cuantitativa, que según lo expuesto por (Sánchez Flores, 2019), en este tipo de investigaciones lo que normalmente se busca es medir las magnitudes de fenómenos, por medio de la utilización de técnicas y estadísticas para el análisis de los datos recogidos. Por consiguiente, dicha investigación va a permitir que se lleve a cabo muchas observaciones y se evalúe la naturaleza de los fenómenos que atañen a la problemática de la identificación del agua subterránea, que admita el desarrollo de suposiciones o ideas de los principales factores que afectan la misma, y que, a partir de los datos observados, poder demostrar cuales son los principales causas y aspectos involucrados en la prospección de agua subterránea. En cuanto al ámbito exploratorio se realizaron diferentes pruebas tales como, comprobación del funcionamiento del GPR, identificación de agua en un espacio controlado (laboratorio), prueba de vuelo de UAV para calibrar velocidad, altura y estabilidad e identificación de agua en un espacio abierto con GPR a bordo de UAV.

Además, se propone un nuevo modelo tecnológico para identificar agua subterránea en el sector agrícola del departamento de La Guajira, este modelo es distinto a los existentes, el cual se colocó a prueba con diferentes ensayos y pruebas.

Diseño metodológico

Las pruebas de funcionamiento con enfoque exploratorio desarrollado en este proyecto sirven para identificar a través de pruebas la información pertinente que permita analizar las problemáticas y las opciones tecnológicas que le sirvan al agricultor para mejorar la producción y el rendimiento de los cultivos en La Guajira a través de la prospección de agua subterránea.

Para esto, se establecieron las siguientes etapas:

- ✓ Análisis de las características del problema escogido
- ✓ Selección de las fuentes y temas que soportan la investigación
- ✓ Definición de las técnicas de recolección de información
- ✓ Validación de las técnicas de recolección de información,
- ✓ Realización de pruebas de las tecnologías y sistemas propuestos
- ✓ Evaluación de la información recolectada para respaldar la solución planteada
- ✓ Descripción de las tecnologías, el sistema propuesto y los resultados logrados.

Población y muestra

Población

La población seleccionada fue el corregimiento de Los Pondores, ya que en esa zona se encuentra la hacienda La Veguita, lugar donde se realizó la recolección de los datos con el sistema IoT con UAV y GPR para el control de las variables medioambientales.

Se encuestó a dieciocho (18) agricultores que trabajaban en seis (6) granjas cercanas mediante cuestionarios.

Se realizó una encuesta por medio de un cuestionario a dieciocho (18) agricultores que estaban trabajando en seis (6) fincas cercanas, todas son fincas con cultivos a cielo abierto, no tecnificadas y algunas poseen un pozo de agua como única fuente de para regar sus cultivos.

La información obtenida con relación a la población fue dada por los agricultores del corregimiento de Los Ponedores, municipio de San Juan del Cesar.

Muestra

Por la cantidad de personas que componen la población es pequeña, se decidió aplicar esta herramienta a todos, por lo que la muestra es toda la población.

Técnicas e instrumentos de recolección de muestras

Instrumento de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos que se emplearon: la primera es la observación directa; la entrevista, la encuesta aplicada y la revisión documental a manera de obtención de datos e información para el diseño y puesta en funcionamiento de los equipos tecnológicos necesarios. Estos instrumentos satisfacen el objetivo de obtención de datos necesarios para esta investigación.

Observación directa

Mediante la observación directa se realizan diversas visitas y exploraciones en las zonas rurales del municipio de San Juan del Cesar; mayormente en el corregimiento de Los Ponedores a fin de obtener un panorama amplio y real de las condiciones, necesidades y dificultades presentes.

La observación se realiza en diversas épocas (lluviosa y de sequía) para obtener una información más certera de la realidad que coexiste en esta región.

Visita a las áreas de cultivos para observar y conocer los detalles de la utilización y manipulación del agua y las características del suelo y las condiciones climáticas del sector.

Por medio de dicha observación se logra delimitar la problemática, iniciar y plantear soluciones a través de la ejecución del presente proyecto.

Aplicación de instrumentos

Entrevista aplicada a los agricultores del corregimiento de Los Ponedores; del municipio de San Juan del Cesar, donde se encuentra la mayor concentración de predios con presencia de agua subterránea.

La entrevista se orientó a conocer la problemática presentada en el proceso de identificación del agua subterránea.

Las preguntas del cuestionario encuesta se diseñaron con el fin de conocer más detalles sobre las características del terreno, tipo de vegetación presente, uso del agua, las variables ambientales y los métodos empíricos en la identificación del agua subterránea. Todo esto con el objetivo de conocer los procesos que se vienen llevando el sector agrícola para el cultivo, sin la intervención de herramientas tecnológica.

Las respuestas obtenidas en entrevista y encuesta permiten una visión global de la problemática y la posible solución por medio de la ejecución del proyecto.

Revisión documental

La revisión documental del proyecto Sistema IoT con UAV y GPR para identificar zonas con aguas subterráneas se basó en:

La consulta de bases de datos científicas adecuadas como EBSCO, SCIELO, DIALNET

La revisión de literatura científica se realizó para identificar publicaciones que abordaran el tema de las aguas subterráneas, el uso de UAV y GPR para su detección, así como el estado del arte.

La consulta de bases de datos se realizó para identificar proyectos de investigación similares al presente estudio.

La información obtenida de la revisión documental también permitió identificar las principales características de las aguas subterráneas en el área de estudio.

La información obtenida de la revisión documental permitió identificar las tecnologías más apropiadas para la identificación de zonas con aguas subterráneas.

Se realizó una selección y recolección extensa del material útil para el desarrollo del estado del arte del tema de investigación propuesto, que incluye métodos y técnicas de prospección de agua subterránea mediante GPR y UAV.

Revisión, clasificación y separación del material más importante de los que no son necesarios, para ser implementados en el diseño de sistema de rastreo de agua subterránea IoT con GPR y UAV, de acuerdo con las variables de profundidad máxima de penetración, tecnologías de hardware necesarias.

Organización y comparación del material seleccionado para obtener información textual que permitan realizar citas y referencias sobre el sistema de rastreo de agua subterránea IoT con GPR y UAV con el objetivo de sustentar teorías e interpretaciones.

Actividades para alcanzar los objetivos específicos

Como parte de la búsqueda de información documentada relacionada con la realización de este estudio, y desarrollar el estado del arte que generen aportes pertinentes al diseño y ejecución del proyecto con respecto al control de las variables medioambientales para la identificación de agua subterránea con tecnologías como Radar de Penetración de Tierra (GPR).

Se realizó una profunda revisión en las bases de datos científicas adecuadas como EBSCO, SCIELO, DIALNET entre otras más, para justificar el motivo de escasez del recurso hídrico y las principales fuentes hídricas que abastecen el sector agrícola del departamento de La Guajira; ya que debido a las fuertes sequía presentan pérdidas en sus cultivos.

Para la selección de los artículos y estudios similares válidos como fuente de información para esta investigación, se tuvo en cuenta que su realización y publicación no superara los 5 años, que dichos artículos estén relacionados con la temática tratada en la investigación.

Además, se ha velado por que la existencia de palabras claves y relacionadas en las diferentes fuentes encontradas, analizadas y tenidas en cuenta se ajuste a las comprendidas en este proyecto de investigación con el fin de lograr el mayor aprovechamiento posible.

Al consultar y analizar las diferentes fuentes (Artículos, estudios, proyectos) se ha logrado obtener información importante y fundamental para el proyecto como las que se describen a continuación.

La implementación de este tipo de tecnología en el sector agropecuario del departamento de La Guajira es nula; la mayoría de los agricultores no poseen los recursos o no conocen que este tipo de tecnología le permite ayudar en el aprovechamiento del agua subterránea para sus cultivos.

Luego de conocer la necesidad que afronta el sector agrícola por la falta de agua debido a la sequía, se debe analizar el tipo de terreno en la cual se desarrolla dicha actividad agrícola, por lo tanto, se deben tener en cuenta las condiciones dieléctricas del suelo; específicamente la conductividad, la permitividad y la permeabilidad.

También es importante resaltar que los suelos en el departamento de La Guajira están delimitados con base en las formas del relieve, de la siguiente manera: formaciones litorales, formaciones de planicie eólica ,formaciones de planicie aluvial de piedemonte, formaciones de colinas, suelos de cordillera y por ultimo formaciones aluviales y lacustres, las cuales son áreas casi planas, ubicadas por debajo de los 100 metros de altitud y localizadas básicamente en la Media y Baja Guajira y son los suelos que predominan en el área donde se encuentra ubicada nuestra población.

Tras analizar las condiciones dieléctricas que suelo y por supuestos tener identificada su composición que afectan en la búsqueda de identificación de agua subterránea, se diseña la solución técnica a nivel hardware y software, teniendo en cuenta las variables ambientales seleccionadas para sistema IoT que permita identificar de manera remota la presencia de agua subterránea, a través de un Radar de Penetración de Tierra (GPR) a bordo de un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV). La información recolectada es enviada por un sistema de comunicación y de telemetría en tierra para luego ser procesados y poder diseñar el respectivo radiograma, que básicamente como una radiografía del suelo en el cuales se verían el comportamiento de las ondas electromagnéticas a los diferentes elementos bajo la tierra incluyendo el agua subterránea que es nuestro objetivo.

Estas condiciones dieléctricas alteran significativamente el desempeño de GPR en la prospección de aguas subterráneas.

El sistema IoT, que permite la identificación de agua subterránea por medio del GPR a bordo del UAV para el aprovechamiento del sector agrícola del departamento de La Guajira, fue elaborado un sistema de prueba para la evaluación de la solución tecnológica diseñada, en base a

las variables medioambientales de los cultivos ubicados en el corregimiento de Los Ponderos del municipio de San Juan del Cesar. Este sistema se compone de un GPR y se adopta la técnica SFCW debido a sus bajos requisitos de hardware. Aunque la velocidad de operación es más lenta que la velocidad de otros métodos UWB, SFCW tiene varios activos importantes. En primer lugar, aprovecha los dispositivos de ancho de banda instantáneo estrecho y es menos costoso

Para diseñar este GPR SFCW se emplearon dos hackRF acompañados de dos antenas que trabajan a una frecuencia de 100 MHz y que están conectadas a un Raspberry Pi 3 y que en su interior ejecuta el Software GNU Radio que es el encargado de permitir crear toda la programación gracias a un sistema de programación mediante bloques.

El sistema IoT, sugerido en este estudio, se basan en los GPR convencionales los cuales realizan el envío de ondas electromagnéticas al subsuelo y analizar la respuesta de la dispersión heterogeneidades. La imagen inteligible debe ser el último producto de este procedimiento. Una interpretación decente es alcanzable sólo después de un procesamiento apropiado debido a la complejidad del entorno y la fuerte influencia el efecto de acoplamiento. Este mismo proceso se ha implementado en nuestro sistema IoT permitiendo tener una interpretación de envío y recepción de un pulso del modelo SFCW.

Para garantizar el funcionamiento correcto del Sistema IoT es importante someterlo a diversas pruebas de aceptación y ajustes con el propósito de analizar el rendimiento del radar para detectar el agua debajo y fuera de la superficie terrestre. Una vez que se verifique el correcto funcionamiento del radar, se realizara las primeras pruebas del GPR a bordo del UAV

Todas estas pruebas se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones técnica al momento de realizar las lecturas.

Inicialmente se dispone de una mesa con todos los elementos involucrados en el funcionamiento del GPR, principalmente las antenas TX y RX. Dichas antenas se ubican sobre la excavación preparada para realizar las lecturas del GPR en busca de los objetos enterrados los cuales se encuentra a una distancia de 25-50 Cm. Se pudo obtener lecturas de manera satisfactoria las cuales fueron procesadas mediante el software MatLab para diseñar el Scan A.

Por último, se realizó la participación en los diferentes eventos de difusión del conocimiento de los cuales se puede mencionar la participación en el Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2020 (EIEI ACOFI 2020), resultando como ganador de la categoría Avances de Investigación, de los Premios ACOFI 2020 y en el ámbito internacional en los Premios de Investigación de América Latina de Google (LARA) en su versión 2020 y 2021, lamentablemente el proyecto de investigación no fue recomendada para financiamiento.

Presupuesto

Para el desarrollo de un sistema IoT que permita la identificación de agua subterránea mediante GPR a bordo de un UAV se requirió la adquisición de los siguientes elementos agrupados por **Sistema UAV** (Tabla 1), **Sistema GPR** (Tabla2) y consolidado total del **Sistema IoT** (Tabla 3)

*Presupuesto del UAV***Tabla 2***Gastos iniciales del sistema UAV*

	Elementos	Marca	Cantidad	Valor (Col)
1	Pixhawk 4 + GPS	Holybro	1	\$ 570.000,00
2	Motores 4108	Tarot RC	6	\$ 540.000,00
3	Tarot 650	Tarot RC	1	\$ 460.000,00
4	Hélice plegable Kit CW/CCW 1555	Tarot RC	1	\$ 350.000,00
5	ESC 40A	SkyWalker	6	\$ 310.000,00
6	Radio + receptor	Flysky	1	\$ 285.000,00
7	Batería Lipo 10000mAh 6s	Tattu	1	\$ 860.000,00
	Total			\$ 3.375.000,00

Fuente. Autor.

*Presupuesto del GPR***Tabla 3***Gastos iniciales del sistema GPR*

Id	Elementos	Marca	Cantidad	Valor (Col)
1	Hack RF ONE	Great Scott	2	\$ 640.000,00
2	Antenas Cuasi-Yagi	N/A	2	\$ 320.000,00
3	SMA macho a SMA hembra Jack conector	N/A	6	\$ 30.000,00
4	Triple T SMA hembra	N/A	2	\$ 15.000,00
5	Cable de RF coaxial flexible RG174	N/A	4	\$ 30.000,00
6	Conector de cable espiral SMA macho a SMA	N/A	6	\$ 25.000,00
7	STM32F103C8T6 ARM + st-link V2 Mini STM8	N/A	1	\$ 50.000,00
8	Raspberry Pi 3	Raspberry	1	\$ 260.000,00
Total				\$ 1.370.000,00

Fuente. Autor.

Costos totales del proyecto

Tabla 4

Gastos totales del sistema IoT.

Id	Elementos	Marca	Cantidad	Valor (Col)
1	Presupuesto total del UAV	N/A	1	\$ 3.375.000,00
2	Presupuesto total del GPR	N/A	1	\$ 1.370.000,00
Total				\$ 4.745.000,00

Fuente. Autor.

Estos gastos se componen de gastos iniciales y gastos de funcionamiento:

- Iniciales: costos de creación, adquisición, instalación, de pruebas y de documentación.
- Funcionamiento: técnico de configuración, mantenimiento, transmisión de datos, reparaciones, eventualmente sustitución de partes y consumo de electricidad.

Análisis de resultados

Para este apartado es importante conocer las diferentes variables, factores y propiedades que intervienen en la detección de agua subterránea, y que afecta principalmente al sistema GPR propuesto.

Variables a sensar o tener en cuenta para la detección de agua.

Los suelos exhiben una variedad de condiciones dieléctricas que alteran significativamente el desempeño de GPR en la prospección de aguas subterráneas. Las condiciones dieléctricas específicas son conductividad, permitividad y permeabilidad.

Análisis del test aplicado por grupos de interés

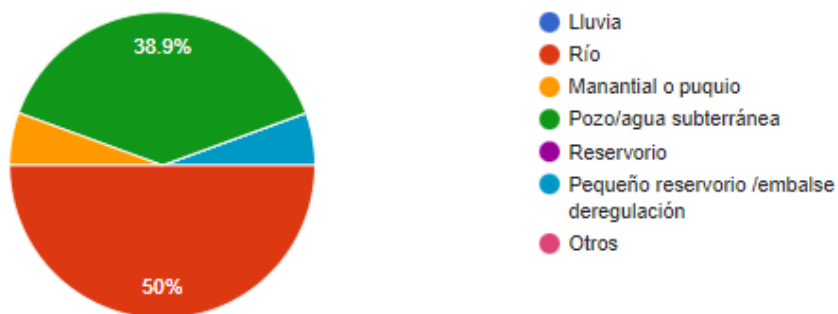
A continuación, se muestra los resultados en la de la encuesta realizada a los agricultores del corregimiento de Los Ponedros para conocer el uso, disponibilidad y manejo que le brindan los agricultores al recurso hídrico y por su puesto el impacto que causa la falta de este.

Figura 5

Procedencia del agua para regio.

1 - ¿De dónde procede el agua para regar el cultivo?

18 respuestas



Fuente. Autor.

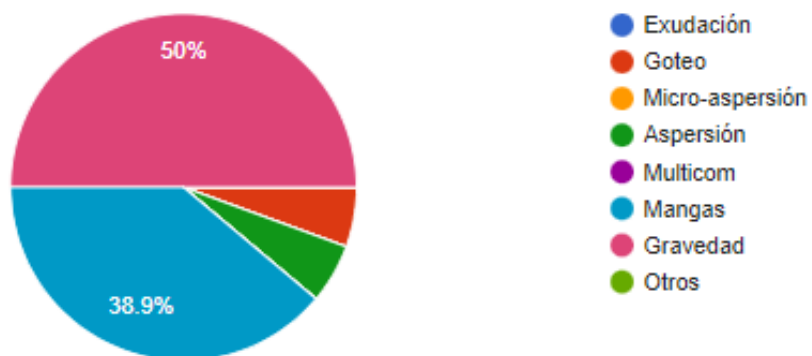
En la figura 5 se evidencia que el 50% de los agricultores obtiene su fuente de agua de los ríos, afectándoles negativamente debido a que esta fuente hídrica es más escasa, como lo evidencia en la figura 7, ya que el 77% de los agricultores se ven afectados por la escasez del agua.

Figura 6

Sistema de riego utilizado.

2 - ¿Qué sistema de riego utilizó?

18 respuestas



Fuente. Autor.

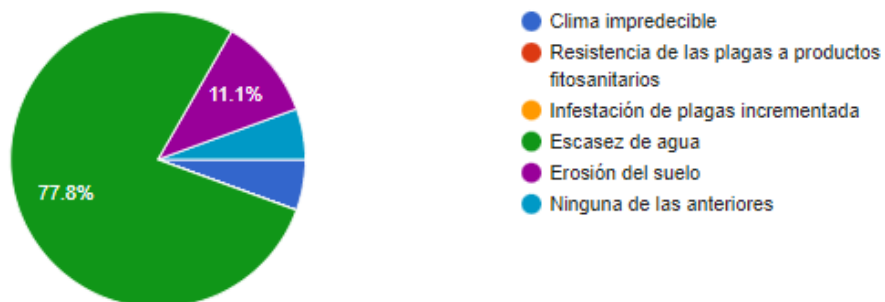
Es importante resaltar el sistema de riego de los cultivos es ineficiente, como se ve evidenciado en la figura 6, ya que el sistema de riego por gravedad, realmente no se realiza un aprovechamiento del recurso hídrico, debido a que en su proceso de riego gran parte de agua queda en el camino. Solo un 38% realmente si está aprovechando ese recurso hídrico de una manera más eficiente.

