



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

**POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA DE LA INDUSTRIA 4.0 EN EL SECTOR  
HIDROAGRÍCOLA**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**EMMANUEL NAVA PERDOMO**

TUTOR:  
DR. NAHÚN HAMED GARCÍA VILLANUEVA  
INST. MEXICANO DE TEC. DEL AGUA

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Pedroza González Edmundo

Secretario: Dr. Ballinas González Héctor Alonso

1er Vocal: Dr. García Villanueva Nahún Hamed

2do. Vocal: M.I. González Verdugo José Alfredo

3er Vocal: M.I. Cervantes Jaimes Claudia Elizabeth

Lugar donde se realizó la tesis:

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**JIUTEPEC, MORELOS**

**TUTOR DE TESIS**

**DR. NAHÚN HAMED GARCÍA VILLANUEVA**



**FIRMA**



*A Dios, a mis padres,  
a mis abuelos y a mis hermanos.*



## *Agradecimientos*

A Dios por su infinito amor.

A mis padres, quienes con su ejemplo me han enseñado que no hay nada imposible en esta vida, quienes se esfuerzan y luchan por ser mejores padres, hermanos, hijos y mejores seres humanos, por presionarme a sacar lo mejor de mí y apoyarme en cada decisión que he tomado.

A mis hermanos, con quienes me siento invencible, por su amor y apoyo incondicional, por ser mis grandes compañeros de aventura... quienes siempre están a mi lado.

A mis abuelos Mercedes Colín, Pablo Perdomo y Encarnación Nava, seres de luz que me enseñaron a jamás darme por vencido por más difícil y complicada que se torne la vida.

A Jocelyn, por su paciencia y motivación.

A mis tías quienes me han apoyado en cada proceso de mi vida.

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Nahún Hamed García Villanueva, tutor de este trabajo, por su confianza, apoyo y estímulo para enfrentar los retos ingenieriles respecto al tema agua, por su visión y ética profesional, trabajando siempre en mejorar las condiciones actuales del país.

A mi comité de evaluación por sus observaciones y comentarios.

A mis maestros del posgrado, por las exigencias y retos planteados.

A mis amigos del posgrado, por su apoyo en momentos complicados.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el desarrollo de mis estudios.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por brindarme los conocimientos que ofrece el *Programa de Maestría en Ingeniería Civil* y ahora poder aplicarlos en el aspecto profesional.



# Índice

<b>Capítulo 1 Antecedentes</b> .....	12
<b>1.1 La cuarta revolución industrial y la agricultura</b> .....	12
<b>1.2 La problemática del agua crece cada día</b> .....	16
<b>Capítulo 2 Estado del arte</b> .....	19
<b>2.1 Beneficios de la aplicación de tecnologías de industria 4.0</b> .....	19
<b>2.2 Los datos y su importancia en el uso de tecnologías 4.0</b> .....	27
<b>2.3 La digitalización como medio para implementar las tecnologías 4.0</b> .....	30
<b>2.4 Diagnóstico de aplicación de las tecnologías 4.0</b> .....	32
<b>Capítulo 3 Objetivo y metodología</b> .....	39
<b>3.1 Objetivos</b> .....	39
<b>3.1.1 Objetivo general</b> .....	39
<b>3.2.2 Objetivos particulares</b> .....	39
<b>3.2 Justificación</b> .....	39
<b>3.3 Metodología</b> .....	40
<b>Capítulo 4 Tecnologías de la industria 4.0</b> .....	42
<b>4.1 Base de datos de las tecnologías derivadas de la industria 4.0</b> .....	42
<b>4.1.1 Sección 1 Procesos</b> .....	43
<b>4.1.2 Sección 2 Tecnologías</b> .....	44
<b>4.1.3 Sección 3 Bibliografía</b> .....	46
<b>4.2 Agricultura de Precisión u Agricultura 3.0</b> .....	48
<b>4.2.1 Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC)</b> .....	49
<b>4.2.2 Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)</b> .....	50
<b>4.2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)</b> .....	50
<b>4.2.4 Red de Internet</b> .....	51
<b>4.2.5 Maquinaria</b> .....	52
<b>4.2.6 Aplicaciones</b> .....	53
<b>4.2.7 Software</b> .....	55
<b>4.2.8 Sensores</b> .....	57
<b>4.3 Agricultura Inteligente u Agricultura 4.0</b> .....	59
<b>4.3.1 Automatización</b> .....	60



4.3.2 Robots Autónomos .....	61
4.3.3 Biotecnología.....	61
4.3.4 Impresoras 3D .....	62
4.3.5 Realidad Virtual .....	62
4.3.6 Realidad Aumentada.....	63
4.3.7 Redes Inalámbricas de Sensores .....	63
4.3.8 Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) .....	64
4.3.9 Teledetección o Percepción Remota .....	66
4.3.10 Computación en la nube (Cloud Computing).....	67
4.4 Pilares de las tecnologías derivadas de la industria 4.0 .....	68
4.4.1 Big Data (BD).....	68
4.4.2 Internet of Things (IoT).....	71
4.4.3 Inteligencia Artificial (IA) .....	76
4.5 Nuevas técnicas de Producción .....	79
4.5.1 Agricultura Vertical o Granjas Verticales .....	79
4.5.2 Hidroponía .....	79
4.5.3 Invernaderos .....	80
4.5.4 Biogranjas .....	80
4.5.5 Subirrigación .....	80
4.5.6 Agricultura de labranza mínima.....	81
4.5.7 Agricultura Hi-Tech.....	81
4.6 Nuevas herramientas.....	81
4.6.1 Blockchain.....	81
4.6.2 Benchmarking.....	82
4.6.3 (Building Information Modeling) BIM.....	82
4.6.4 Chatbots (Asistentes Virtuales).....	82
4.6.5 Fintech.....	82
4.6.6 Ciberseguridad .....	82
Capítulo 5 Caso de estudio: Distritos de Riego.....	84
5.1 Etapa 1: Recopilación de información.....	84
5.1.1 Aspectos generales de los Distritos de Riego.....	84
5.1.2 Características principales de los Distritos de Riego .....	85



5.1.3 Principales actividades dentro del Distrito de Riego.....	87
5.1.4 Problemáticas en los Distritos de Riego .....	90
5.2 Etapa 2: Diagnostico general.....	94
5.2.1 Distrito de Riego 016 “Estado de Morelos” .....	94
5.2.2 Nivel de digitalización del Distrito de Riego 016 “Estado de Morelos”.....	96
5.2.3 Condiciones actuales del Distrito de Riego 016 “Estado de Morelos”, Módulo 8 General Eufemio Zapata Salazar, A.C.....	97
5.3 Etapa 3: Propuesta de tecnologías aplicables para obtención y análisis de datos .....	100
5.3.1 Tecnologías utilizadas .....	100
5.3.2 Percepción Remota (PR).....	100
5.3.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	103
5.3.4 Antecedentes de aplicaciones tecnológicas percepción remota, sistemas de información geográfica, internet y aplicaciones .....	107
5.4 Etapa 4: Análisis del sector .....	111
5.4.1 Actividades a desarrollar .....	111
5.4.2 Definición de imágenes necesarias para cubrir la zona y parámetros cartográficos .....	112
5.4.3 Selección de imágenes en cuanto a presencia de nubosidad .....	113
5.4.4 Solicitud de imágenes al sistema Copernicus.....	113
5.4.5 Descarga de Imágenes Satelitales.....	114
5.4.6 Descomprimir RAR de Bandas.....	115
5.4.7 Pre-procesamiento con SNAP (Sentinel Application Platform).....	116
5.4.8 Corrección atmosférica con el complemento Sen2Cor .....	117
5.4.9 Remuestreo con el complemento resampling.....	118
5.4.10 QGIS Semi Automatic Classification .....	119
5.4.11 Contenedor virtual de bandas y combinaciones RGB .....	121
5.4.12 Calculadora ráster para índices: NDVI, SAVI, GNDVI y NDWI .....	125
5.4.13 Extracción por Mascara .....	134
5.5 Resultados de la obtención de datos y análisis digital.....	136
5.5.1 Análisis y caracterización con datos obtenidos por internet e instituciones .....	136
5.5.2 Digitalización de cuerpos de agua y parcelas no identificadas.....	144
5.5.3 Diagnostico del comportamiento del Módulo ASURCO y nivel de digitalización .	155
Capítulo 6 Conclusiones.....	163