Figura 7

Situaciones relacionadas con el medio ambiente.

3 - ¿Actualmente sufres alguna de las siguientes situaciones relacionadas con el medioambiente?

18 respuestas



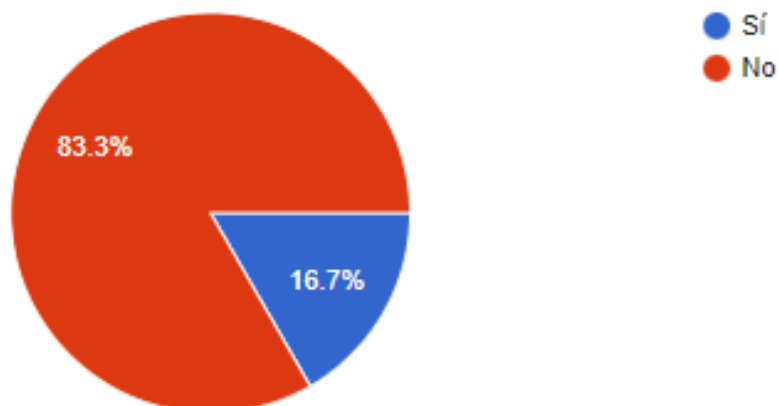
Fuente. Autor.

Figura 8

Disponibilidad de agua en el sector agropecuario del corregimiento de Los Ponedores.

4 - Cuenta usted con la disponibilidad de agua las 24 horas?

18 respuestas



Fuente. Autor.

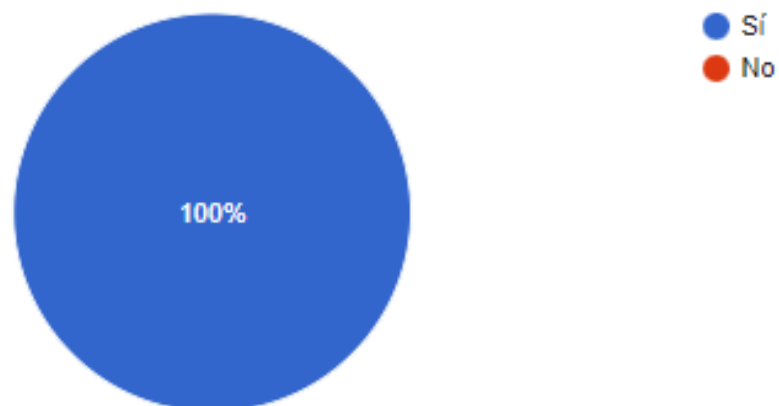
Referente al tema de la disponibilidad del agua como se observa en la figura 8, los agricultores no cuentan con este privilegio, lo que deja en evidencia la necesidad de una fuente hídrica permanente para el riego de sus cultivos y mejorar la producción de los mismo. Los agricultores poseen una preocupación enorme, debido al resultado reflejado en la figura 9; el 100% de los encuestado está de acuerdo que la escasez y la disponibilidad del agua a futuro empeorara, agravando a un más la problemática del sector agrícola del corregimiento de Los Ponedores.

Figura 9

Acceso al agua en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pandores.

5 - Considera que el acceso al agua será peor en el futuro?

18 respuestas



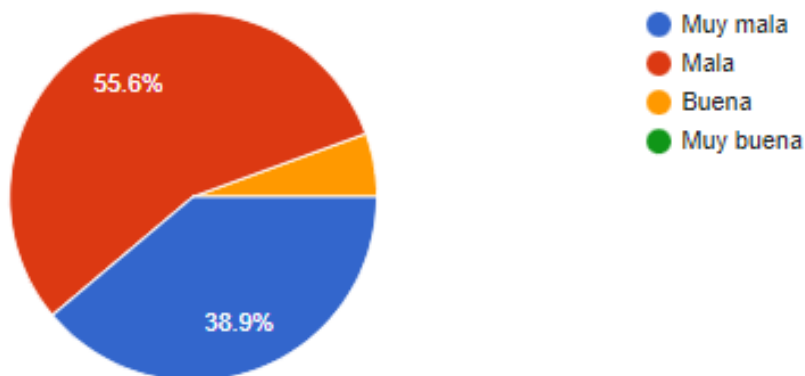
Nota. Elaboración propia.

Figura 10

Perspectiva futura del sector agropecuario del corregimiento de Los Pandores.

6 - ¿Cuál es su perspectiva sobre el futuro de la agricultura de la región?

18 respuestas



Fuente. Autor.

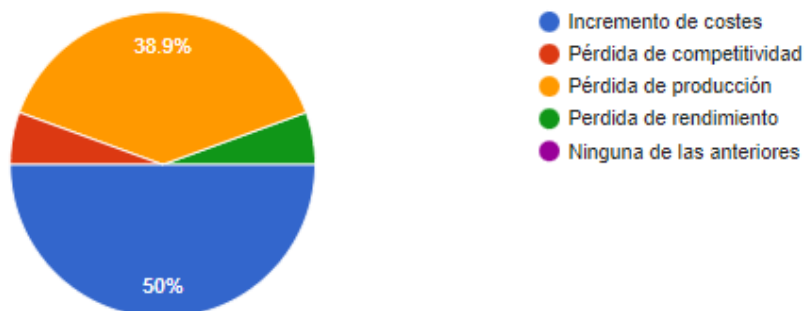
Los agricultores manifiestan que su actividad económica está en riesgo, como se evidencia en la figura 10, debido a que el 94.5% consideran que es mala el futuro de la agricultura de la región.

Figura 11

Condiciones futuras del sector agropecuario del corregimiento de Los Ponedores.

7 - ¿Cuáles crees que pueden ser las consecuencias futuras que afecten los cultivos por la escasez de agua?

18 respuestas



Fuente. Autor.

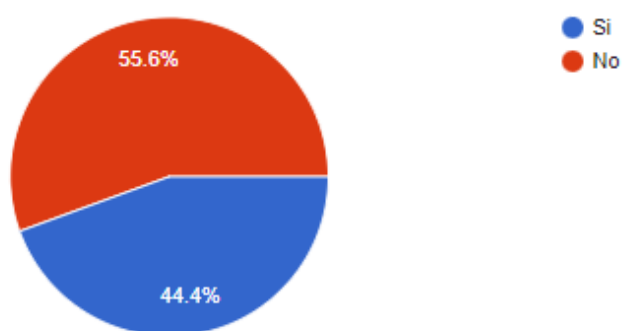
Se evidencia que la escasez del recurso hídrico en la actividad agrícola tiene como consecuencias negativas, como lo arroja el resultado de la figura 11 en la cual predomina el incremento de los costos y la pérdida de producción en la actividad agrícola.

Figura 12

Existencia de agua subterránea en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pandores.

8 - ¿Sabe si el terreno donde desarrolla su actividad agrícola posee agua subterránea?

18 respuestas



Fuente. Autor.

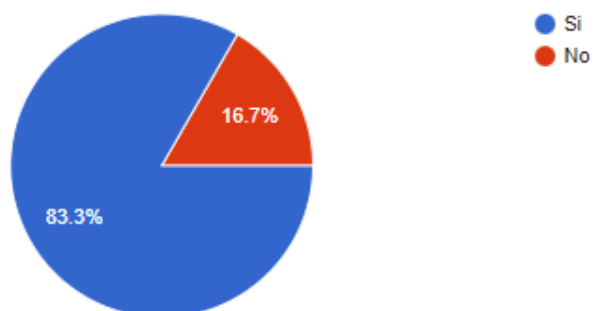
Algo muy positivo a resaltar de la figura 12 es que más del 44% de las tierras donde se desarrollan estas actividades agrícolas poseen agua subterránea, el otro 55% desconoce si la tierra posee este recurso hídrico y que a su vez se pueda beneficiar del mismo en su actividad agrícola.

Figura 13

Adopción de la tecnología para identificar agua subterránea en el sector agropecuario del corregimiento de Los Pandores.

9 - ¿Ha considerado la implementación de tecnologías para identificar agua subterránea en su actividad agrícola?

18 respuestas



Fuente. Autor.

Figura 14

Impacto de tecnología para para mejorar la producción del sector agropecuario del corregimiento de Los Pandores.

10 - ¿Cree usted que la adopción de tecnologías para identificar agua subterránea permitirán mejorar la producción de los cultivos?

18 respuestas



Fuente. Autor.

Como análisis final que se aprecia en la figura 13 y 14 que los agricultores están dispuesto a buscar una alternativa de solución a la falta del recurso hídrico, permitiendo que la tecnología brinde la posibilidad de mejorar la productividad de sus cultivos y de su calidad de vida.

Análisis del sistema

Requerimientos funcionales

Debido a la problemática que afronta el sector agrícola respecto a la escasez de agua y al desaprovechamiento del agua subterránea por falta de información de su ubicación para explotar dicho recurso, se plantea un análisis a los distintos métodos de prospección geofísicas que se adapte a las necesidades planteadas.

El sistema de detección de agua subterránea no solo debe estar enfocado en medir la profundidad, sino que permita la posibilidad de reconfigurarse para adaptarse a las distintas condiciones que presente el terreno analizado.

La elección del método de prospección geofísica se debe orientar directamente en que el sistema de detección de agua subterránea se acople a un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), el cual presenta unas especificaciones limitantes como lo son la cantidad de peso, dimensiones, velocidad de movimiento y autonomía.

Debe poseer un sistema de extracción de los resultados de una forma precisa, fácil y rápida mediante un computador.

Tabla 5*Resumen de los métodos de prospección geofísica.*

métodos	Principios	parámetros Obtenidos
Geoelectrico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena-arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación.
Sísmica de refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento.
Sísmica de reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zonas de fallas, cartografías de estructuras de recubrimiento.
Sísmica de reflexión	Densidad	Relleno-basamento.
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Geometría del acuífero (profundidad

		de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral.
Electromagnetismo	Conductividad o resistividad eléctrica y magnetismo	Localización de las áreas más conductivas, detección de fracturas que no afloran en superficie.

Fuente. Autor.

Por lo que respecta a los métodos geofísico expuesto en la tabla 5, se realiza un análisis para descartar los métodos que no cumplen con las necesidades expuestas, por lo tanto, se escoge el método de electromagnetismo (EM) el cual funciona por medio de ondas electromagnéticas y es el método que mejor se adapta a las necesidades planteadas debido a gran resolución y versatilidad en la toma de datos, lo que permite reconocer extensas áreas de terreno en un corto espacio de tiempo (GRIJALVA MONTOYA & GRIJALVA MONTOYA, 2014).

El método de electromagnetismo está compuesto por métodos de detección microondas, rayos X, infrarrojos y radar de penetración de tierra (GPR). Para la ejecución de este proyecto se basó principalmente en el GPR, ya que está especializado en la exploración no destructiva orientada al estudio del subsuelo y que se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia para propagarse a través de medios poco conductivos (Arias, 2017). Los sistemas GPR tradicionales tienden a ser de dimensiones y peso elevado, pero esto no es limitante para ser acoplado en un UAV, ya que ser adaptado por medio de hardware y software que replican esta tecnología en un dispositivo más compacto que el GPR tradicional, el cual es utilizado en

diferentes condiciones y tipos de medición, los que ha generado disponibilidad de información para la correcta implementación (Jol, 2008).

Requerimientos no funcionales.

El sistema IoT deberá estar disponible los 365 días del año, las 24 horas del día.

Pruebas de carga: Una prueba de estrés consiste en simular el estrés del sistema IoT y medir los resultados. Estas pruebas se realizan en condiciones de sobrecarga esperadas (demanda máxima).

Pruebas de estrés: este tipo de prueba requiere una atención especial a la disponibilidad y el manejo de errores en caso de sobrecarga para determinar la estabilidad de su sistema IoT.

Diseño gráfico del prototipo o solución.

Figura 15

Diseño de arquitectura del sistema IoT



Fuente. Autor.

En la figura 15, se evidencia los principales subsistemas que componen al prototipo IoT.

Estos subsistemas son:

- ✓ El subsistema del controlador de vuelo, incluido el propio controlador de vuelo del UAV y los sistemas de posicionamiento comunes a bordo de los UAV.
- ✓ El subsistema de comunicaciones, que comprende un enlace de radiocontrol para recibir datos del piloto y un enlace de datos para intercambiar datos (por ejemplo, las mediciones de radar) con la estación de control en tierra.
- ✓ El subsistema de radar, que es un radar de banda ultraancha (UWB) de secuencia M y dos antenas Vivaldi;
- ✓ El sistema de posicionamiento mejorado, que consta de un telémetro láser (para estimar la distancia al suelo) y un sistema GPS.

Elementos de hardware necesarios a nivel general para el prototipo.

Antenas, es un dispositivo normalmente conductor metálico, diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. En la tabla 6 se compara las antenas a utilizar en el sistema IoT.

Tabla 6

Cuadro comparativo de las posibles antenas a utilizar en el sistema IoT.

	Antena Lp0965	SAW-500	Antena Periódica
Frequency range	850 MHz a 6,5 GHz	100 to 500 MHz	800MHz-7GHz
Polarization	vertical	vertical/horizontal	vertical
Radiation pattern	Direccional	omnidireccional/fig.-8	Direccional
Nominal impedance	30 ohm	50 ohm	20 ohm

Fuente. Autor.

Computadores de placa simple (SBC), es un computador completo en la que una placa de circuito único comprende la memoria, la entrada/salida, un microprocesador y todas las demás características necesarias. Sin embargo, a diferencia de un computador, no depende de expansiones para otras funciones. Un PC de placa única reduce el costo global del sistema, ya que se reduce el número de placas de circuito, conectores y circuitos conductores. La tabla 7 se compone de una comparativa de los Computadores de placa simple (SBC) a utilizar en el sistema IoT.

Tabla 7

Cuadro comparativo de los posibles Computadores de placa simple (SBC), a utilizar en el sistema IoT.

	Raspberry Pi 3	Raspberry Pi 3	Pine A64+
CPU	Intel Core m3-7y30	Qualcom 1.2MHz Broadcom BCM2837 64bit	ARM Cortex-A53 a 1,2 GHz
RAM	8GB LPDDR3	1 GB DDR3	2 GB DDR3
Almacenamiento	EMMC de 64 GB	2 – 128 GB - MicroSD	
puertos USB	3x USB 3.0 Tipo-A	4 puertos USB 2.0	2 x USB 2.0
ConexiónWi Fi -	WIFI 802.11 AC,	BCM43438 LAN	802.11 b/g/n
Ethernet	2.4G & 5G	inalámbrica	
Sistema Operativo	Windows / Linux	Linux Debian	Linux, Symbian, Windows

Tamaño	11.5cm x 7.8cm x	9 cm x 6 cm x 2 cm	13 x 8 x 1.5 cm
	1.4 cm		

Fuente. Autor.

Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), hace referencia a una aeronave que vuela sin tripulación, la cual ejerce su función remotamente. En la tabla 8 se evidencia los diferentes Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) a utilizar en el sistema IoT.

Tabla 8

Cuadro comparativo de los posibles Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), a utilizar en el sistema IoT.

	Matrice 600	Spreading Wings S900	Tarot 650
Para controlador de vuelo	A3 Pro	A2	Pixhawk 4
KV motor	400 rpm / V	400 rpm / V	320 rpm / V
ESC	40A	40A	40A
Distancia entre ejes diagonal	1133 milímetros	900 mm	
Batería de energía	LiPo (6S 4200mAh) X6	LiPo (6S , 10000mAh ~ 15000mAh , 15C (Min))	LiPo (6S 5200mAh 55C
Hélice plegable	2170R	15 × 5.2 pulgadas	15 × 5.5 pulgadas
Tiempo de vuelo	18 min (a 4200 mAh y 5,5 kg de peso al despegue	18 min (a 12000 mAh y 6,8 kg de peso al despegue	8 min (a 5200 mAh y 6,8 kg de peso al despegue
Peso al despegar	15,5 kg	4.7Kg ~ 8.2 kg	2.7Kg ~ 8.2 kg
Comunicación	De 920,6 MHz a 928 MHz (Japón);	De 920,6 MHz a 928 MHz (Japón); 5,725	De 920,6 MHz a 928 MHz (Japón); 5,725

	5,725 GHz a 5,825	GHz a 5,825 GHz;	GHz a 5,825 GHz;
	GHz; 2.400 GHz a	2.400 GHz a 2.483	2.400 GHz a 2.483
	2.483 GHz	GHz	GHz
Tipo de comunicación	Radio contro, Wifi	Radio contro, Wifi	Radio contro, Telemetría
GPS	D-RTK GNSS	GNSS X3	NEO-M8N

Fuente. Autor.

Sistema de comunicación y telemetría, permite medir y rastrear remotamente magnitudes físicas para enviar información y datos al operador del sistema inalámbricamente. La primera forma de transmisión de información era por cable, pero en la actualidad las ondas de radio y la comunicación satelital hacen posible la telemetría moderna. A continuación, encontramos la tabla 9, que nos permite conocer más en detalle los sistemas de comunicación y telemetría a utilizar en el sistema IoT.

Tabla 9

Cuadro comparativo de los posibles Sistema de comunicación y telemetría a utilizar en el sistema IoT.

	Sistema 3DR	Radio telemetría	ERC
	Telemetría	transceptor V3	RadioTelemetry Kit
Rango frecuencia	915MHz.	433MHz / 915MHz.	433Mhz
Potencia	100mW	500mW	500mW
Cobertura	1,6km	8 km	5 km
Controladoras	MWC / APM / PX4	MWC / APM / PX4 /	Ardupilot Mega /
compatibles	/ Pixhawk	Pixhawk	PixHawk

Fuente. Autor.

Elementos de software para el prototipo.

Radio definida por Software (SDR), es un sistema de radiocomunicaciones donde varios de los componentes típicamente implementados en hardware (mezcladores, filtros, moduladores/demoduladores, detectores, etc) son implementados en software, utilizando una computadora y otros dispositivos de computación embebidos. Se propone tres SDR diferente para escoger uno que cumpla con las variables que permitan el desarrollo de este sistema. En la tabla 10 encontramos los posibles tarjeros SDR a utilizar en el sistema IoT.