<b>6.1 En relación con la base de datos .....</b>	<b>163</b>
<b>6.2 En relación con el caso de estudio.....</b>	<b>164</b>
<b>Siglas y abreviaturas .....</b>	<b>168</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>169</b>



## Índice de Ilustración

Ilustración 1 Evolución de las 4 revoluciones industriales, (Del Val, 2016). .....	13
Ilustración 2 Propuestas de implementación tecnológica partiendo de la digitalización (MAPSENS AGRO, 2019) .....	32
Ilustración 3 Principales campos en que se revisaran las tecnologías de mayor impacto en el sector hidroagrícola .....	40
Ilustración 4 Portada en Excel de la Base de Datos "Tecnologías 4.0" .....	43
Ilustración 5 Página de Internet que contiene la Base de Datos .....	47
Ilustración 6 Estadios de adopción de las TIC por los agricultores (Nagel, 2012). .....	49
Ilustración 7 Mapa para acceder a los datos expuestos por el API de Conservation Earth, recuperado: <a href="http://46.20.115.195/MasAgroTTF/api/">http://46.20.115.195/MasAgroTTF/api/</a> .....	55
Ilustración 8 Porcentaje de inclusión de dispositivos sensores en agricultura (Tovar Soto et al., 2019). .....	57
Ilustración 9 Digitalización de la agricultura, caracterizada por la recopilación e intercambio de datos de forma remota. (Adaptado de CEMA (2017)) .....	59
Ilustración 10 Se muestra el flujo de energía, agua, nutrientes y organismos de un ecosistema (Sutton, 2015).....	64
Ilustración 11 Onda electromagnética. Tiene dos componentes, campo eléctrico E y magnético. campo M, ambos perpendiculares a la dirección de propagación (Aggarwal, 2004).....	66
Ilustración 12 Sistemas embebidos de mayor uso en aplicaciones agrícolas(Tovar Soto et al., 2019) .....	72
Ilustración 13 Distribución de los 86 Distritos de Riego de México .....	85
Ilustración 14 Sistema de conducción en una zona de riego, (García, 2015).....	87
Ilustración 15 Distrito de Riego 016 Estado de Morelos .....	95
Ilustración 16 Datos Digitales del Distrito de Riego 016 Estado de Morelos .....	96
Ilustración 17 Bandas, radiometría y resolución de las imágenes Sentinel 2.....	102
Ilustración 18 Espectros visibles, fuente: Internet.....	102
Ilustración 19 Comparación de valores de pixeles claros y oscuros .....	103
Ilustración 20 Pagina de descarga del software QGIS .....	104
Ilustración 21 Componentes de un SIG (Santamaria, 2012). .....	105
Ilustración 22 El concepto de capas (Escobar, 2000).....	105
Ilustración 23 Zonas UTM, realizado por Peter H. Dana, de la universidad de Texas en 1997. ....	106
Ilustración 24 Datum geodésico WGS 84, (Squartecchis, 2019) .....	107
Ilustración 25 Programa Orcelis, recuperado: <a href="https://orcelis.com/precios/">https://orcelis.com/precios/</a> .....	109
Ilustración 26 Visor de identificación de parcelas agrícolas SIGPAC, recuperado: <a href="https://sigpac.asturias.es/VisorSigPacHTML5/">https://sigpac.asturias.es/VisorSigPacHTML5/</a> .....	109
Ilustración 27 Representación gráfica del sistema de información geográfica para distritos de riego (Velasco et al., 1994) .....	110
Ilustración 28 Flujo de Trabajo procesamiento de Imágenes Satelitales en Modelo SIG .....	112
Ilustración 29 Mallado de Imágenes Sentinel de México .....	113
Ilustración 30 Acceso al servidor de la ESA, recuperado: <a href="http://scihub.copernicus.eu/dhus">http://scihub.copernicus.eu/dhus</a> .....	114
Ilustración 31 Arreglo de carpetas con nomenclatura sugerida.....	116



Ilustración 32 Ventana de la página de descarga. ....	117
Ilustración 33 Proceso de corrección atmosférica con Sen2Cor. ....	118
Ilustración 34 Proceso de remuestreo con el complemento Resampling ....	119
Ilustración 35 Ventana para cargar imágenes procesadas en el repositorio de SCP ....	120
Ilustración 36 Ventana para recortar múltiples ráster en el repositorio de SCP.....	120
Ilustración 37 Ventana de construcción de ráster virtual ....	121
Ilustración 38 La creación de estas imágenes parte del paso de bandas a través de tres canales: rojo, verde y azul (gisadminbeers, 2017).....	122
Ilustración 39 Propiedades de la capa para composiciones NIR. ....	123
Ilustración 40 Color natural, combinación de bandas (4, 3, 2). ....	123
Ilustración 41 Infrarrojo (para vegetación es la combinación de bandas (8, 4, 3).....	124
Ilustración 42 Agricultura es la combinación de bandas (11, 8, 2). ....	124
Ilustración 43 Cuerpos de agua SWIR es la combinación de bandas (12, 8, 4).....	125
Ilustración 44 Calculadora ráster de QGIS.....	126
Ilustración 45 Reflectancia de las bandas según la vegetación (González et al.,2016).....	127
Ilustración 46 Resultado de cálculo de Índice NDVI.....	128
Ilustración 47 El valor del índice varía de -1 a 1, y el programa asigna colores para cada píxel en función de los valores calculados con las reflectancias, (Berrenchea, 2020).....	128
Ilustración 48 Presentación en mapa de colores para análisis de NDVI ....	129
<i>Ilustración 49 Presentación en mapa de colores para análisis de SAVI</i> ....	131
Ilustración 50 Presentación en mapa de colores para análisis de NDWI ....	132
<i>Ilustración 51 Presentación en mapa de colores para análisis de GNDVI</i> ....	133
Ilustración 52 Unificación de capa y asignación de valores para extraer la capa a trabajar.....	135
Ilustración 53 Resultado de la aplicación de la máscara de las parcelas.....	135
Ilustración 54 Disponibilidad de cuenca del río Amacuzac 2018.....	139
Ilustración 55 Zonas de pago de derechos de agua superficial y estaciones climatológicas operando 2018.....	140
Ilustración 56 Disponibilidad de acuíferos en el módulo de riego 08.....	141
Ilustración 57 Ordenamiento de aguas subterráneas 2018.....	142
Ilustración 58 Intensidad de la sequía que se presenta en la cuenca del río Amacuzac ....	143
Ilustración 59 Delimitación de parcelas, comparación de lo registrado en SINA y lo reportado en el DR016.....	144
Ilustración 60 Identificación de cuerpos de agua mediante índice (NDWI) 2018. ....	145
Ilustración 61 Identificación de cuerpos de agua mediante combinación de bandas falso color 2018. ....	146
Ilustración 62 Digitalización de cuerpos de agua por mes 2018.....	146
Ilustración 63 Identificación de cuerpos de agua mediante índice (NDWI) 2019. ....	148
Ilustración 64 Identificación de cuerpos de agua mediante índice (NDWI) 2019, aplicando método predictivo.....	148
Ilustración 65 Parcelas reportadas por el Distrito de Riego 016, identificadas por tipo de cultivo	150
Ilustración 66 Parcelas del Módulo de Riego ASURCO, información presentada por el DR016 y SINA 2018 .....	151
Ilustración 67 Resumen padrón de usuarios 2018.....	152



Ilustración 68 Parcelas identificadas en 2018 mediante índices. ....	153
Ilustración 69 Parcelas identificadas en 2019 mediante índices. ....	154
Ilustración 70 Mascara índice NDVI de parcelas del Módulo de Riego ASURCO, octubre 2019. ....	158
Ilustración 71 Mascara índice NDVI de parcelas del Módulo de Riego ASURCO, abril 2019. ....	158
Ilustración 72 Parcela identificada con problema de variabilidad, en el módulo ASURCO 2018..	159
Ilustración 73 Variabilidad de salud de la planta dentro de la parcela.....	159