Tabla 10

Cuadro comparativo de los posibles tarjeros SDR a utilizar en el sistema IoT.

	USRP B210	BladeRF X40	HackRF
Bandwidth [MHz]	width [MHz] 30/56	20	40
Freq. range [MHz]	70 - 6000	350 - 3800	1 - 6000
DAC/ADC res. [bit]	12	12	8
Tx max. power [dBm]	10	6	15
Mode	2 x duplex	duplex	half-duplex

Fuente. Autor.

Software SDR, es una herramienta de desarrollo libre y abierta que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software. Puede utilizarse con hardware de RF de bajo costo para crear radios definidas por software, o sin hardware en un ambiente de simulación. La comparativa de los tipos de software SDR a utilizar en el sistema IoT se encuentra presente en la tabla 11.

Tabla 11

Cuadro comparativo de los posibles Software SDR a utilizar en el sistema IoT.

	REDHAWK	GNU Radio	LuaRad
Tipo de programación	Bloques visuales	Bloques visuales	Bloques visuales
Licencia	GNU Lesser General Public License (LGPL)	GNU General Public License	GNU General Public License
Programado en	C++ Python	C++ Python	LUA
Sistema Operativo	CentOS	Windows, Lunix, Mac	Linux / MacOS

Fuente. Autor.

Software para misión de vuelo UAV, es una estación de control terrestre para Plane, Copter, Rover y UAV; se puede utilizar como una utilidad de configuración o como un complemento de control dinámico para su vehículo autónomo. A continuación, encontramos la tabla 12 con un consolidado de los diferentes Software para misión de vuelo UAV a utilizar en el sistema IoT.

Tabla 12

Cuadro comparativo de los posibles Software para misión de vuelo UAV a utilizar en el sistema IoT.

	UGCS:	Mission Planner	Q Ground Control
Pilotos automáticos	Pixhawk	APM, Pixhawk	PX4 Pro, ArduPilot
Dispositivo	UAV	UAV, Rover, Plano, Helicóptero.	Multirrotores, ala fija, VTOL.
Sistema Operativo	Windows, MacOS, Linux	Windows	Windows, MacOS, Linux, iOS y Android

Fuente. Autor.

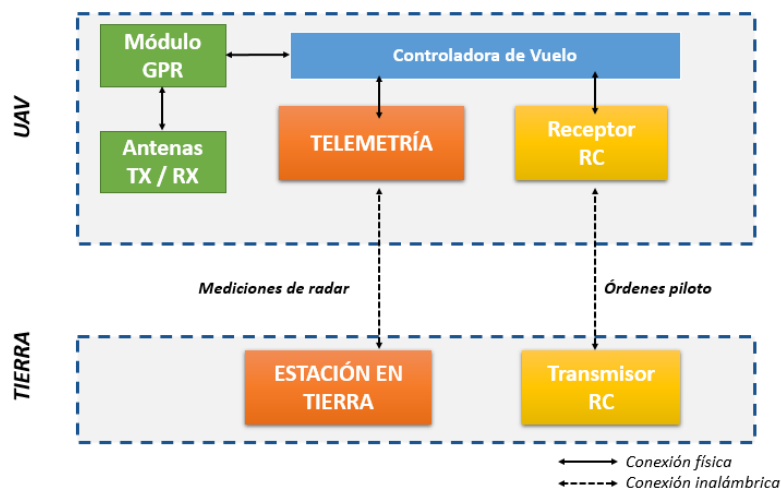
Diseño final propuesto.

Se diseñó un sistema IoT, cuyo funcionamiento consiste en la identificación de agua subterránea por medio de un dron autónomo equipado con un sistema GPR basado en SDR de diseño personalizado para poder adaptarse a los distintos escenarios de estudio. Dicho sistema IoT se compone principalmente por el sistema GPR (placa HackRF One, antenas RX y TX y conectores SMA) y el hardware a bordo del dron (procesadores de alto y bajo nivel, Módulo de comunicación, sensores IMU, GPS y LIDAR) representado en el esquema de la **figura 16**. Un aspecto clave para lograr una operación confiable de GPR se basa en la navegación precisa del dron, que debe volar constantemente a pesar de las perturbaciones del viento. Además, el dron debe volar a una altitud muy baja para permitir que las señales emitidas por el GPR irradien adecuadamente el subsuelo (aproximadamente 50 cm sobre el suelo). En consecuencia, el controlador de navegación debe tener en cuenta el efecto suelo.

El sistema propuesto puede seguir de forma autónoma una ruta de vuelo predefinida sobre el área de interés a prospectar, recopilando y georreferenciando las mediciones del radar. Estas mediciones se envían a una estación de control terrestre, donde se procesan para obtener como resultado un Radargrama, las cuales son representaciones en perfil de las líneas con georradar levantadas sobre el terreno (Barba et al., 2015).

Figura 16

Esquema de los principales subsistemas que componen el prototipo



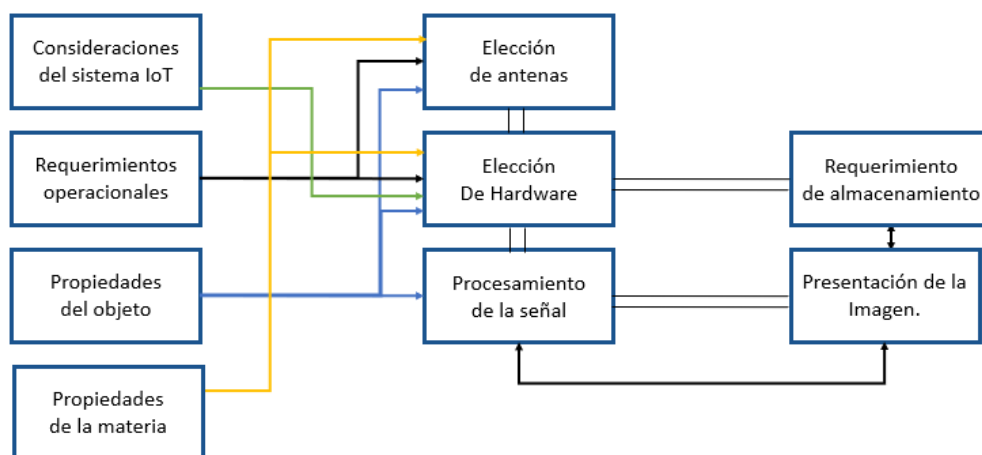
Fuente. Autor.

Desarrollo del prototipo

A continuación, se representa el diagrama de las consideraciones y los elementos para tener en cuenta en el desarrollo de la solución del sistema IoT.

Figura 17

Diagrama sistema IoT propuesto.



Fuente. Autor.

Como se muestra en la figura 17, se aprecia las consideraciones del sistema IoT que se evidencian las especificaciones generales del diseño. Los requerimientos operacionales seleccionan las características operativas del GPR, como la frecuencia operativa y el ancho de banda, la velocidad de propagación y el ruido permitido. Nivel de detección de objetivo.

En propiedades objeto y propiedades del material, apoyan las propiedades básicas mencionadas anteriormente, resuelven problemas y dan una visión única a los requisitos de la aplicación.

La selección de la antena, la selección del hardware y el procesamiento de la señal son características que surgieron de métodos anteriores para justificar las características de

infraestructura física y material requeridas para GPR, y la elección del esquema de modulación y demodulación de señal para comprender la señal recibida e interpretar la información.

El requerimiento de almacenamiento se refiere a una ubicación de almacenamiento donde los datos procesados pueden almacenarse y enviarse a la interfaz para su posterior análisis y estudio. Finalmente, la presentación de la imagen indica que debe haber un sistema en el GPR que pueda mostrar el resultado al usuario para que el usuario pueda realizar los ajustes necesarios.

Selección de Hardware para el diseño propuesto

Radio definida por software Hack RF One.

Great Scott Gadgets es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz. Diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, Hack RF One tiene una forma rectangular como se aprecia en la figura 18 y es una plataforma de hardware de código abierto que se puede usar como un periférico USB o programado para una operación independiente (Great Scott Gadgets, 2017).

Figura 18

Hack RF One.



Fuente. Autor.

Antena SAW-500.

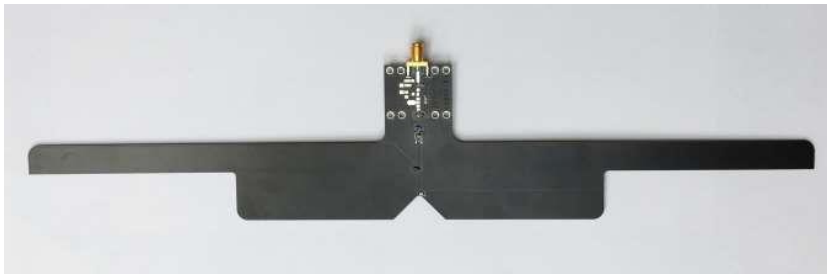
La antena receptora para la recepción de señales de radio de banda ancha en el rango de frecuencia VHF / UHF. La antena se basa en un elemento sub-resonante simétrico de banda ancha y un transformador pasivo simétrico a asimétrico (transformador balun). La antena se puede utilizar en modo pasivo alimentando a través del transformador balun incorporado. En el modo activo, se puede incorporar a la antena un preamplificador de receptor de alto rango dinámico y bajo nivel de ruido. La construcción mecánica permite montarlo en un mástil o trípode utilizando componentes de tamaño estándar como se aprecia en la figura 19.

Aplicaciones Típicas

- Enlaces de radio analógicos y digitales
- Supervisión y gestión del espectro
- Interceptación e interferencia de señales de banda ancha
- Aplicaciones de formación de haces electrónicos y phased array

Figura 19

Antena SAW-500.



Fuente. Autor.

Computadores de placa simple Raspberry Pi 3.

Raspberry Pi 3 Modelo B es el primer modelo de la Raspberry Pi de tercera generación. Reemplazó el Raspberry Pi 2 Modelo B en febrero de 2016. Vea también el Raspberry Pi 3 Modelo B +, el último producto de la gama Raspberry Pi 3. En la figura 20 encontramos los diferentes puertos disponibles para conectar periféricos.

Figura 20

Raspberry Pi 3



Fuente. Autor.

Vehículo Aéreo no Tripulado Tarot 650.

El Tarot 650 puede transportar hasta 1,5 kg (3,3 lb) de carga útil, con un alcance de 2 millas (3,2 km) y tiene un tiempo de vuelo de hasta 25 minutos. El Tarot 650 ha sido diseñado para transportar la más amplia gama de equipos, desde cámaras / video hasta equipos científicos / industriales / de investigación, y mucho más. Debajo de la placa central del dron Tarot 650 hay 2 varillas de fibra de carbono para permitir un fácil montaje de las cargas útiles.

Con el sistema de controlador de vuelo Pixhawk, el operador puede programar puntos de referencia y planes de vuelo en el dron antes del despegue. El controlador de vuelo Pixhawk Made In USA de alta calidad cuenta con modos de vuelo manual, modo de estabilización y un

retorno al modo de inicio (función a prueba de fallas) además del modo autónomo. El dron se puede pilotar con el controlador incluido cuando se vuela manualmente o mediante una computadora portátil o tableta utilizando el software Mission Planner cuando se vuela de forma autónoma.

El Dron utiliza un Ublox NEO-M8N de alta calidad de fabricación suiza y estadounidense equipado con brújulas duales como se ilustra en la figura 21, lo que permite un posicionamiento increíblemente preciso y está impulsado por 4 motores sin escobillas livianos y altamente eficientes que cuentan con hélices plegables de fibra de carbono.

Figura 21

Tarot 650.



Fuente. Autor.

Radio telemetría transceptor V3.

Una Radio de Telemetría Holybro es una plataforma de radio de código abierto pequeña, ligera y barata que normalmente permite rangos de mejor que 984.3 ft "fuera de la caja" (el rango se puede extender a varios kilómetros con el uso de una antena de parche en el suelo) y su forma física se aprecia en la figura 22. La radio utiliza firmware de código abierto que ha sido especialmente diseñado para funcionar bien con los paquetes MAVLink y para ser integrado con el planificador de la Misión, Copter, Rover y Plane.

Las radios pueden ser 915Mhz o 433Mhz y usted debe comprar el modelo adecuado para su país/región.

Características

- Módulos de aire y tierra intercambiables 915 o 433 MHz
- Puerto Micro-USB
- Conector JST-GH de 4 posiciones

Especificaciones

- Potencia de salida máxima de 500 mW (ajustable) -117 dBm de sensibilidad de recepción.
- Firmware SIK de código abierto
- Conector RP-SMA
- Comunicación dúplex completa en 2 direcciones mediante la interfaz UART TDM adaptable
- Enlace serial transparente.
- Marco de protocolo MAVLink
- Frecuencias de espectro disperso (FHSS) Ciclo de trabajo configurable
- La corrección de errores corrige hasta un 25% de errores de bits firmware SIK de código abierto
- Configurable mediante Planificador de Misión y Planificador APM
- FT230X es un USB a BASIC UART IC

Figura 22

Radio telemetría transceptor V3.



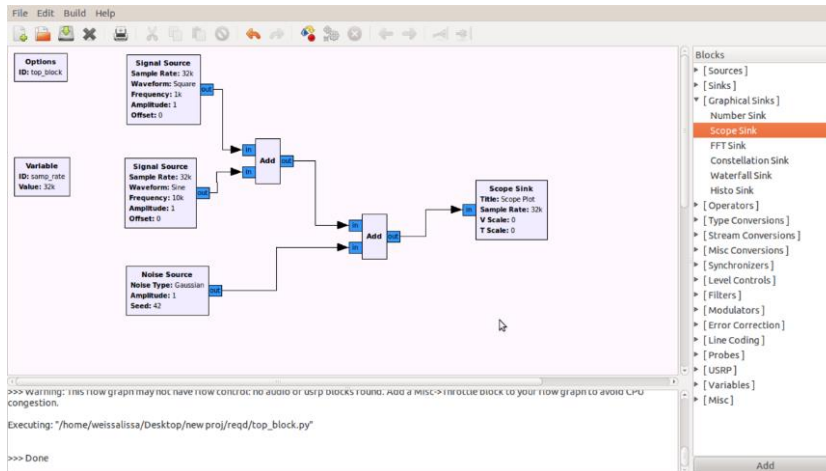
Fuente. Autor.

Selección de software

Software GNU Radio.

Es un kit de herramientas de desarrollo de software gratuito y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar radios de software. Se puede usar con hardware de RF externo de bajo costo fácilmente disponible para crear radios definidas por software, o sin hardware en un entorno similar a la simulación. Es ampliamente utilizado en investigación, industria, academia, gobierno y entornos de aficionados para apoyar la investigación de comunicaciones inalámbricas y los sistemas de radio del mundo real (The GNU Radio Foundation, n.d.). Una radio de software es un sistema de radio que realiza el procesamiento de señal requerido en el software en lugar de usar circuitos integrados dedicados en el hardware. Un ejemplo de su interfaz gráfica la encontramos en la figura 23. El beneficio es que, dado que el software se puede reemplazar fácilmente en el sistema de radio, se puede usar el mismo hardware para crear muchos tipos de radios para muchos estándares de comunicaciones diferentes; por lo tanto, ¿una radio de software puede usarse para una variedad de aplicaciones.

Figura 23

Software GNU Radio

Fuente. Autor.

Software Misión Planner.

Es una aplicación muy completa, muy similar a la anteriormente comentada UGCS, con la que podremos configurar infinidad de parámetros de nuestro drone y de nuestra controladora. Está disponible para Windows, pero también existe una versión multiplataforma llamada APM Planner. Con este software tendremos que planificar nuestro vuelo desde el PC y posteriormente pasar la misión a nuestro drone. Su interfaz es algo más espartana que las anteriores (figura 24). En ocasiones te encontrarás con la sensación de que existe una única forma, no siempre la más inmediata, de hacer las cosas.

Figura 24

Software Misión Planner.



Fuente. Autor.

Construcción del prototipo.

Los elementos de hardware y software que facilitaron el diseño del sistema IoT, para suplir la falta del agua del sector agrícola del departamento de La Guajira, basándose en las variables y factores que no impone dicha problemática. Los elementos seleccionados son:

- Radio definida por software Hack RF One.
- Antena SAW-500.
- Computadores de placa simple Raspberry Pi 3.
- Vehículo Aéreo no Tripulado Tarot 650.
- Radio telemetría transceptor V3.
- Software GNU Radio.
- Software Misión Planner.

El sistema GPR basado en SDR, se compone de dos Hack RF One sincronizados entre sí y dos antenas dipolo de banda ancha de 100-500MHz, Se utiliza un Hack RF One como emisor (TX), con su respectiva antena encargado de emitir una onda electromagnética que penetra la tierra hasta encontrarse con la presencia de agua, ocasionando que la onda rebote a la superficie en la cual es recibida y procesada con el objetivo de determinar con exactitud la profundidad en la que se encuentra el agua subterránea. Esta recepción la realiza la segunda Hack RF One (RX). Posteriormente esta información es enviada a la estación en terrestre poder visualizar dicho hallazgo mediante el sistema de telemetría y de comunicación. Estos hallazgos se pueden apreciar mediante Radargramas. Los Radargramas se muestran como cortes en la tierra, a medida que el UAV se desplaza sobre la superficie se van generando estos, donde la parte superior corresponde a la superficie y las líneas horizontales y/o la escala a la derecha, representan la profundidad en metros.

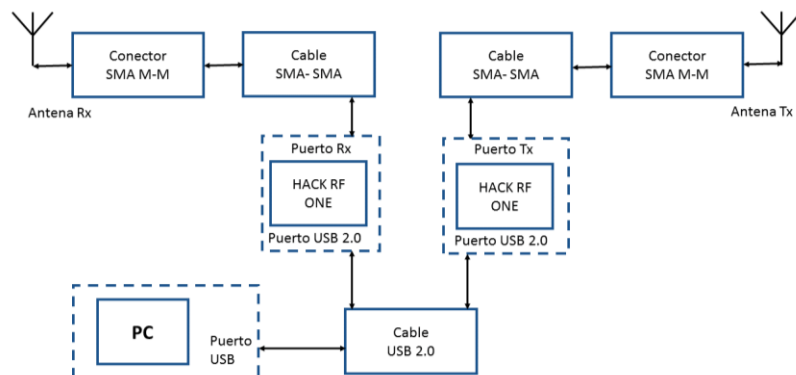
Hardware

Esta sección presenta una breve descripción de los componentes de hardware utilizados en el sistema GPR. La tecnología SDR tiene varios componentes de hardware: Raspberry PI , Tarjeta SDR Hack RF One, antenas SAW-500 y cables.

Las cuales van conectado como se aprecia en figura 25.

Figura 25

Conexión física con la tarjeta Hack RF One.



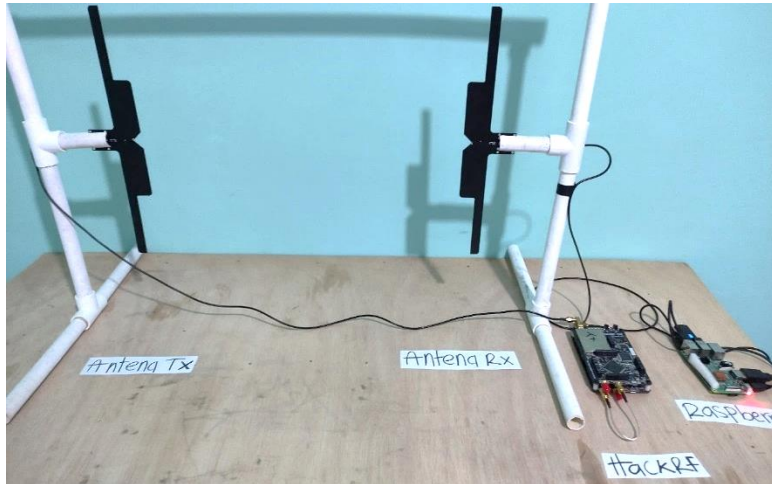
Fuente. Autor.

Las tarjetas Hack RF One tiene una cobertura de frecuencia que va desde 1 MHz a 6 GHz; es posible modular diferentes señales (vía SDR) dependiendo de las condiciones del suelo. Esto hace que el sistema implementado sea reconfigurable por el usuario en cualquier momento.

Una vez definidos los componentes, se ha ensamblado el GPR mencionado anteriormente para obtener una configuración inicial de acuerdo con la figura 26.

Figura 26

Prueba de ensamble del hardware del GPR.



Fuente. Autor.

Software

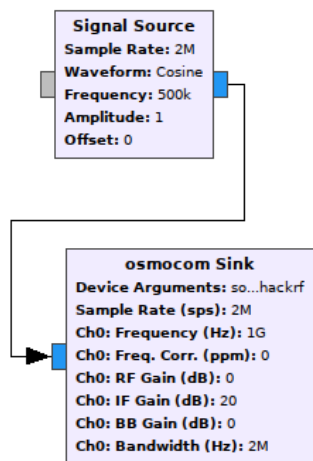
Los sistemas Tx y Rx GPR se programan utilizando la opción GNU Radio Companion, que se describe a continuación.

Sistema GPR Tx.

El sistema GPR Tx consiste básicamente en la generación del impulso de transmisión. Este pulso se crea mediante los dos bloques, el primero es Signal Source, el cual es el encargado de generar la señal del sistema GPR con una fuente de señal de coseno, el segundo bloque es Osmocom Sink como se aprecia en la figura 27; el cual recibe la señal creada por Signal Source y la envía a la tarjeta SDR Hack RF One TX y esta señal a su vez se envía por la antena TX.

Figura 27

El diagrama de flujo del transmisor.



Fuente. Autor.

Sistema GPR Rx.

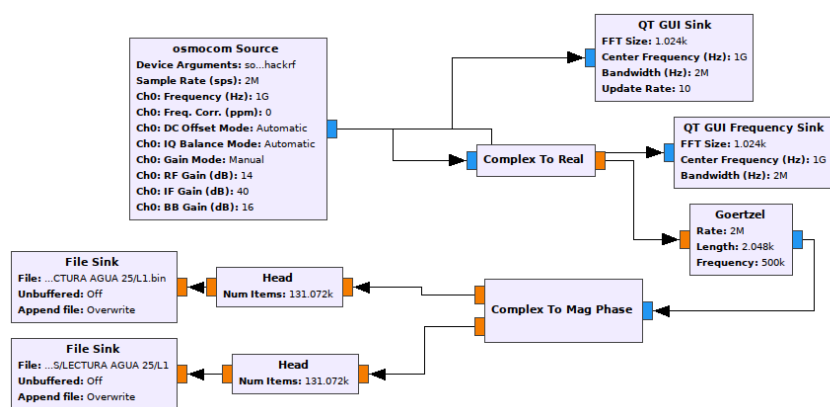
Sistema GPR Rx está controlado por una cantidad mayor de bloques (Figura 28). El primer bloque de esta programación es Osmocom Source; el cual es el encargado de recibir la señal del mediante la tarjeta SDR HackRF ONE RX, posteriormente esa señal es convertida de un tipo de dato Complex, a un tipo de dato Float. Es necesario que la señal se convierta en Float para ser compatible con el bloque que viene a continuación, el cual se llama Goertzel y lo que hace es recopilar términos individuales de transformada discreta de Fourier (DFT), se mediante del algoritmo de Goertzel, arrojando en un tipo de dato Complex.

Siguiendo con nuestro diagrama de bloques tenemos un módulo que tiene que convertir nuevamente un tipo de dato Complex, a un tipo de dato Float, con la diferencia que esta señal Float posee dos salidas. El Bloque Head lo que hace es limitar la cantidad de muestras que se guardan en un archivo cuando se usa File Sink; el cual es nuestro último bloque encargado de

almacenar los datos del GPR. Estos datos se almacenan en formatos .bin y se lee mediante MatLab con los comandos fopen y fread en sesión de procesamiento de la señal.

Figura 28

El diagrama de flujo del receptor.



Fuente. Autor.

Pruebas de aceptación y resultados.

En este apartado se aplicaron las diferentes pruebas para comprobar el funcionamiento de todos los elementos, tanto de hardware como de software, que las conexiones y condiciones realmente sea las óptimas para garantizar la integridad de las pruebas futuras.

Estas pruebas se componen de una serie de tareas, en las cuales se pudo comprobar inicialmente el funcionamiento del GPR en un área controlada para verificar el envío y recepción de la señal.

Después de corroborar el correcto funcionamiento del GPR se procede a realizar las pruebas de detección de objetos, en especial agua; debido a que este es el elemento que queremos identificar con el sistema GPR.

A continuación, se presentan las pruebas de funcionamiento preliminares Sistema IoT, donde se evidencia las 4 pruebas aplicadas con el objetivo de obtener varias lecturas del sistema

GPR para ser procesada y filtrada y poder corroborar si es posible la detección de agua subterránea mediante el sistema propuesto.

Pruebas de funcionamiento preliminares Sistema IoT

La validación se ha desarrollado en varias pruebas. La cual se llevó a cabo en pequeño terreno (figura 29) del cual se realizó una excavación para ejecutar todas las pruebas, y cuyo propósito es depositado arena seca (enterrando bolsa con agua en su interior). Las primeras pruebas se dedicaron a analizar el rendimiento del radar para detectar el agua debajo y fuera de la superficie terrestre. Una vez que se verifique el correcto funcionamiento del radar, se realizaron las primeras pruebas del GPR a bordo del UAV.

Todas estas pruebas se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones técnica las cuales se definen de la siguiente manera:

Datos Técnicos del Sistema GPR.

Tipo de señal emitida: Coseno

Frecuencia: 100 MHz

Ancho de Banda: 2 MHz

Distancia de antena TX y RX: 30 Cm.

Tiempo de lectura: 1 minuto.

Altura del GPR: 80 Cm.

Datos Técnicos área de pruebas.

Medida del área a realizar las pruebas: 50 X 40 X 80 Cm.

Suelo: seco.

Tipo de elemento a identificar: agua (5 bolsa con agua).

Para la realización de la prueba se dispone de una mesa en la cual están ubicado todos los elementos involucrados en el funcionamiento del GPR, principalmente las antenas TX y RX; las cuales se separa a una distancia de 30 Cm, para garantizar una correcta lectura. Esta mesa se ubica sobre la excavación preparada para realizar las lecturas del GPR en busca de los objetos enterrados en dicha zona.

Figura 29

Elementos involucrados en las pruebas del GPR.



Fuente. Autor.

Pruebas de funcionamiento 1.

La primera prueba del GPR consiste en realizar una lectura del terreno en la cual no se encuentre ningún elemento enterrado en la zona de lectura, y por su puesto en su superficie, esta prueba se realiza como referente inicial y servirá de base para ser comparada con las demás lecturas realizadas como se aprecia en la figura 30.

Figura 30

Lectura GPR sin elemento en la zona analizada.



Fuente. Autor.

Pruebas de funcionamiento 2.

La segunda lectura del GPR se realiza con una variación sustancial, en la cual se coloca múltiples bolsas con agua (figura 31) sobre la superficie a explorar con el objetivo de analizar el comportamiento de la onda electromagnética y conserva un segundo referente para comparar con los resultados de las pruebas siguientes.

Figura 31

Lectura GPR con agua en la superficie de la zona analizada



Fuente. Autor.

Pruebas de funcionamiento 3.

En la tercera lectura del GPR, se coloca el agua (5 bolsas con agua) enterrada a una profundidad de 25 cm (figura 32), se espera poder identificar las diferencias del comportamiento en la frecuencia que generaría el sistema receptor y determinar las diferencias en ganancia y tonalidad.

Figura 32

Lectura GPR con agua a una profundidad de 25 Cm en la superficie de la zona analizada.



Fuente. Autor.

Pruebas de funcionamiento 4.

La cuarta y última lectura del GPR, se coloca el agua (5 bolsas con agua) enterrada a una profundidad de 50 cm, se continua con los umbrales establecidos en alcance según el protocolo preliminar y desatendiendo la distancia en profundidad terrestre (**figura 33**). El propósito de este escenario es identificar un rango y un umbral de resolución, debido a que las pruebas están orientadas a la identificación de agua subterránea.

Figura 33

Lectura GPR con agua a una profundidad de 50 Cm en la superficie de la zona analizada.



Fuente. Autor.

El principal propósito de ejecutar estas pruebas consiste en establecer un umbral de alcance respecto al objeto de medición y la ubicación de las antenas receptoras o transmisora, descartando la resolución y la distancia en profundidad terrestre.

Procesamiento de la señal

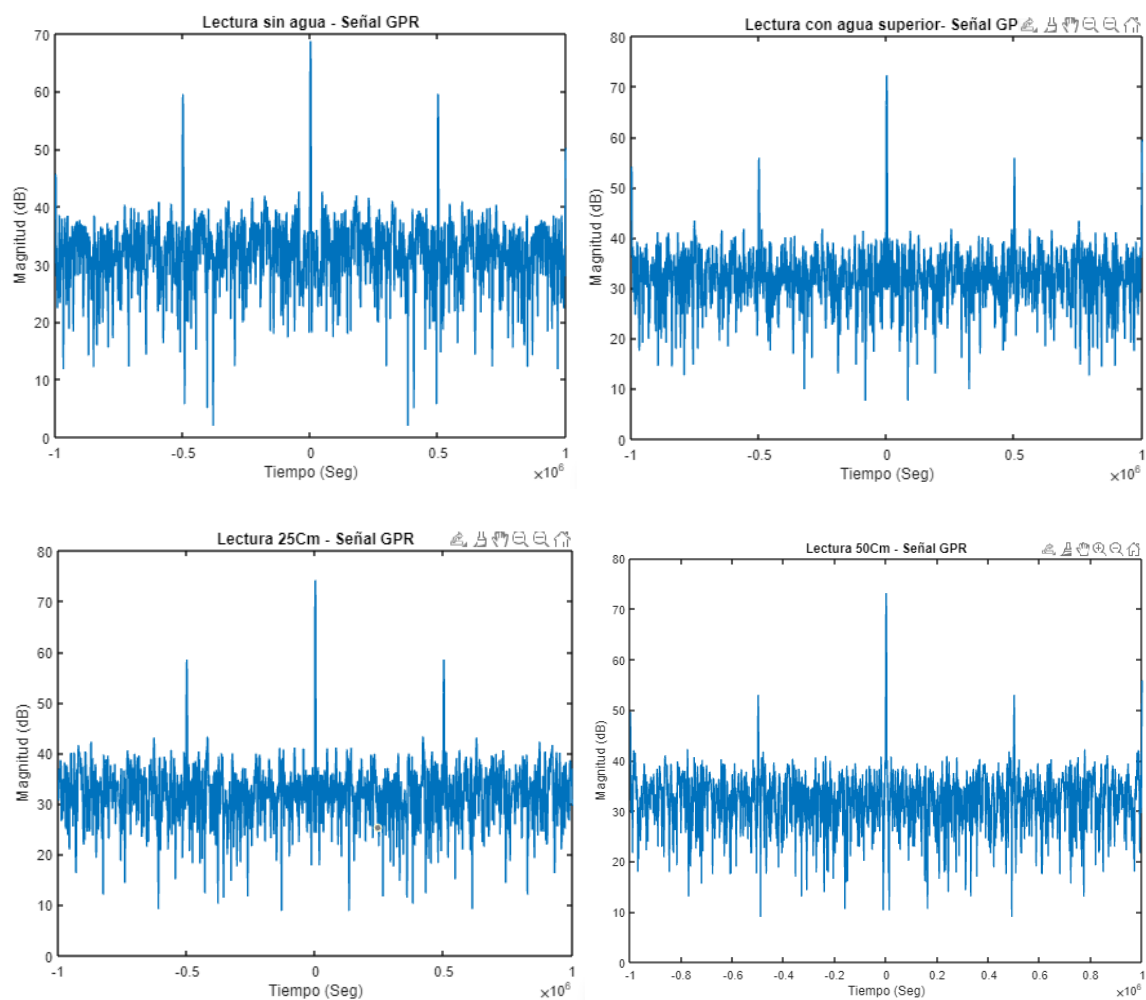
Antes de que podamos interpretar los datos que se obtienen de las lecturas del GPR (Radar de Penetración del Tierra), es importante someter estas lecturas a un procesamiento para optimizar la resolución, debido a que estas lecturas contienen ruidos externos y ruidos del instrumento que impiden realizar un correcto análisis de la señal.

El procesamiento se realiza fuera de la plataforma de GNU Radio desde un computador externo y luego de haber realizado las mediciones utilizando MATLAB (figura 34), de ahí que

los datos deban exportarse para poder leerlos y hacer de ellos vectores con los que trabajar un algoritmo que los procese y construya el Radargramas.

Figura 34

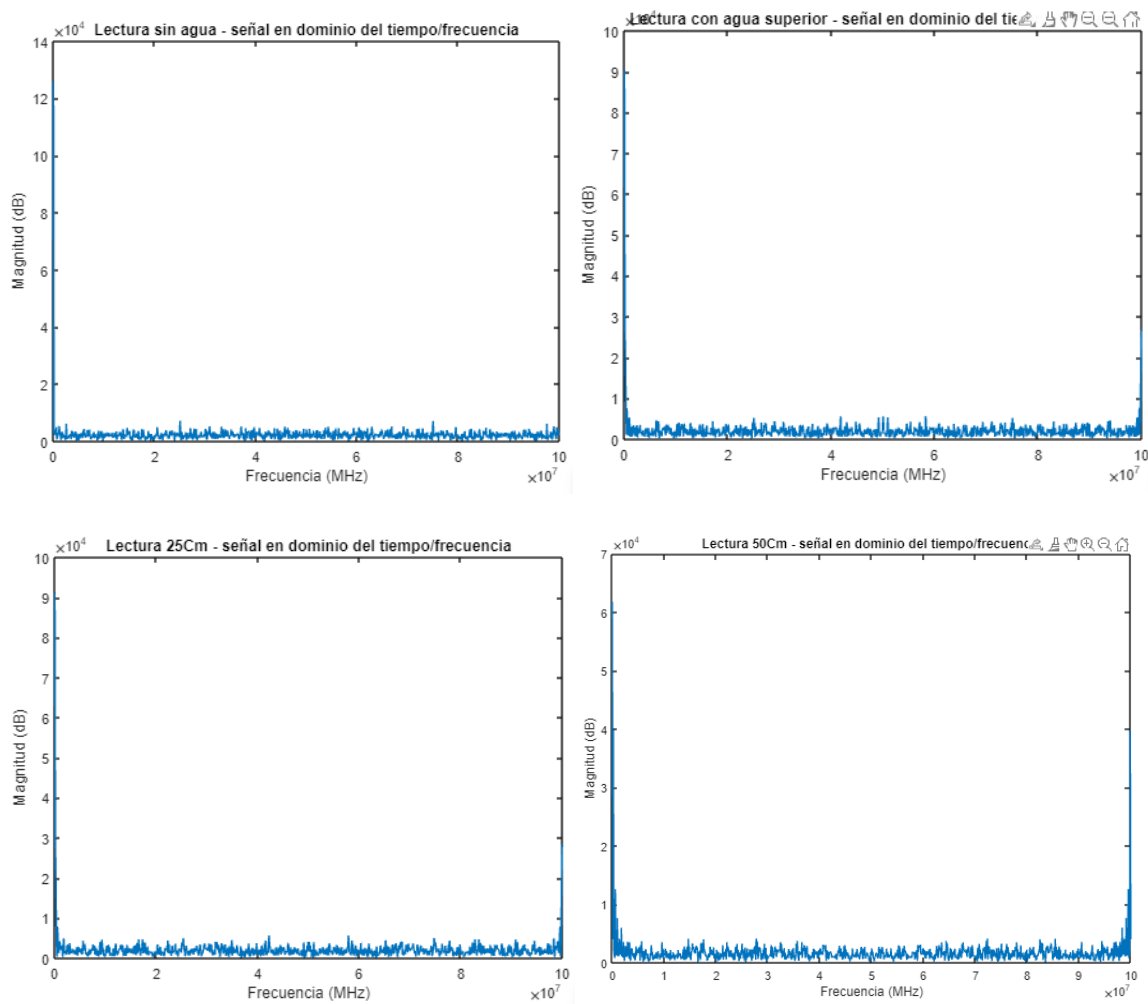
Construcción de la señal mediante MatLab.



Fuente. Autor.