## Índice de Tablas

Tabla 1 Ventajas de datos digitalizados sobre analógicos, (Escobar, 2000). .....	31
Tabla 2 Comparación del sensor relacionado con el suelo (Mathivanan & Jayagopal, 2018). .....	58
Tabla 3 Comparación del sensor relacionado con la planta (Mathivanan & Jayagopal, 2018). .....	58
Tabla 4 Comparación del sensor relacionado con el clima (Mathivanan & Jayagopal, 2018). .....	58
Tabla 5 Sensores y sus bandas espectrales, (García-Cervigón & José, 2015). .....	65
Tabla 6 Resumen de la aplicación de grandes datos en la agricultura inteligente y cuestiones críticas (Mathivanan & Jayagopal, 2018). .....	69
Tabla 7 Diferentes características de las tecnologías de conectividad inalámbrica IoT (Nota: no exhaustivo) .....	73
Tabla 8 Títulos de agua nacionales otorgados a los módulos del Distrito de Riego 016, Recuperado <a href="https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx">https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx</a> .....	97
Tabla 9 Diagnóstico de eficiencias de riego (CEAGUA. 2019) .....	99
Tabla 10 Sensores satelitales de alta resolución con resoluciones espaciales de 5-10 m en bandas multiespectrales (Yang, 2018). .....	101
Tabla 11 Relación de Imágenes SENTINEL .....	114
Tabla 12 Información digital referente al análisis de Distritos de Riego .....	136
Tabla 13 Cuerpos de agua identificados por mes del año 2018 .....	147
Tabla 14 Cuerpos de Agua identificados por mes del año 2019 .....	149
Tabla 15 Resumen de datos obtenidos del SIG 2018 proporcionado por el DR016 .....	152
Tabla 16 Archivos digitales del Módulo de Riego para su análisis. .....	155
Tabla 17 Valores de índice NDVI de la máscara del Módulo de Riego ASURCO 2018. .....	156
Tabla 18 Valores de índice NDVI de la máscara del Módulo de Riego ASURCO 2019. .....	157
Tabla 19 Cambio de calidad y uso de suelo de las parcelas del Módulo de Riego ASURCO .....	160



## Capítulo 1 Antecedentes

### 1.1 La cuarta revolución industrial y la agricultura

Este trabajo se circunscribe en dos asuntos, la agricultura y las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial, en el capítulo correspondiente se describe detalladamente dicho concepto. El concepto de Revolución Industrial está ligado a cambios en las condiciones tecnológicas de producción. A lo largo de la historia hemos visto varios procesos de transformación radical donde el avance tecnológico ha impactado sustancialmente en las condiciones materiales y sociales de producción (Basco et al., 2018). Por ahora se plantea la enorme y potencial ventaja que supone el uso de tales tecnologías puesto que las previsiones elevan la población de 122 a 150 millones de habitantes en México además es necesario tener un mayor respeto por el entorno y los recursos naturales, sobre todo el recurso agua, es aquí en donde las tecnologías derivadas de la Cuarta Revolución Industrial, es actualmente el tema de debate, puesto que los impactos y el crecimiento que se está generando a través de su adopción es cada vez más fuerte, el proceso de implementar las tecnologías está en marcha desde hace ya algún tiempo y poco a poco se irán extendiendo de forma imparable, debido a que los resultados que se han obtenido al aplicar las tecnologías demuestran los beneficios que aporta su uso en términos de eficiencia, impacto ambiental u optimización de los recursos, entre muchos otros como lo indica Ana Inés Basco especialista en Integración y Comercio de INTAL-BID “la promesa de la Inteligencia Artificial (IA) es permitirle al sector agropecuario duplicar la producción de un modo sustentable y gestionar el negocio de manera más rentable”. Para esto, serán clave la biotecnología, la robótica y tecnologías como la IA, el Big Data, la simulación y la geoestadística. Según una investigación de Sensus, una consultora del sector tecnológico en el agua indicó en 2013 que las últimas redes inteligentes de agua podrían ahorrar a la industria US \$12.500 millones al año.

La relación existente entre las revoluciones industriales y la agricultura se trata de importantes aportaciones y desarrollos que han mejorado las condiciones de producción, Campero (2016), menciona que las revoluciones industriales son fenómenos económico-sociales que transforman profunda y sustancialmente a la humanidad. Son procesos que modifican las maneras de producir bienes, que cambian las formas, modos, relaciones de vida de los hombres, e inclusive las visiones sobre el mundo y las ideas de las personas.