Figura 35

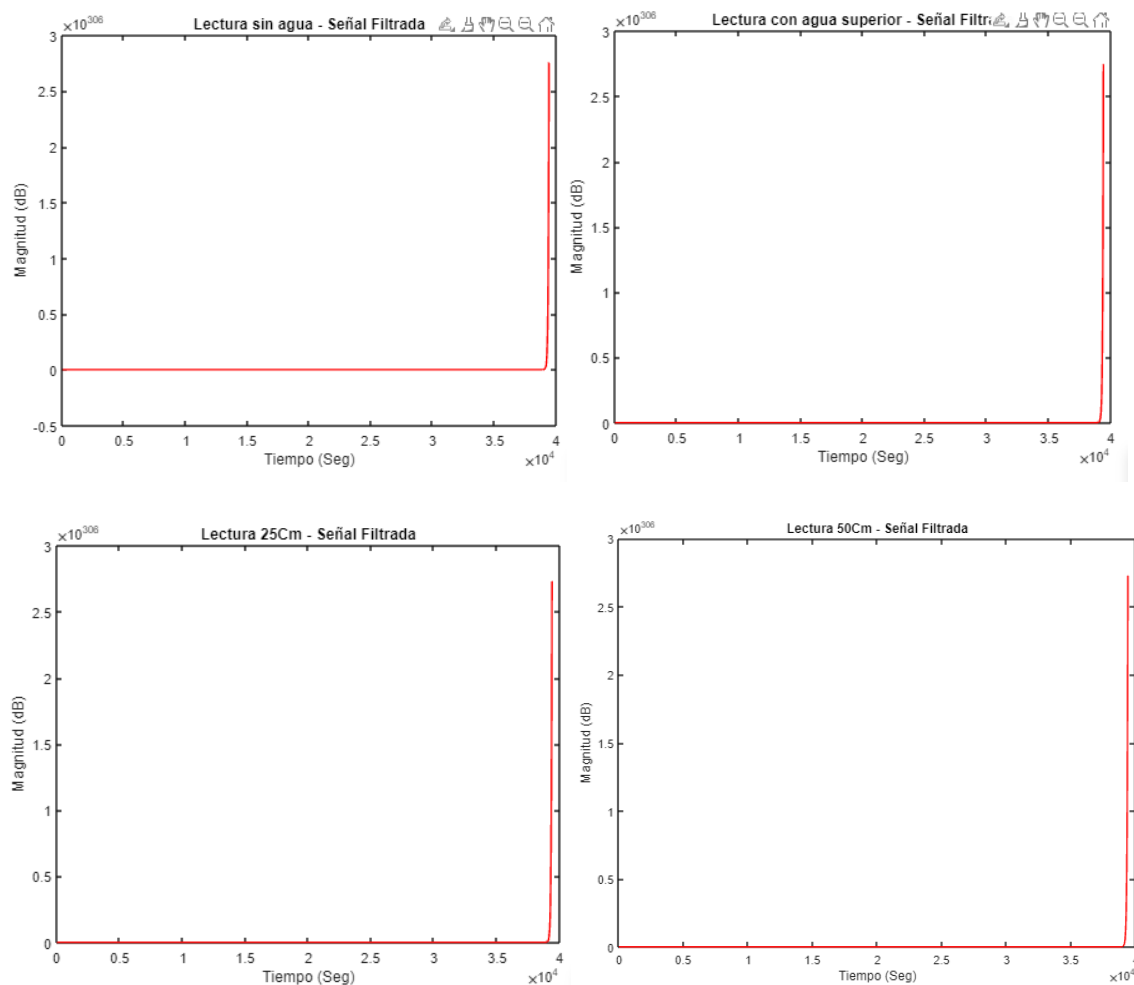
Aplicación de la Transformada Rápida de Fourier a la señal procesada en MatLab



Fuente. Autor.

Figura 36

Filtrado de la señal mediante filtro paso alto.



Fuente. Autor.

El método de Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) se evidencia en la figura 35 y la aplicación del filtro paso alto se evidencia en la figura 36 y se aplican para transformar el espectro en el dominio de la frecuencia en la señal GPR en el dominio del tiempo y viceversa.

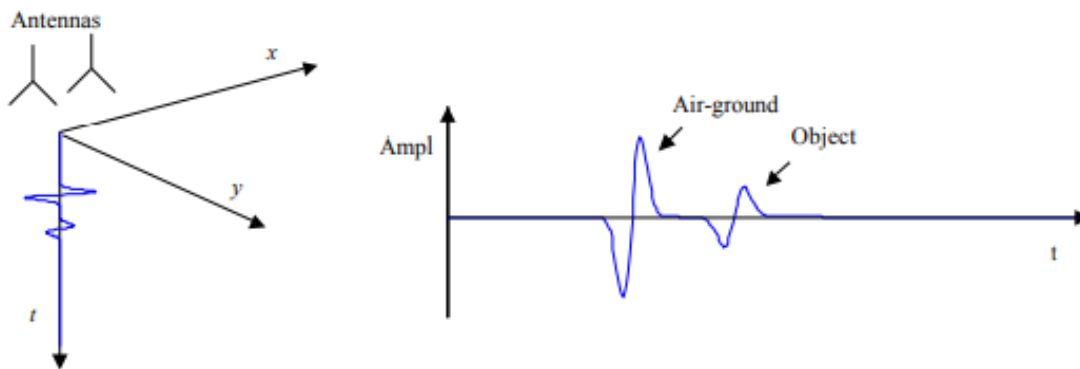
Ajustes del prototipo luego de las pruebas.

Las pruebas preliminares Sistema IoT genera una serie de señales gracias al GPR (Radar de Penetración de Tierra) que permitirá generar el B-scan, el cual se crea al mover las antenas del

GPR (Radar de Penetración de Tierra) en una línea a lo largo del eje x , se puede reunir un conjunto de A-scan (figura 37), que forman un conjunto de datos bidimensional, llamado B-scan (figura 38). Cuando la amplitud de la señal recibida se representa mediante una escala de colores (o escala de grises), se obtiene una imagen 2D como se muestra en la figura 38. La imagen 2D representa un corte vertical en el suelo. El eje de tiempo o el eje de profundidad relacionado suele apuntar hacia abajo.

Figura 37

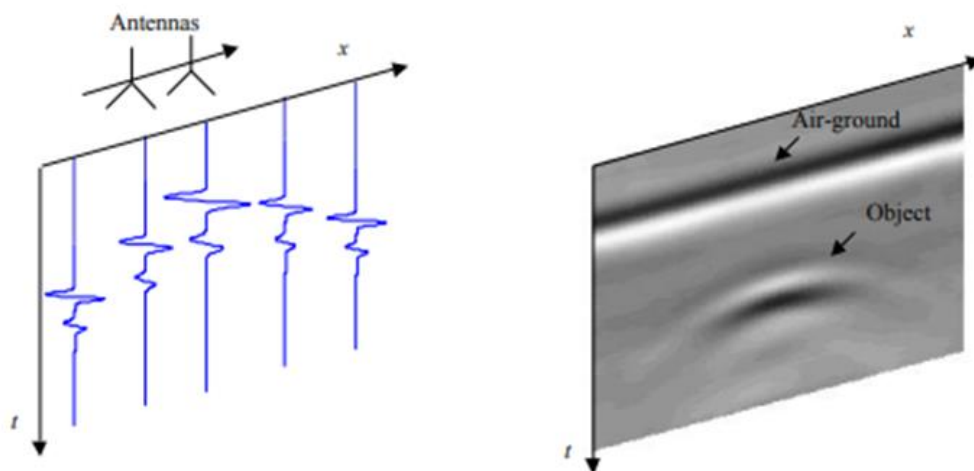
Representación de la señal A-Scan.



Fuente. Autor.

Figura 38

Representación de la señal B-Scan.



Fuente. Autor.

El A-Scan proporcionada por el GPR (Radar de Penetración de Tierra) en la prueba, no es pertinente para indicar la presencia de agua subterránea en el terreno explorado, debido a que no se pudo llevar a cabo el proceso de filtrar la señal electromagnética identificada mediante la aplicación de un filtro paso alto. Como se evidencia en la figura 35, con la aplicación del filtro paso alto se busca atenuar las señales inferiores a 95 MHz hasta 0 MHz; pero al aplicarlo el algoritmo no se evidencia realmente un filtrado dicha señal y como se aprecia en la figura 36; el comportamiento es el mismo para todas las lecturas realizadas. Lo permite concluir que se debe mejorar el algoritmo de filtrado para poder demostrar el comportamiento de la señal emitidas para la identificación de agua subterránea.

Estos resultados demuestran que se puede construir un prototipo de GPR basado en SDR de bajo costo, pero el proceso de filtrado de la señal se debe mejorar para garantizar el correcto

funcionamiento y garantizar la recopilación de datos reales y permitir producir imágenes interpretables con la identificación de agua subterráneas.

Versión final del prototipo.

Esta sección describe el proceso de integración del sistema GPR y el UAV. El proceso incluye la unión de hardware, software y las partes mecánicas correspondientes a los soportes necesarios para el correcto acoplamiento de ambos sistemas para un plan de vuelo adecuado para la función correcta de GPR. Al ser dispositivos independientes, el UAV y el GPR necesitan un soporte mecánico especialmente diseñado para adaptarse al área física del sistema UAV como se aprecia en la figura 39. Además, también es necesario establecer una comunicación continua entre el equipo de tal manera que el sistema de vuelo se encargue de asignar procesos, mientras que el sistema GPR es un periférico que ejecuta esos procesos. Finalmente, los datos obtenidos por el GPR junto con los datos GPS y los valores de posicionador de la placa deben archivarse correctamente, dicho funcionamiento se puede apreciar en la figura 40 y la figura 41.

Figura 39

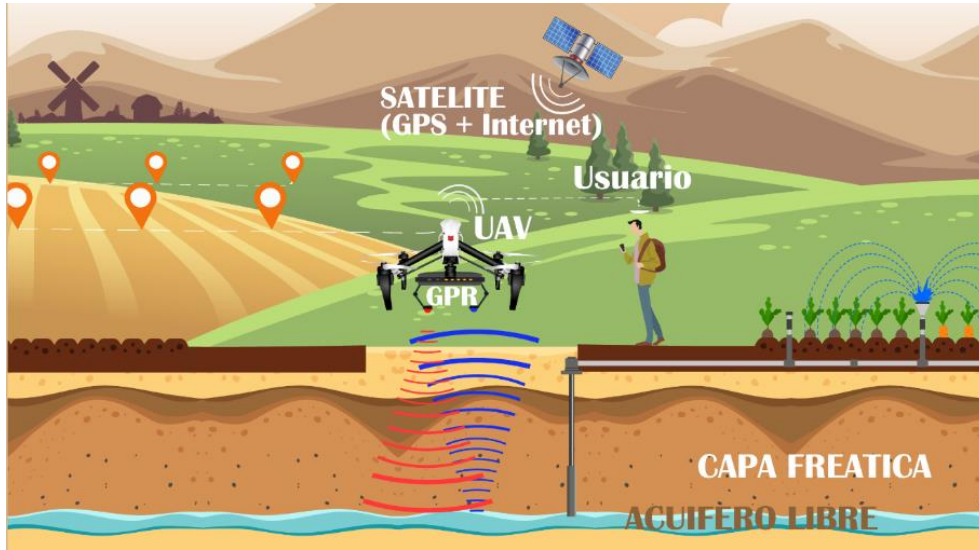
Sistema GPR y UAV.



Fuente. Autor.

Figura 40

Funcionamiento del sistema IoT.



Fuente. Autor.

Figura 41

Exploración del Sistema GPR y UAV en el campo.



Fuente. Autor.

Para mejorar su funcionamiento es importante realizar una investigación que involucre un gran número de ensayos de campo para realizar un análisis estadístico en profundidad para evaluar cuantitativamente el impacto de las técnicas de posicionamiento GNSS / RTK en las lecturas del sistema GPR.

Otra mejora para considerar en el Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) es el aumento del tiempo de vuelo, ya sea mediante la utilización de sistema de suministros de energía más eficientes o utilizando baterías de más capacidad.

Referente al sistema Radar de Penetración de Tierra (GPR) se propone el desarrollo de antenas que permiten mayores altitudes de vuelo. Una gran desventaja del Radar de Penetración de Tierra (GPR) a bordo del Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) en comparación con uno

basado en tierra siempre será la resolución reducida de estructuras débiles en el subsuelo, ya que, debido a la distancia entre la antena y el objeto, el cono de señal será más ancho y, por lo tanto, los objetos pequeños no pueden ser detectados.

Otra mejora para considerar de vital importancia es el procesamiento de las señales obtenidas del GPR, debido a que no fue posible identificar la presencia de agua subterránea de manera exitosa y automática; debido a la falencia presentada en la etapa de filtrado de la señal. Por tal motivo, se propone mejorar el algoritmo de procesamiento del filtrado en la aplicación del filtro paso alto.

Las mediciones del Radar de Onda Continua de Frecuencia Escalonada (SFCW), naturalmente, no funcionan en tiempo real, ya que la técnica se basa en múltiples mediciones a lo largo de una trayectoria de vuelo. Principalmente dos factores limitan el rendimiento en tiempo real; la recopilación de datos de radar y el procesamiento de Radar de Onda Continua de Frecuencia Escalonada (SFCW) a bordo de un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV).

Es probable que el tiempo de procesamiento se pueda mejorar aumentando la capacidad de procesamiento del hardware o utilizando un software más optimizado.

Como mejoras futuras, se sugiere realizar optimización en el Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV), principalmente en el GPS, ya que el usado no posee la precisión idónea, afectando las lecturas del Radar de Penetración de Tierra (GPR) en las rutas escogidas para realizar el análisis la presencia de agua subterránea. Se recomienda utilizar un sistema de posicionamiento GNSS / RTK de bajo costo; el cual brinde un nivel precisión en centímetro beneficiando las lecturas del terreno por parte del Radar de Penetración de Tierra (GPR) a bordo del Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV).

Divulgación en eventos de difusión del conocimiento.

En vista de la necesidad de compartir los avances de investigación del proyecto, se selecciona una serie de eventos de difusión del conocimiento a nivel nacional e internacional, en donde se presentarán los resultados preliminares de dicha investigación; la cual se enfoca en ayudar al sector agropecuario del departamento de La Guajira los cuales han sufrido grandes pérdidas económicas por falta del recurso hídrico para sus cultivos.

Los eventos de difusión del conocimiento en los cuales se ha participado son:

1. Participación en el Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2020 (EIEI ACOFI 2020), con el artículo titulado Sistema IoT Con UAV y GPR Para Identificar Zonas Con Aguas Subterráneas en el Departamento de la Guajira – Colombia, el cual fue seleccionado ganador de la categoría Avances de Investigación, de los Premios ACOFI 2020, que entrega la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.
2. Participación por dos años seguidos en los Premios de Investigación de América Latina de Google (LARA) en su versión 2020 y 2021, el cual busca financiamiento del proyecto para continuar el proyecto de investigación; lamentablemente la propuesta no fue recomendada para financiamiento.

Conclusiones

Con el desarrollo de la investigación y el diseño con enfoque exploratorio aplicado en este proyecto es posible concluir; que el uso e implementación de las tecnologías de la información tales como IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas), UAV (vehículo aéreo no tripulado), y GPR (radar de penetración de tierra), constituyen un factor importante dentro de las competencias tecnológicas en el sector productivo, así como del componente de innovación y aplicación de las tecnologías en el área de la agricultura para la identificación de agua subterránea con el propósito de mitigar el riesgo de pérdidas (cultivos, animales y vidas humanas) por sequías extremas y eventos asociados .

Evidenciar los efectos de las sequías extremas y la escasez de agua en el sector agropecuario del departamento de la Guajira es mostrar que hoy en día existen alternativas tecnológicas que pueden solventar la problemática de la falta de agua. Por tanto, el prototipo propuesto es una alternativa para solucionar los problemas de obtención de agua en el sector agrícola de La Guajira, es viable implementar y desarrollar dicho proyecto, además que con el debido manejo es posible que se vuelva una solución comercial, que la puedan adquirir las personas que habitan en esta región. Además, la implementación proporcionaría una mejora en la calidad de vida y la producción del sector agrícola en el departamento.

A través de las pruebas se identifica que los UAV son plataformas flexibles y de bajo costo, que permiten a los operadores recuperar observaciones hidrológicas hiperespaciales con alta resolución espacial y temporal. El vuelo automático, junto con la navegación por visión por computadora, permite a los UAV monitorear áreas peligrosas o remotas, incluidas las corrientes no navegables.

En cuanto al alcance de los objetivos específicos se puede concluir que:

Durante el desarrollo del estado del arte acerca de la temática abordada surgieron algunos inconvenientes relacionados con el idioma originario de cada una de las investigaciones revisadas; se encontraron importantes aportes en inglés, ruso y polaco con los cuales surgió la necesidad de realizar traducciones de calidad para extraer la información concreta y pertinente a las acciones a implementar, especialmente acerca de los métodos y técnicas de prospección de agua subterránea mediante GPR y UAV.

Al realizar el diseño del prototipo del sistema de rastreo de agua subterránea IoT con GPR y UAV, de acuerdo con las variables de profundidad máxima de penetración, tecnologías de hardware necesarias, se concluye que es posible crear un prototipo, basado en componentes de código abierto y disponibles en el mercado de bajo costo que permitieron realizar pruebas en un espacio controlado para determinar la identificación de agua subterránea.

En el transcurso del desarrollo del prototipo del sistema para identificación de aguas subterráneas mediante GPR a bordo de un UAV, acorde con el diseño determinado se logró la identificación, adquisición y configuración de todo el sistema GPR y UAV, tanto de hardware como de software, al igual que la integración de ambos sistemas en base a los requerimientos ya planeados.

Se realiza un enfoque en el sistema GPR, principalmente todo lo referente a la creación de la señal que emite el GPR. Se define la frecuencia y el tipo de filtrado para interpretación de dicha señal para las pruebas que se realizaron con la identificación de agua subterráneas.

En las pruebas de aceptación y ajustes al sistema propuesto se organizaron varios espacios que permitieron colocar a prueba de manera controlada el prototipo IoT, partiendo

desde el envío y recepción de la señal por parte del GPR, hasta poder realizar una lectura de un terreno controlado con presencia de agua subterránea para determinar la eficiencia del sistema desarrollado que permitieron conocer los retos que impone la identificación de agua subterránea.

La Presentación del sistema implementado en diferentes eventos de difusión del conocimiento se logró gracias al apoyo, gestión y acompañamiento de diversas personas y entidades para dar a conocer los avances de la investigación propuestos; por supuesto el alcance y el impacto que puede tener dicho prototipo si logra ser implementado en el sector agropecuario del departamento de La Guajira. De igual manera también busca financiación para poder adquirir componentes de hardware y software de mejor calidad y más precisos que faciliten la identificación de agua subterránea.