Desde mediados del siglo XVIII hasta nuestros días han sucedido cuatro revoluciones industriales que son las siguientes:

#### **Primera revolución industrial**

La primera revolución industrial supone la transformación de las fuerzas productivas y de las relaciones de producción. Su resultado fue el desarrollo del capitalismo industrial.

Modificaciones en las condiciones técnicas que derivaron en el crecimiento de las capacidades productivas mediante el avance tecnológico y la organización del trabajo.

Tiene como ejes principales la máquina de vapor y la introducción de las máquinas en los procesos de producción.



## Segunda revolución industrial

Si bien muchas de las transformaciones que se daban en el mundo se habían originado en la primera revolución industrial, el proceso de cambios técnicos durante la segunda revolución se constituye en uno de los históricamente más trascendentes debido a que las innovaciones desarrolladas adquirieron el carácter de modernidad, sentando las bases tecnológicas del siglo XX y distanciándose de las que cimentó la primera revolución.

Desde la gestión de las nuevas tecnologías se desarrollan importantes innovaciones científicas en la organización del trabajo a través de la automatización y especialización (Taylor y Ford) que permiten el desarrollo de líneas de montaje y producción a gran escala, reduciendo costos e incrementando de forma importante la productividad.

## Tercera revolución industrial

Gracias a un esfuerzo conjunto entre las universidades y el sector productivo implementándose el Desarrollo de la Investigación (conocido como I+D), que en términos corrientes se conoce como investigación tecnológica basada en la ciencia avanzada. Este esfuerzo terminó generando las bases para la tercera revolución con empresas que funcionaban a plenitud resolviendo problemas tecnológicos, inventando nuevas máquinas y equipos y aprovechando los nuevos avances científicos con fines productivos.

## Cuarta revolución industrial

La cuarta revolución industrial (4RI) se está construyendo sobre los avances de la 3RI que ha estado ocurriendo desde mediados del siglo pasado. Se caracteriza por una fusión de tecnologías que está borrando las líneas entre las esferas de lo físico, lo digital y lo biológico. Supone una agresiva implantación de tecnologías emergentes en el ámbito organizacional que facilitarán el acceso a múltiples oportunidades de transformación.

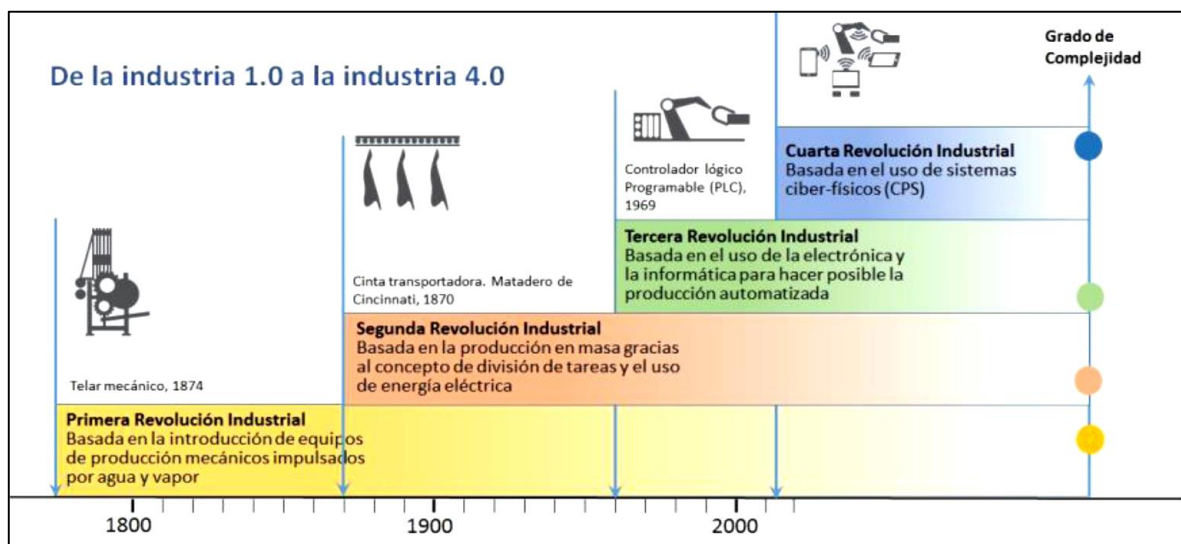


Ilustración 1 Evolución de las 4 revoluciones industriales, (Del Val, 2016).