El prototipo de GPR basado en drones ha demostrado que las herramientas desarrolladas son operativas y proporcionan resultados consistentes en términos de patrones espaciales, así como en términos de valores absolutos de humedad del suelo. Sin embargo, las mediciones de radar aún están sujetas a errores, como lo es el filtrado de la señal en la etapa de procesamiento de los datos obtenidos por el GPR, ya que los resultados obtenidos no aporta la información necesaria para poder garantizar la identificación de agua subterránea en las pruebas realizadas.

De igual los errores también pueden provenir de interacciones entre drones y las antenas, así como variaciones en el ángulo de incidencia debido a inestabilidades de vuelo y pendiente del suelo. Actualmente, los cambios en el ángulo de incidencia no se tienen en cuenta en la calibración de la antena.

Referencias

- ANEXO, C. (2016) Susceptibilidad Por Suelos Edafológicos Plancha 6 Castilletes, Departamento De La Guajira. *Recordcenter.Sgc.Gov.Co.*
- Arias, P. (2017). *Automation of the thermographic inspection: development of thermal-geometric algorithms for detection of pathologies supported by machine learning strategies. View project Infrastructures Events View project.*
- Bai, X., Wang, L., Luo, X., Mi, H., Chen, H., Liu, L., Ji, M., & Gao, Y. (2020). A Layer Tracking Method for Ice Thickness Detection Based on GPR Mounted on the UAV. *2020 4th International Conference on Imaging, Signal Processing and Communications (ICISPC)*, 24–28. <https://doi.org/10.1109 / ICISPC51671.2020.00012>
- Barba, L., Muñoz, I., Ortiz, A., & Blancas, J. (2015). Using Of Geophysical Techniques To Determine Building Systems And Materials Present In The Tumuli Of The Formative Period In The Azapa Valley, Arica, Chile. *Chungará (Arica)*, 47(1), 131–156. <https://doi.org/10.4067/S0717-73562015005000008>
- Beauchamp, R. M., Arumugam, D. D., Burgin, M. S., Bush, J. D., Khazendar, A., Gim, Y., Almorqi, S., Almalki, M., Almutairi, Y. A., Alsama, A. A., & Alanezi, A. G. (2018). Can Airborne Ground Penetrating Radars Explore Groundwater in Hyper-Arid Regions? *IEEE Access*, 6, 27736–27759. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2840038>
- Borrion, H., Amiri, A., Delpech, D., & Lemieux, A. M. (2019). *Experimental assessment of the viability of using ground penetrating radar for metal wire-snare detection.* <https://doi.org/10.1186/s40163-019-0105-0>

Carreño, I. (2020). *Crece agricultura inteligente basada en IoT / DPLNews*.

<https://digitalpolicylaw.com/crece-agricultura-inteligente-basada-en-iot/>

Daniels, J. J. (1989). *Fundamentals of Ground Penetrating Radar*. 62–142.

<https://doi.org/10.4133/1.2921864>

Eléctricas, C., La, D. E., De, S., & Tierra, L. A. (1978). *P.527-3 - Características eléctricas de la superficie de la tierra*.

Fabregat-Santiago, F., Ferriols, N. S., García-Belmonte, G., Bisquert, J., & Morell, I. (1999).

Estudio de los diferentes estados energéticos del agua del suelo en función de los fenómenos de relajación dieléctrica.

Garcia-Fernandez, M., Alvarez-Lopez, Y., Gonzalez-Valdes, B., Arboleya-Arboleya, A.,

Rodriguez-Vaqueiro, Y., Heras, F. Las, & Pino, A. (2018). UAV-mounted GPR for NDT applications. *2018 15th European Radar Conference, EuRAD 2018*, 2–5.

<https://doi.org/10.23919/EuRAD.2018.8546594>

Grijalva Montoya, A., & Grijalva Montoya, A.-G. (2014). *Metodología para obtener un modelo hidrogeofísico en las prospección de acuíferos*.

Guajira, L. (2021). *Plan Integral De Desarrollo Agropecuario Y Rural Con Enfoque Territorial*.

www.digitosydiseños.com.co

Jalili, M., Gharibshah, J., Ghavami, S. M., Beheshtifar, M., & Farshi, R. (2014). Nationwide

Prediction of Drought Conditions in Iran Based on Remote Sensing Data. *IEEE*

Transactions on Computers, 63(1), 90–101. <https://doi.org/10.1109 / TC.2013.118>

- Ji, B., Li, Y., Zhou, B., Li, C., Song, K., & Wen, H. (2019). Performance Analysis of UAV Relay Assisted IoT Communication Network Enhanced with Energy Harvesting. *IEEE Access*, 7, 38738–38747. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906088>
- Jol, H. (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*.
- Kafedziski, V. (2019). Compressive Sampling Stepped Frequency Ground Penetrating Radar Using Group Sparsity and Markov Chain Sparsity Model. *2019 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2019 - Proceedings*, 265–268. <https://doi.org/10.1109/TELSIKS46999.2019.9002342>
- Liu, T., Cui, M., Zhang, G., Wu, Q., Chu, X., & Zhang, J. (2021). 3D Trajectory and Transmit Power Optimization for UAV-Enabled Multi-Link Relaying Systems. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(1), 392–405. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2020.3048135>
- Lombardi, F., & Lualdi, M. (2019). Step-frequency ground penetrating radar for agricultural soil morphology characterisation. *Remote Sensing*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/RS11091075>
- M. Schutz, C. Decroze, M. L. and B. L. (2019). *Design Study for UAV-Mounted GPR - IEEE Conference Publication*. IEEE Access. <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/document/8904664>
- Massaro, A., Savino, N., Selicato, S., Panarese, A., Galiano, A., & Dipierro, G. (2021). Thermal IR and GPR UAV and Vehicle Embedded Sensor Non-Invasive Systems for Road and Bridge Inspections. *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 &*

IoT (MetroInd4.0&IoT), 248–253. <https://doi.org/10.1109 />

MetroInd4.0IoT51437.2021.9488483

Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y. H., & Debbah, M. (2019). A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(3), 2334–2360.

Communications Surveys and Tutorials, 21(3), 2334–2360.

<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>

Niño, D., El, E. N., De, D., & Guajira, L. A. (2018). *Análisis de vulnerabilidad del territorio por sequía en el departamento de La Guajira, Colombia, a partir de una visión basada en necesidades básicas insatisfechas.*

Omwenga, M. M., Wu, D., Liang, Y., Yang, L., Huston, D., & Xia, T. (2019). Autonomous Cognitive GPR Based on Edge Computing and Reinforcement Learning. *2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*, 348–354. <https://doi.org/10.1109 />

International Conference on Industrial Internet (ICII), 348–354. <https://doi.org/10.1109 />

ICII.2019.00066

Pathak, N., Mukherjee, A., & Misra, S. (2021). AerialBlocks: Blockchain-Enabled UAV Virtualization for Industrial IoT. *IEEE Internet of Things Magazine*, 4(1), 72–77.

<https://doi.org/10.1109 / IOTM.0011.1900093>

Paz, C., Alcalá, F. J., Carvalho, J. M., & Ribeiro, L. (2017). Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research. *Science of the Total Environment*,

595, 868–885. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.210>

R. Burr, M. ScharTEL, P. Schmidt, W. Mayer, T. W. and C. W. (2018). Design and

Implementation of a FMCW GPR for UAV-based Mine Detection. *Ieeexplore.Ieee.Org.*

- Reid, W. V., Chen, D., Goldfarb, L., Hackmann, H., Lee, Y. T., Mokhele, K., Ostrom, E., Raivio, K., Rockström, J., Schellnhuber, H. J., & Whyte, A. (2010). Earth system science for global sustainability: Grand challenges. In *Science* (Vol. 330, Issue 6006, pp. 916–917). <https://doi.org/10.1126/science.1196263>
- Reino, E. L., Los, D. E., Bajos, P., Fao, L. A., & Del, U. C. (2017). *9 JUNIO 2017 Centro Sheikh Zayed Sede De La Fao, Roma, Italia Organizado Conjuntamente Por: La República Islámica De Irán Sequía Y Agricultura Seminario Internacional Sobre Pronosticar, Planificar, Preparar: Cómo Evitar Que La Sequía Se Convierta En Hambr.*
- RPS Info, T. I. remotely piloted systems information source. (n.d.). *Drone Market Sector Classification – RPS Info*. Retrieved November 6, 2019, from <https://rps-info.com/surveys/drone-market-sector-classification/>
- Schartel, M., Burr, R., Mayer, W., Docci, N., & Waldschmidt, C. (2018, August 21). UAV-Based Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar. *2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, ICMIM 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICMIM.2018.8443503>
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Hydrology and Earth System Sciences Groundwater use for irrigation-a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, *14*, 1863–1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- Sofía, L., López, B., Chirino, V. G., Lozano Espitia, D. C., & Páez Rodríguez, A. (2017). *Estudio para la implementación de una planta desalinizadora y distribución del agua potable en la Alta Guajira*. Pontificia Universidad Javeriana.

- Soldovieri, F., Lopera, O., & Lambot, S. (2011). Combination of advanced inversion techniques for an accurate target localization via GPR for demining applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1 PART 2), 451–461.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2051675>
- Sun, W. (2021). Distributed Optimal Scheduling in UAV Swarm Network. *2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109 / CCNC49032.2021.9369643>
- Tafur Reyes, R., Nacional Julio César toro Mesa, D., Técnico Luis Carlos Cotes Murgas, D., PFN Guajira Blas Guzmán Valdeblanquez, C., & Técnico Margarita Rosa Redondo, A. R. (2006). *Equipo Plan Frutícola Nacional-PFN*.
- Tang, J., Chen, G., & Coon, J. P. (2019). Secrecy Performance Analysis of Wireless Communications in the Presence of UAV Jammer and Randomly Located UAV Eavesdroppers. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 14(11), 3026–3041. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2019.2912074>
- Yarleque, M. A., Alvarez, S., & Martinez, H. J. (2017). FMCW GPR radar mounted in a mini-UAV for archaeological applications: First analytical and measurement results. *Proceedings of the 2017 19th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2017*, 1646–1648. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065606>
- Zeng, Y., Wu, Q., & Zhang, R. (2019). Accessing from the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and beyond. *Proceedings of the IEEE*, 107(12), 2327–2375.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2952892>

Zhang, Y., Orfeo, D., Huston, D., & Xia, T. (2021). Compressive Sensing based Software Defined GPR for Subsurface Imaging. *2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109 / RadarConf2147009.2021.9455291>

Anexos

Anexo A. Encuesta realizada a agricultores de Los Pondores.

Encuesta para a agricultores de los pondores

Objetivo: Identificar las variables medioambientales que afectan el rendimiento y la producción de sector agrícola del departamento de La Guajira por causa de la escases de agua.

Datos del principales de la encuesta

Nombre del encuestador:

Nombre del encuestado:

Fecha de encuesta: ____ : ____ : ____ Lugar encuesta:

Fecha de encuesta: ____ : ____ Fecha de encuesta: ____ : ____

1 - ¿De dónde procede el agua para regar el cultivo? *

- Lluvia
- Río
- Manantial o puquio
- Pozo/agua subterránea
- Reservorio
- Pequeño reservorio /embalse deregulación
- Otros

2 - ¿Qué sistema de riego utilizó? *

- Exudación
- Goteo
- Micro-aspersión
- Aspersión
- Multicom
- Mangas
- Gravedad
- Otros

3 - ¿Actualmente sufres alguna de las siguientes situaciones relacionadas con el medioambiente?

- Clima impredecible
- Resistencia de las plagas a productos fitosanitarios
- Infestación de plagas incrementada
- Escasez de agua
- Erosión del suelo
- Ninguna de las anteriores

4 - Cuenta usted con la disponibilidad de agua las 24 horas?

- Sí
- No

+

5 - Considera que el acceso al agua será peor en el futuro?

- Sí
- No

6 - ¿Cuál es su perspectiva sobre el futuro de la agricultura de la región?

- Muy mala
- Mala
- Buena
- Muy buena

7 - ¿Cuáles crees que pueden ser las consecuencias futuras que afecten los cultivos por la escasez de agua?

- Incremento de costes
- Pérdida de competitividad
- Pérdida de producción
- Perdida de rendimiento
- Ninguna de las anteriores

8 - ¿Sabe si el terreno donde desarrolla su actividad agrícola posee agua subterránea?

- Si
- No

9 - ¿Ha considerado la implementación de tecnologías para identificar agua subterránea en su actividad agrícola?

Sí

No

10 - ¿Cree usted que la adopción de tecnologías para identificar agua subterránea permitirán mejorar la producción de los cultivos?

Sí

No

Anexo B. Artículo de Avance de Investigación para Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI).



SISTEMA IoT CON UAV y GPR PARA IDENTIFICAR ZONAS CON AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA - COLOMBIA

Rafael Alberto Daza Plata, Sixto Enrique Campaña Bastidas

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Riohacha, Colombia**

Resumen

El agua es el recurso vital de la vida de las personas, en Colombia hay zonas que cuentan con abundancia de este elemento natural, pero, en otras su escasez es evidente y obliga a las personas que habitan en dichos lugares a cambiar sus formas de vida e intentar obtener este líquido de diversas formas. Una de ellas es buscando fuentes hídricas en el subsuelo, en donde no se pueden percibir fácilmente, pero que, ayudados por la tecnología es factible hacerlo. El presente avance de investigación se refiere al diseño de un sistema GPR con UAV para la identificación de aguas subterráneas en el departamento de la Guajira en Colombia, que es un territorio con mucha escasez de este preciado líquido, que vive periodos de sequía extrema, generando pobreza, desnutrición y muchas muertes a causa de esta problemática entre otras causas. El sistema propuesto se basa en el diseño de un prototipo IoT (Internet de las Cosas) que permite explorar el subsuelo, controlado remotamente por una terminal conectada a Internet, ya sea un teléfono móvil, una tablet o un computador, donde se puede visualizar el recorrido que hace el dispositivo y los hallazgos que identifique, este proceso se apoya en el uso de tecnologías GPR (Radar de penetración de tierra) y UAV (vehículo aéreo no tripulado); el primero para hacer análisis del subsuelo que abarque el dispositivo y el segundo para hacer el sobrevuelo de los lugares objetivo y que se ha estimado podrían tener agua subterránea. El objetivo principal del sistema propuesto es contribuir a la identificación de fuentes hídricas en el departamento de la Guajira en Colombia, las cuales pueden contribuir en el desarrollo rural de la región, permitiendo la explotación agrícola y ganadera de manera satisfactoria. La investigación es de tipo exploratoria y conclusiva, dado que se han analizado diseños previos de dispositivos similares y se está proponiendo uno específico y orientado al problema identificado. Este proyecto busca articular estos aspectos para llegar con soluciones que beneficien a una comunidad y se apoyen en la tecnología para propender por un mejor vivir.

Palabras clave: radar de penetración en el suelo (GPR); vehículo aéreo no tripulado (UAV); agua subterránea

Abstract

Water is the vital resource of people's lives, in Colombia there are areas that have an abundance of this natural element, but in others its scarcity is evident and forces people who live in these places to change their ways of life and try to obtain this liquid in various ways. One of them is looking for water sources in the subsoil, where the human eye cannot perceive easily, but with the help of technology it is feasible to do so. Therefore, the present research progress refers to the design of a GPR system with UAV for the identification of groundwater in the department of La Guajira in Colombia, which is a territory with a great shortage of this precious liquid, which lives periods of drought extreme, generating poverty, malnutrition and many deaths due to this problem, among other causes. The proposed system is based on the design of a prototype IoT (Internet of Things) that allows explore the subsoil, remotely controlled by a terminal connected to the Internet, be it a mobile phone, a Tablet or a computer, where it can visualize the route that the device makes and the findings that it identifies, this process is supported by the use of GPR (Ground Penetration Radar) and UAV (Unmanned Aerial Vehicle) technologies. ; the first to make analysis of the subsoil that covers the device and the second to make the overflight of the target places and that it has been estimated could have groundwater. The main objective of the proposed system is to contribute to the identification of water sources in the department of La Guajira in Colombia, which can contribute to the rural development of the region, allowing satisfactory agricultural and livestock exploitation. The research is exploratory and conclusive, given that previous designs of similar devices have been analyzed and one specific and oriented to the identified problem is being proposed. This project seeks to articulate these aspects to arrive with solutions that benefit a community, leaning on technology to promote a better life.

Keywords: ground penetration radar (GPR; unmanned aerial vehicle (UAV); groundwater

1. Introducción

Colombia posee un amplio territorio con vocación para ejercer la agricultura, la cual se ve privilegiada por las singularidades geográficas, biológicas y principalmente por las condiciones climáticas que posee, asimismo, posee destreza de cultivar una amplia diversidad de productos agrícolas, por tanto, el agua se constituye como un recurso vital en las actividades productivas de este sector, en este sentido, el agua no es solo fundamental para apoyar las actividades agrícolas que mejoren la calidad de vida de la población campesina, sino que, también es un elemento primordial para la producción de la economía. De esta manera, se puede afirmar que el agua es un bien público fundamental para los seres humanos y un elemento natural imprescindible en la configuración de los sistemas medioambientales, por consiguiente, es deber del Estado velar y garantizar el acceso de este recurso a toda la población colombiana, no obstante, se evidencian fallas en la cobertura, calidad y posibilidades de acceso para el sector agrícola. Esta problemática motiva el desarrollo de la presente investigación, planteando como objetivo



principal, el de ayudar a los agricultores del departamento de La Guajira en la identificación de aguas subterráneas viables para la agricultura, mediante el desarrollo de un prototipo IoT que utilice tecnologías UAV y GPR, el cual mitigue el riesgo de pérdidas por sequías extremas y eventos asociados.

Para combatir la problemática identificada se debe tener en cuenta que la Guajira es una de las regiones más vulnerables al cambio climático y está sujeta a fenómenos hidrometeorológicos cada vez más intensos, que ocasionan sequías afectando la disponibilidad de agua para los distintos usos [1]. Principalmente para el sector agropecuario, el cual es uno de los más afectados con dicha situación, puesto que, en la región entre el 80 y 98% de los rubros agrícolas dependen de la lluvia. De acuerdo con la Unidad de Planificación Rural Agraria (UPRA) del Ministerio de Agricultura, únicamente el 5% del suelo en La Guajira tiene vocación agrícola y el 2% pecuaria [2]. Si se comparan estos valores con la vocación de todo el suelo nacional, 19% y 13% respectivamente, se observa la dificultad que tienen los habitantes en La Guajira, en especial, las comunidades en las zonas rurales para asegurar su sostenibilidad alimentaria. En caso de no cubrir esta necesidad puede traer consecuencias terribles, como lo es la desnutrición crónica, tal como lo manifiesta [3]. Además de la baja vocación agropecuaria del suelo, la seguridad alimentaria de las comunidades se reduce durante las épocas de sequía. En este sentido, podría pensarse que la variabilidad climática genera consecuencias negativas sobre los indicadores de desnutrición y mortalidad de la población. El cambio climático y la variabilidad climática han alterado los patrones de precipitación en la región, lo que afecta en general al sector agrícola, que es altamente dependiente de la lluvia. Por lo tanto, se hace necesario la búsqueda de opciones tecnológicas y prácticas que permitan hacer frente a los retos que impone el cambio climático y la variabilidad climática en la región.

Acorde a lo anterior, se evidencia que no existe la suficiente capacidad técnica regional, limitando la utilización de paquetes tecnológicos que se pueden aplicar con un margen de confianza en la zona más baja de La Guajira, lo que repercute en la existencia de un diferencial productivo o brecha tecnológica frente a estándares determinados. Otra deficiencia del sector agrícola está en el uso de los factores de producción, particularmente, en la tierra y el agua, el bajo nivel de innovación en los sistemas productivos, la baja formalización de la propiedad rural, la escasa productividad de la mano de obra rural y los altos costos de producción. A causa de lo expuesto anteriormente y conscientes de la importancia de abordar el vínculo entre la seguridad alimentaria y seguridad hídrica en el contexto del cambio climático, se propone utilizar la prospección de agua subterránea mediante el uso de GPR a bordo de un UAV; una tecnología que va a permitir una gestión adecuada de las aguas que se encuentran bajo tierra a un menor costo para beneficio del sector agrícola del departamento de La Guajira.

2. Aplicaciones de GPR (Radar de penetración de tierra) y UAV (vehículo aéreo no tripulado).

En este apartado se nombran algunas aplicaciones con GPR y UAV, partiendo de los retos que plantea la integración de estas dos tecnologías, por ejemplo, los GPR se montan en carros o carriolas y se usan en contacto muy cerca del suelo, con un gran tamaño y peso [4], lo que



significa una dificultad para ser incorporados en un UAV. Recientemente, se han llevado a cabo investigaciones y experimentos para integrar el sistema de radar en un mini UAV. Este uso relevante permite la detección sin contacto de objetos enterrados tales como minas [5], [6]; imágenes de grandes áreas que son difíciles de alcanzar [7], y explorar las aguas subterráneas [8].

Detección de minas terrestres: El simple hecho de integrar un GPR a bordo de un UAV ha contribuido significativamente en acelerar el proceso de liberación de tierras en el desminado humanitario. Este proceso consiste en que el UAV vuele a baja altitud para detectar la presencia y ubicación aproximada de minas terrestres, la detección de estas minas se hace gracias al módulo de GPR permitiendo la detección hasta una profundidad de 20cm [9], y el procesamiento de la imagen se realiza sin conexión utilizando un algoritmo de retroproyección. De igual manera posee otros sensores que contribuyen en la optimización del proceso los cuales son: un LIDAR alímetro y un sistema satelital de navegación global cinemático en tiempo real (RTK GNSS).

Obtención de imágenes de grandes áreas: La exploración de grandes áreas para detectar y generar imágenes subterráneas utilizando técnicas SAR como motor de procesamiento, es posible gracias a la implementación del sistema FMCW GPR montado en un mini UAV [7]. Los primeros resultados de este sistema muestran la detección de un objeto metálico enterrado a 0,4 m bajo tierra, gracias a su capacidad para adquirir, digitalizar y almacenar datos por medio de un modelo Raspberry Pi 2, estos datos son procesados posteriormente. El sistema GPR se compone de un radar FMCW portátil y dos antenas LPDA.

Explorar las aguas subterráneas: La utilización de agua subterránea para la agricultura de riego es aproximadamente del 43% del agua utilizada en todo el mundo [10], y la necesidad de agua potable se espera que aumente en un 50% en las próximas décadas [11]. De allí radica la importancia de identificar agua subterránea y garantizar la sostenibilidad futura de los recursos hídricos. De esta manera se presenta una investigación inicial que permita las observaciones de la dinámica de los sistemas hidrológicos, revisando de manera específica los desafíos técnicos y las capacidades de los conceptos de GPR en el aire con aplicaciones para la detección de acuíferos, más exactamente la parte superior de nivel freático. De igual manera, también se analizan las capacidades y los requisitos tecnológicos asociados (y las limitaciones) para lograr el sondeo del radar a profundidades suficientes para detectar el agua en las regiones áridas del desierto [8].

En vista de la versatilidad al unir las tecnologías GPR y UAV, se confirma la viabilidad para ser implementadas en este proyecto con el único propósito de apoyar al sector agrícola del departamento de la Guajira, para mitigar el riesgo de pérdida de los cultivos por eventos de sequías extremas. Puesto que, para el caso de La Guajira, el simple hecho de tener un mayor acceso al agua garantizaría reducción de la pobreza urbana y rural, favoreciendo el desarrollo departamental. Al mismo tiempo, un mayor desarrollo socioeconómico genera la disminución en los índices multidimensional de la pobreza y de las necesidades básicas, y consecuentemente, un mayor acceso al recurso vital.



3. Diseño del prototipo IoT con tecnologías GPR (Radar de penetración de tierra) y UAV (vehículo aéreo no tripulado).

Con base al problema planteado que afronta el sector agrícola del departamento de La Guajira, debido a la escasez de agua y al desaprovechamiento del agua subterránea por falta de información de su ubicación para explotar dicho recurso, se plantea un análisis a los distintos métodos de prospección geofísicas que se adapte a las necesidades planteadas, que se refiere a los siguientes.

- El sistema de detección de agua subterránea no sólo debe estar enfocado en medir la profundidad, sino que, permita la posibilidad de reconfigurarse para adaptarse a las distintas condiciones que presente el terreno analizado.
- La elección del método de prospección geofísica se debe orientar directamente en que el sistema de detección de agua subterránea se acople a un vehículo aéreo no tripulado (UAV), el cual presenta unas especificaciones limitantes como lo son la cantidad de peso, dimensiones, velocidad de movimiento y autonomía.
- Debe poseer un sistema de extracción de los resultados de una forma precisa, fácil y rápida mediante una computadora.

Con base a las necesidades planteadas, se han definido las variables que permiten el diseño del proyecto, se parte de la variable de profundidad máxima de penetración, que hace referencia a la longitud que debe recorrer la señal enviada por el sistema GPR para detectar el agua subterránea, teniendo en cuenta las distintas pérdidas que sufre la señal en su camino de propagación hasta llegar al receptor. Con base a esta información recolectada se ha procedido a realizar las especificaciones del desarrollo, análisis y estudio del sistema GPR, que se hace mediante un sistema SDR. De este modo la investigación se ha orientado en la revisión de manuales y datasheet de las tarjetas HackRF ONE y las antenas para su correcta selección y posterior adquisición. Para poder comprender de qué se trata el **radar de penetración en el suelo (GPR)** es importante revisar su definición, la cual, según David J. Daniels [12], es una técnica de medición no destructiva, cuyo funcionamiento se basa en ondas electromagnéticas que le permiten la localización de objetivos o elementos ubicados dentro de una sustancia opaca o material de tierra. Por otra parte, un GPR también hace referencia al sondeo de tierra, penetración superficial (SPR) o radar subsuperficial. Acorde a lo anterior un GPR funciona mediante la transmisión de una secuencia regular de paquetes de energía electromagnética de baja potencia al material o suelo donde se aplique, recibiendo y detectando una señal reflejada débil del objetivo ubicada en el lugar donde se hace la exploración.

Por otra parte, el objetivo o elemento enterrado puede ser un conductor, un dieléctrico o combinaciones de ambos. Actualmente existen varios equipos disponibles en el mercado dependiendo de su alcance y su capacidad, los cuales se pueden usar con éxito para: proporcionar información forense en el curso de investigaciones criminales; detectar minas enterradas; inspeccionar carreteras; detectar servicios públicos; medir estratos geofísicos y en otras aplicaciones [13], [14] Y [15].

Para que el GPR pueda visualizar los objetos, utiliza señales de altas frecuencias [5], donde el rango del GPR se encuentra limitado por la conductividad eléctrica del suelo, al igual que la



potencia radiada y por el centro de la frecuencia transmitida. Por lo tanto, existe una relación directamente proporcional debido a que cuando la conductividad va aumentando, la profundidad de penetración disminuye. Esto se debe principalmente al calor disipado por la energía electromagnética, ocasionando que la potencia de la señal disminuya, evitando su propagación por el medio.

Al mismo tiempo, se debe abordar la otra tecnología fundamental para el desarrollo del proyecto, la cual es **UAV (vehículo aéreo no tripulado)**. Según la definición internacional del sistema de vehículos no tripulados (UVS), un vehículo aéreo no tripulado (UAV) es un diseño de avión genérico para operar sin piloto humano a bordo [16]. El término simple UAV se usa comúnmente en la comunidad de geomática, pero, también existen otros términos como: "Dron", vehículo pilotado a distancia (RPV), aeronave operada a distancia, sistemas de aeronave piloteada a distancia (RPAS).

Gracias a las investigaciones mencionadas y avances, hoy en día existe una variedad de UAV que se puede clasificar según: el tamaño, el peso, la resistencia, el alcance y la altitud de vuelo. UVS International [28] define tres categorías principales de UAV de la siguiente manera:

- UAV tácticos: la masa varía desde unos pocos kilogramos hasta 1.000 kg, el rango desde unos pocos kilómetros hasta 500 km, la altitud de vuelo desde unos pocos cientos de metros hasta 5 km, y la resistencia desde unos minutos hasta 2-3 días.
- UAV estratégicos: que incluyen sistemas de resistencia a larga altitud, estratosféricos y exoestratosféricos a gran altitud que vuelan a más de 20,000 m de altitud y tienen una resistencia de 2 a 4 días.
- Tareas especiales UAV: clasificados como vehículos autónomos de combate no tripulados, sistemas letales y señuelos.

La finalidad de las tecnologías del Radar de penetración en el suelo (GPR) y el Vehículos aéreos no tripulados (UAV) a implementar en este proyecto son: primero, permitirá la exploración de grandes áreas para detectar y generar imágenes sobre la presencia de agua subterráneas; utilizando un tipo de GPR para el dominio de la frecuencia llamado FMCW GPR, que básicamente lo que hace es transmitir continuamente la señal para cambiar la frecuencia de la portadora por medio de un VCO, en un rango de frecuencia elegido. El registro de los datos generados por el GPR se inicia automáticamente después del despegue del UAV y se detiene al aterrizar.

Los UAV son la tecnología encargada de realizar el sobrevuelo de los lugares objetivo y que se ha estimado podrían tener agua subterránea, este proceso se realiza de forma independiente y con velocidad constante con base a unas rutas preprogramadas; lo que mejora diez veces la productividad del trabajo de campo. Para los vuelos es importante contar con una precisión de altura extrema, ya que es crucial para garantizar las sesiones continuas de grabación de datos por parte del GPR.

El operador de UAV debe monitorizar el funcionamiento del GPR o al menos ver los datos de rastreos. Gracias al IoT, se puede controlar el GPR desde la estación terrestre: iniciar / detener la



grabación de datos, cambiar el modo y la configuración de GPR, etc. Todas estas funciones se apoyan en la interfaz de piloto automático que se usa para facilitar la comunicación entre la estación terrestre y el sistema IoT.

El sistema propuesto se compone de 5 subsistemas, los cuales son:

- Subsistema de control de vuelo, que consiste en un microcomputador (Raspberry Pi), un controlador de vuelo UAV y sensores de posicionamiento comunes (IMU, barómetro).
- Subsistema de comunicación.
- Subsistema de posicionamiento preciso para proporcionar una precisión.
- Subsistema de radar, el cual se compone de HackRF One y de las antenas RX y TX.
- Una estación terrestre (por ejemplo, una computadora portátil), que recibe mediciones de radar e información de posicionamiento y georreferenciación, y la procesa para mapear mediciones de radar con precisión de nivel centimétrico. Las mediciones georreferenciadas se procesan junto con el algoritmo de imágenes subterráneas para crear imágenes de radar del suelo y los objetos enterrados en él.

Estos subsistemas deben operar de manera sincronizada para garantizar la correcta operación y funcionamiento del prototipo en el campo de prueba, el cual deberá ejecutar los siguientes pasos:

1. El operador selecciona las coordenadas GPS del punto de inicio de la misión (a través de Google Earth). Al usar la GUI de la estación terrestre, el operador define el camino para cubrir un área deseada.
2. Antes de proceder a experimentos reales, el operador debe iniciar el simulador para verificar que el dron pueda operar a la altitud y velocidad deseadas.
3. Una vez que se valida la misión, el operador debe enviar los parámetros de la misión al dron (haciendo clic en enviar en la GUI), incluida la lista de puntos de ruta de trayectoria, altura y velocidad de mando y parámetros de configuración de GPR.
4. Al hacer clic en Inicio, el dron espera hasta que el operador despegue manualmente hasta aproximadamente 1 m sobre el suelo. Usando el controlador RC, el operador cambia al modo autónomo. El control de altitud del dron posiciona el dron a unos 50 cm para garantizar el rendimiento adecuado de GPR. El control de posición del piloto automático utiliza la retroalimentación GPS para rastrear los puntos de ruta, mientras que un control de actitud de retroceso + DAF permite un vuelo estable. El operador puede abortar la misión moviendo cualquier palanca del controlador RC.
5. Una vez que el dron finaliza la misión, el dron envía todos los datos a la estación base y espera el aterrizaje manual.
6. Dentro de la estación base, el operador puede visualizar los resultados de GPR y el terreno geo-mapeado.

4. Resultados y Conclusiones

Los resultados que se esperan obtener con la prueba final en el Sistema IoT son: lograr la correcta integración de las tecnologías propuestas, lograr que el funcionamiento del sistema GPR y UAV



estén bajo los parámetros aceptables para ejecutar la prueba, poder identificar la presencia de agua subterránea a una distancia aproximadamente de 5 Mt. Además, el presente proyecto de investigación aplicada se realiza con la finalidad de demostrar que la implementación de un prototipo un sistema IoT con base en la tecnología GPR a bordo de un UAV es la mejor alternativa para solucionar los problemas de obtención de agua en el sector agrícola del departamento de La Guajira. Lo que significaría el desarrollo de una nueva opción para la identificación de agua subterránea en la región, que redundaría en un mejoramiento de la calidad de vida y la producción del sector agrícola en el departamento y a su vez facilitaría el acceso del agua a los habitantes que trabajan y viven de las actividades agrícolas del departamento.

Las tecnologías IoT se han convertido en opciones de desarrollo, en soluciones a problemas comunes que viven las personas, su aplicación como el sistema propuesto son una respuesta a la investigación e identificación de retos y oportunidades que propendan por un mejor vivir, con el apoyo de los nuevos avances de la ciencia.

5. Referencias

Artículos de Revistas

- [1] L. Sofía, B. López, V. G. Chirino, D. C. Lozano Espitia, and A. Páez Rodríguez, "Estudio para la implementación de una planta desalinizadora y distribución del agua potable en la Alta Guajira," Pontificia Universidad Javeriana, 2017.
- [2] U. de P. R. A. UPRA, "Gestión de información agropecuaria y planificación del desarrollo agropecuario La Guajira," UPRA, 2019. [Online]. Available: <https://sites.google.com/a/upra.gov.co/presentaciones-upra/departamental/la-guajira>. [Accessed: 08-Apr-2020].
- [3] E. León, C. M. Acosta, and A. M. González, "Análisis de vulnerabilidad del territorio por sequía en el departamento de La Guajira, Colombia, a partir de una visión basada en necesidades básicas insatisfechas," ACA. Pregr. Civ., p. 63, 2015.
- [4] M. L. and B. L. M. Schutz, C. Decroze, "Design Study for UAV-Mounted GPR - IEEE Conference Publication," IEEE Access, 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/document/8904664>. [Accessed: 24-Nov-2019].
- [5] T. W. and C. W. R. Burr, M. Schartel, P. Schmidt, W. Mayer, "Design and Implementation of a FMCW GPR for UAV-based Mine Detection," ieeexplore.ieee.org, 2018.
- [6] A. A.-A. and F. L. H. M. Garcia-Fernandez, Y. Alvarez-Lopez, B. Gonzalez-Valdes, Y. Rodriguez-Vaqueiro, "Recent advances in high-resolution Ground Penetrating Radar on board an Unmanned Aerial Vehicle - IEEE Conference Publication," IEEE Access, 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/document/8739354>. [Accessed: 26-Oct-2019].
- [7] M. A. Yarleque, S. Alvarez, and H. J. Martinez, "FMCW GPR radar mounted in a mini-UAV for archaeological applications: First analytical and measurement results," in Proceedings of the 2017 19th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2017, 2017, pp. 1646–1648.

- [8] R. M. Beauchamp et al., "Can Airborne Ground Penetrating Radars Explore Groundwater in Hyper-Arid Regions?," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27736–27759, May 2018.
- [9] M. Schartel, R. Burr, W. Mayer, N. Docci, and C. Waldschmidt, "UAV-Based Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar," in 2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, ICMIM 2018, 2018.
- [10] S. Siebert et al., "Hydrology and Earth System Sciences Groundwater use for irrigation-a global inventory," *Hydrol. Earth Syst. Sci*, vol. 14, pp. 1863–1880, 2010.
- [11] W. V. Reid et al., "Earth system science for global sustainability: Grand challenges," *Science*, vol. 330, no. 6006, pp. 916–917, 12-Nov-2010.
- [12] J. J. Daniels, "Fundamentals of Ground Penetrating Radar," 1989, pp. 62–142.
- [13] E. R. Almeida, J. L. Porsani, A. Booth, A. T. Brunello, and T. Säkinen, "Analysis of GPR field parameters for root mapping in Brazil's caatinga environment," in 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2018, 2018.
- [14] C. Bristow, H. J.- Society, undefined London, S. Publications, and undefined 2003, "An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments," sp.lyellcollection.org.
- [15] F. Soldovieri, O. Lopera, and S. Lambot, "Combination of advanced inversion techniques for an accurate target localization via GPR for demining applications," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 1 PART 2, pp. 451–461, Jan. 2011.
- [16] "UVS International – Remotely Piloted Systems: Promoting International Cooperation & Coordination." [Online]. Available: <https://uvs-international.org/>. [Accessed: 24-Nov-2019].