La primera revolución tecnológica en la agricultura hizo impresionantes avances, puesto que los rendimientos de cereales en el este de Asia aumentaron un 2.8 por ciento al año, o más del 300 por ciento durante el período, habilitado por las prácticas agrícolas modernas,



incluyendo riego, uso de fertilizantes y pesticidas, y el desarrollo de cultivos nuevos y más productivas variedades (BANCO MUNDIAL, 2008), de aquí la importancia de considerar las tecnologías derivadas de la cuarta revolución industrial como una gran aliada en el sector hidroagrícola.

La cuarta revolución industrial también reconocida como la industria 4.0 podría definirse como la integración de tecnologías, por ejemplo, Big Data Análisis, Servicios en la nube, Impresión 3D, Ciberseguridad, Robots autónomos, Internet de las cosas, sensores inalámbricos, realidad aumentada, simulación, integración horizontal, Integración vertical que permite la transformación del funcionamiento de las organizaciones junto con cambios importantes en los modelos de negocio y procesos de fabricación (Ribeiro et al., 2018).

Raúl Torres (2003), menciona que la Cuarta Revolución Industrial implica una especie de “fusión óptica” existente entre ciencia y tecnología de revoluciones anteriores, a tal punto que para estos días es casi imposible desvincularlas, lo cual resulta también en el campo de la producción, imposibilitando el aislamiento de la industria y la sociedad industrializada.

Según el Instituto Meteorológico Finlandés, las actividades agrícolas son muy sensibles al clima y al tiempo. A partir de la temperatura, la radiación solar, la evaporación, la velocidad del viento, las precipitaciones, la humedad relativa y la métrica de la evapotranspiración es posible caracterizar los aspectos agro-climatológicos locales y obtener conocimientos que sirvan de apoyo a las decisiones relacionadas con la mejor planta o las mejores variedades que se vayan a cultivar en determinada región. Los avances tecnológicos y la aplicación de la tecnología de la información para reunir, almacenar y analizar datos pueden contribuir a las mejoras mundiales de la producción agrícola y ganadera y son grandes herramientas de ayuda para superar los desafíos mencionados anteriormente (Goya et al., 2014).

Ante los retos que enfrenta la producción de cultivos con relación al consumo hídrico y el respeto por el medio ambiente, la tecnología tiene cada día mayor aplicación en la agricultura y es de reconocer que su campo de actuación trasciende a las actividades que se desarrollan a nivel parcelario y se encuentran en prácticamente todo el sistema del sector hidroagrícola, manteniéndose en constante evolución, el uso de sensores, instrumental y sobre todo el internet para el manejo y operación de los recursos, por lo que existen muchas empresas, países y autores que expresan su interés por exponer las tecnologías emergentes y los pasos que están siguiendo para su aplicación a la industria agrícola. La información existente respecto a las tecnologías derivadas de la industria 4.0, es muy amplia, la siguiente recopilación de trabajos indican la importancia de investigar las tecnologías, sus beneficios, utilización y recomendaciones realizadas para poder adaptarlas al sector hidroagrícola a partir de su estudio.

López-Pintor (2016), en su estudio respecto al análisis de casos de estudio sobre Industria 4.0 y su clasificación según sectores de actividad y departamentos empresariales señala que sería interesante poder cuantificar los beneficios que puede aportar el hecho de implementar un entorno inteligente dentro de una fábrica, comparando variables como productividad, ahorro de costes, mermas o eficiencia energética antes y después de la implementación de un sistema acorde a la Industria 4.0, así también nos dice que: siguiendo la misma línea de su trabajo, sería interesante ampliarlo añadiendo más tecnologías novedosas, con proyección o simplemente que puedan ser importantes en el ámbito de la Industria 4.0, así también nos dice que, siguiendo la misma línea de su trabajo, sería interesante ampliarlo añadiendo más





tecnologías novedosas, con proyección o simplemente que puedan ser importantes en el ámbito de la Industria 4.0.