Sobre autores

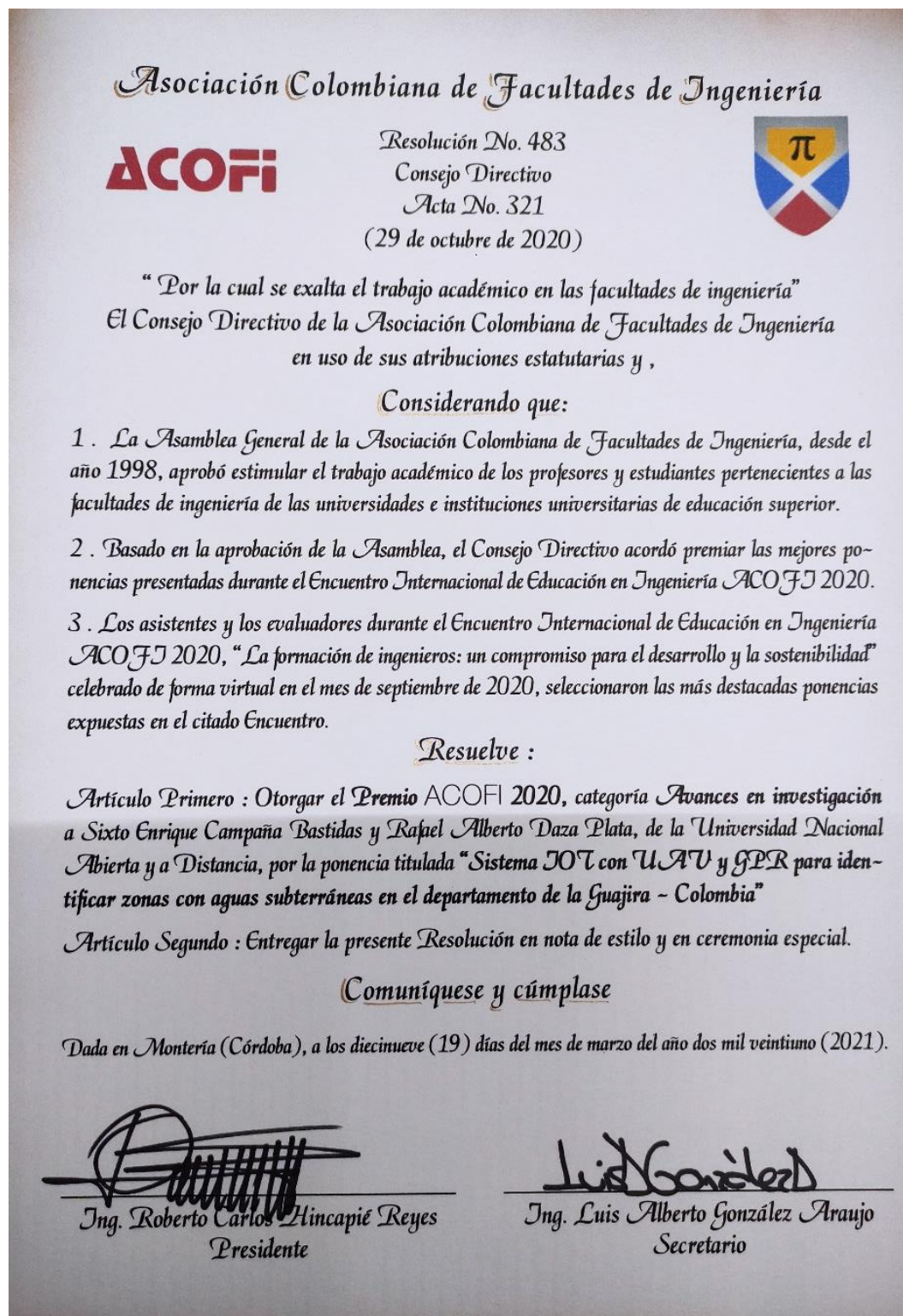
- **Rafael Alberto Daza Plata:** Ingeniero de sistemas. Docente Ocasional. radazap@unad.edu.co.
- **Sixto Enrique Campaña Bastidas:** Ingeniero de Sistemas, Especialista en redes y servicios telemáticos, Magister en Software libre, Doctor en Ingeniería. Docente Investigador Asociado. - UNAD sixto.campana@unad.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)



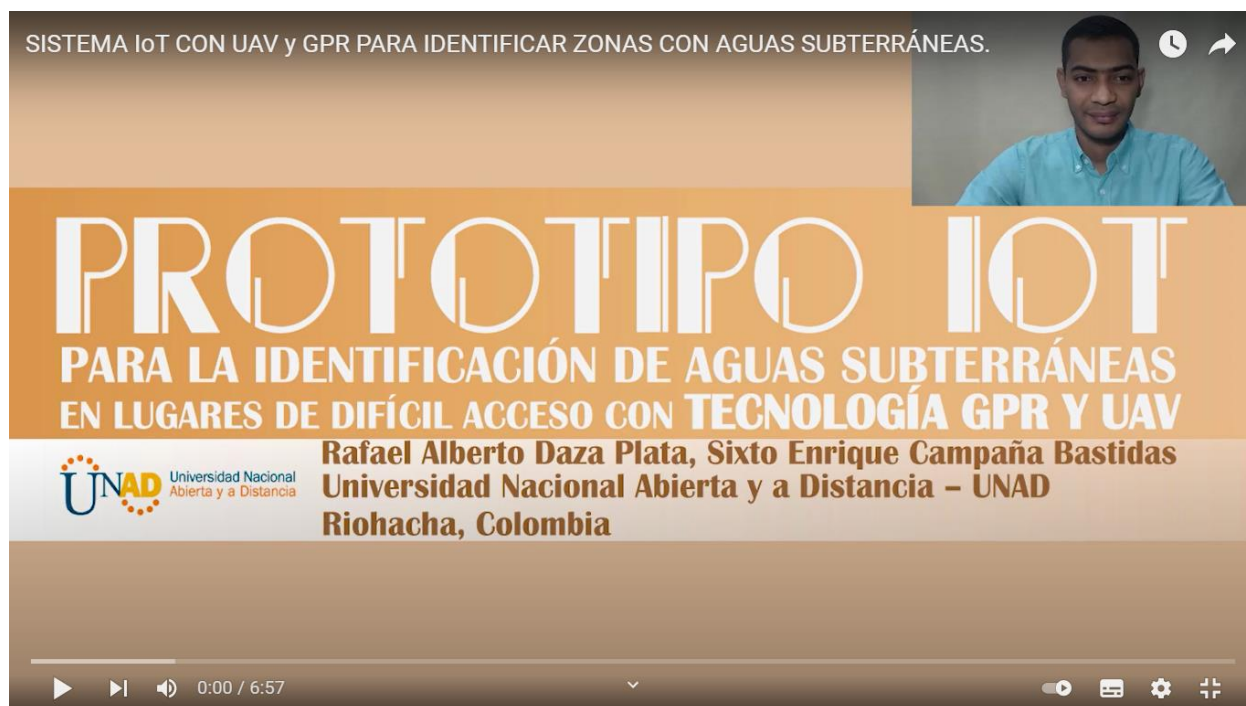
Anexo C. Reconocimiento Premios ACOFI 2020 en categoría Avances en investigación.



Anexo D. Video institucional.

En el 2020 también se realizó el video del Sistema IoT en el siguiente enlace:

https://youtu.be/w_6ogns_N2k



Anexo E. Imagen del poster del Prototipo IoT.

PROTOTIPO IOT

PARA LA IDENTIFICACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LUGARES DE DIFÍCIL ACCESO CON TECNOLOGÍA GPR Y UAV

Rafael Alberto Daza Plata, Sixto Enrique Campaña Bastidas
Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Riohacha, Colombia

1 El sistema propuesto se basa en el diseño de un prototipo IoT (Internet de las Cosas) que permite explorar el subsuelo

2 Controlado remotamente por una terminal conectada a Internet, ya sea un teléfono móvil, una Tablet o un computador, donde se puede visualizar el recorrido que hace el dispositivo y los hallazgos que identifique

3 Este proceso se apoya en el uso de tecnologías GPR (de penetración de tierra) y UAV (vehículo aéreo no tripulado)

CONEXIÓN

PROTOTIPO IoT

Componentes: Antena Radio Control, GPS Internet, Telemetría, Sistema De Control, Motores Helices, Batería, Antenas (RX, TX), Agua Subterránea Identificada, Ruta De Vuelo, Estación Terrestre, Radio Control, Mission Planner, SATELITE (GPS + Internet), Usuario, UAV, GPR.

PROBLEMA	OBJETIVO
01	02
El departamento de la Guajira en Colombia, es un territorio con escasez de agua, que vive periodos de sequía extrema, generando pobreza, destrucción y muchas muertes a causa de la falta del preciado liquido	Contribuir a la identificación de fuentes hídricas en el departamento de la Guajira en Colombia, las cuales pueden contribuir en el desarrollo rural de la región, permitiendo la explotación agrícola y ganadera de manera satisfactoria
TIPO DE INVESTIGACIÓN	RESULTADO
03	04
La investigación es de tipo exploratoria y conclusiva, dado que se han analizado diseños previos de dispositivos similares y se está proponiendo uno específico y orientado al problema identificado	Este proyecto busca articular estos aspectos para llegar con soluciones que beneficien a una comunidad y se apoyen en la tecnología para propender por un mejor vivir

BENEFICIOS

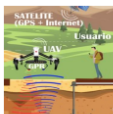
- Identificación de aguas subterráneas viables para la agricultura
- Mitigación de los riesgos de pérdidas en los cultivos por sequías extremas
- Reducción de tiempo y costo en el proceso de prospección
- Reducción de costos frente a otras técnicas convencionales
- Lograr una navegación autónoma completa del proceso de prospección.
- Alta disponibilidad de datos recolectados en el tiempo

CONCLUSIONES

- El prototipo propuesto es una alternativa para solucionar los problemas de obtención de agua en el sector agrícola del departamento de La Guajira
- Su implementación proporcionaría una mejora en la calidad de vida y la producción del sector agrícola en el departamento
- Facilitaría el acceso del agua a los habitantes que trabajan y viven de las actividades agrícolas del departamento

CAPA FREÁTICA
ACUÍFERO LIBRE

Anexo F. Propuesta para Premios de Investigación de América Latina de Google (LARA).



PROPOSAL – Google LARA 2020

TITLE: IOT SOLUTION WITH UAV AND GPR TO IDENTIFY ZONES WITH GROUNDWATER IN DESERT AREAS OF LA GUAJIRA - COLOMBIA

¹ Rafael Alberto Daza Plata

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Riocha - La Guajira, Colombia

+57 3125173298

dazaplata25@hotmail.com

² Sixto Enrique Campaña Bastidas, Ph.d

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Carrera 44 # 20B – 45 - Pasto, Colombia

+573158122768

sixto.campana@unad.edu.co

Abstract: Water is the vital resource of people's lives, in Colombia there are areas that have an abundance of this natural element, but in others its scarcity is evident and forces people living in these places to change their ways of life and try to obtain this liquid in various ways. One of them is looking for water sources in the subsoil, where they cannot be easily perceived, but that, aided by technology, it is feasible to do so. This research advance refers to the design of a GPR system with UAV for the identification of groundwater in the department of La Guajira in Colombia, which is a territory with a great shortage of this precious liquid, which lives periods of extreme drought, generating poverty, malnutrition and many deaths due to this problem, among other causes. The proposed system is based on the design of a prototype IoT (Internet of Things) that allows exploring the subsoil, remotely controlled by a terminal connected to the Internet, be it a mobile phone, a tablet or a computer, where it can view the route that the device makes and the findings that it identifies, this process is supported by the use of GPR (Ground Penetration Radar) and UAV (unmanned aerial vehicle) technologies; the first to make analysis of the subsoil that covers the device and the second to make the overflight of the target places and that it has been estimated could have groundwater. The main objective of the proposed system is to contribute to the identification of water sources in the department of La Guajira in Colombia, which can contribute to the rural development of the region, allowing satisfactory agricultural and livestock exploitation. The research is exploratory and conclusive, given that previous designs of similar devices have been analyzed and one specific and oriented to the identified problem is being proposed. This project seeks to articulate these aspects to arrive with solutions that benefit a community and rely on technology to promote a better life.

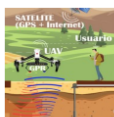
Research Goal

General objective:

- Support the agricultural sector of the department of La Guajira, to mitigate the risk of crop loss due to extreme drought events, through the development of an IoT prototype with UAV and GPR technologies, allowing the identification of groundwater to help correct the need for this important liquid for crops

Specific objective:

- Develop a state of the art of the proposed research topic, containing related bibliographic references and other sources of information that include methods and techniques of prospecting for groundwater using GPR and UAV.
- Design the IoT groundwater tracking system with GPR and UAV, according to the variables of maximum penetration depth, necessary hardware technologies, UAV autonomy time and other related ones.
- Implement the prototype system for groundwater identification through GPR on board a UAV, in accordance with the determined design.
- Perform acceptance tests and adjustments to the proposed system.
- Presentation of the system implemented in different knowledge dissemination events.



Problem statement

La Guajira is one of the regions most vulnerable to climate change and is subject to increasingly intense hydrometeorological phenomena, which cause droughts, affecting the availability of water for different uses (Sofía, López, Chirino, Lozano Espitia, & Páez Rodríguez, 2017). One of the sectors that is being most affected is agriculture, since in the region between 80 to 98% of agricultural items depend on rain (León, Acosta, & González, 2015). On the other hand, the low vocation of the soil for agricultural activity makes food production more difficult than in other regions, which is divided into agricultural, livestock, forestry production and agroforestry.

According to the Rural Agricultural Planning Unit (UPRA) of the Ministry of Agriculture, only 5% of the land in La Guajira has an agricultural vocation and 2% livestock (UPRA, 2019). If these values are compared with the vocation of the entire national soil, 19% and 13% respectively, we observe the difficulty that the inhabitants in La Guajira, especially the communities in rural areas, have in ensuring their food sustainability. Failure to cover this need can have terrible consequences, such as chronic malnutrition, as manifested (León, Acosta, & González, 2015) in the Analysis of vulnerability of the territory due to drought in the department of La Guajira, Colombia, from a vision based on unmet basic needs: "35 out of every 100,000 children under the age of 5 die from malnutrition, according to Dane figures. In La Guajira, as of 2018, 123,200 children in that age range were counted. "Less rain, less agriculture, therefore, there are no proteins to feed communities"

Climate change and climatic variability have altered precipitation patterns in the region, generally affecting the agricultural sector, but to a greater extent the agricultural sector that is highly dependent on rain. It is estimated that a high percentage of households live from agriculture and livestock and are not prepared to face periods of extreme drought, and as has already happened, serious consequences have also been reported in the agricultural and livestock sectors. The Colombian Agricultural Institute reported that the lack of water has caused the death of more than 20 thousand head of cattle (León et al., 2015). Due to this harsh situation, the agricultural sector, with the help and guidance of the Regional Autonomous Corporation of La Guajira (CORPOGUAJIRA), has had to choose to develop activities to maintain its production, such as the distribution of water through tank vehicles, which generate a significant contribution to prolong its operation for a longer period of time, support in the process of restoration and maintenance of Mills and wells with the aim of increasing the availability of water for communities with little access to it and high demand (Corporation Autonomous Regional Of La Guajira - CORPOGUAJIRA, 2018).

Description of the work you'd like to do

Professor Sixto Campaña and the student Rafael Daza Plata, from Universidad UNAD are going to work in the development the IoT groundwater tracking system with GPR and UAV, according to the variables of maximum depth of penetration, necessary hardware technologies, UAV autonomy time and other related ones, that allow identifying water in this area of Colombia, affected by poverty and the need for this vital resource.

Outcomes and results

- A document with the results to identify and characterize the region and the population studied.
- A prototype and technical documents of the IoT Solution
- A software used to collect and analyze the data transmitted by the IoT Solution.
- A smartphone app which transmits data to the software located in the information center.
- Participations in scientific events, like conferences and journal publications.

Prior work:

La Guajira, is located in the extreme northwestern part of Colombia and approximately half of its population is indigenous with high levels of poverty, in addition about 50 percent of the population of La Guajira is in a situation of poverty (León et al. , 2015). In addition, the department has had



negative effects on the population's health and on food security levels due to the decrease in rainfall in recent years. In the same way, it is also manifested that the prolonged drought has exacerbated the levels of malnutrition in the population, including children under 5 years of age and this has caused the department to be alert due to the effects of food shortages, the lack of water and livelihood insecurity, which has affected more than 63,000 people, most of them concentrated in the municipalities of Riohacha, Uribia and Manaure.

Even serious consequences have also been reported in the agricultural and livestock sectors. The Colombian Agricultural Institute reported that the lack of water has killed more than 20,000 head of cattle. This puts food security and the agricultural sector of the department of La Guajira at risk, therefore, the proposed solution seeks to face the challenges posed by climate change and climate variability.

Aware of the importance of addressing the link between food security and water security in the context of climate change, work is underway to use groundwater prospecting using GPR on board a UAV; a technology that allows adequate management of underground waters at a lower cost for the benefit of the agricultural sector of the department of La Guajira.

The IoT solution is made up of 5 subsystems, which are:

- Flight control subsystem, consisting of a microcomputer (Raspberry Pi), a UAV flight controller and common positioning sensors (IMU, barometer).
- Communication subsystem.
- Precise positioning subsystem to provide precision.
- Radar subsystem, which is made up of HackRF One and RX and TX antennas.
- A ground station, which receives radar measurements and positioning and georeferencing information, and processes it to map radar measurements with centimeter-level precision. Georeferenced measurements are processed in conjunction with the underground imaging algorithm to create radar images of the ground and objects buried in it.

Data policy

All members of the project approve the following terms and conditions: 1) the research group accept to share information related to publications, data and algorithms as a result of the work developed for the project IoT Solution GroundWater, 2) the results of the project can be used by the scientific community without restrictions.

References

León, E., Acosta, C. M., & González, A. M. (2015). Análisis de vulnerabilidad del territorio por sequía en el departamento de La Guajira, Colombia, a partir de una visión basada en necesidades básicas insatisfechas. *ACA. Pregrado Civil*, 8. Retrieved from <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2706>

Sofía, L., López, B., Chirino, V. G., Lozano Espitia, D. C., & Páez Rodríguez, A. (2017). Estudio para la implementación de una planta desalinizadora y distribución del agua potable en la Alta Guajira. Pontificia Universidad Javeriana.

UPRA, U. de P. R. A. (2019). Gestión de información agropecuaria y planificación del desarrollo agrícola La Guajira. Retrieved April 8, 2020, from <https://sites.google.com/a/upra.gov.co/presentaciones-upra/departamental/la-guajira>