Sin duda, la transformación del sector agrícola tiene que pasar por los medios digitales e involucrar a las tecnologías derivadas de la industria 4.0, si se quiere desarrollar una actividad competitiva y sostenible. Las nuevas técnicas agrícolas, que forman parte de la cuarta revolución industrial, han apoyado para mejorar la capacidad de monitoreo y toma de decisiones, tales como navegación por satélite y redes de sensores, computación en red, computación ubicua y la informática sensible al contexto están apoyando ese dominio para mejorar la capacidad monitoreo y toma de decisiones en el campo (Aqeel-ur- & Zubair A., 2012).

Ahora hay conceptos emergentes tales como la agricultura precisa, que busca que las prácticas agrícolas se vuelvan más exactas en todas las áreas e integra el análisis de datos con la ciencia de manera que se puedan tomar decisiones agrícolas científicas. Este concepto se vuelve cada vez más prevalente alrededor del mundo con el uso de tecnologías tales como: GPS, sensores en la tierra, información climática y IoT (el internet de las cosas) para tomar decisiones relacionadas a la aplicación de fertilizante, irrigación, tiempo de cosecha y espaciado de semillas. La agricultura precisa impulsa el rendimiento de las cosechas de manera significativa mientras optimiza el uso de recursos agrícolas al determinar la cantidad justa de aplicaciones necesarias. Se espera que el mercado de la agricultura precisa alcance los \$10.23 billones de dólares para el año 2050, con una Tasa de Crecimiento Anual Compuesto del 14.2% (PRIMORDIALES, 2018).

La agricultura 4.0, mira tanto el lado de la demanda y el lado de la cadena de valor / suministro de la ecuación de escasez de alimentos, utilizando no simplemente la tecnología, sino la innovación para abordar las necesidades reales de los consumidores, la reingeniería y cadena de valor. La agricultura 4.0 ya no tendrá que depender de aplicar agua, fertilizantes y pesticidas en todo el campo, en cambio los agricultores usarán las cantidades mínimas, o incluso eliminarlos por completo del suministro cadena. Podrán cultivar en zonas áridas y utilizar recursos abundantes y limpios como el sol y agua de mar para cultivar alimentos (Clercq et al., 2018).

Matabi (2018), indica que esta evolución industrial es una de las grandes apuestas de la unión europea para el sector agroalimentario. La recolecta e identificación de datos se convierte en herramienta indispensable para la trazabilidad, el impacto medioambiental y la optimización de los recursos. Las líneas de investigación y desarrollo tienden a la gestión de bases de datos, ciberseguridad, conectividad a través de sistemas de comunicación, redes y sistemas integrados.

Torres-Sánchez et al. (2015), indican en su artículo de monitoreo de alto rendimiento con vehículos aéreos no tripulados los beneficios que conlleva la implementación y uso de las nuevas tecnologías identificando los problemas asociados a deficiencias de suelo o cultivo, o al diagnóstico de patologías arbóreas, además los mapas creados permiten adoptar una estrategia, para el manejo específico del sitio de zonas homogéneas, basadas en campo archivado o variabilidad espacial arbórea, en el contexto de agricultura de precisión, se podría aumentar los rendimientos económicos netos de los agricultores al economizar los insumos (fertilizantes, pesticidas, agua, etc.) y el campo, operaciones (aplicación de plaguicidas, riego, recolección, poda, etc.).



En 2015 una de las conclusiones del Foro Agrario, fue que las nuevas tecnologías de la información y de las comunicaciones son medios imprescindibles para integrar la nueva economía a nuestra agricultura y nuestro mundo rural, haciendo que sus empresas adopten el modelo de trabajo en red y accedan a la información y al conocimiento necesario para impulsar las innovaciones requeridas.

Por todo lo anterior la importancia de actualizarse en cuanto a las tecnologías emergentes, aplicaciones y herramientas que han surgido tomando la experiencia que diversos países y diversas instituciones están implementado para el uso adecuado de sus recursos, (hídrico, energético, suelo, aire, ambiente) y mejorar sus rendimientos en los cultivos.

## 1.2 La problemática del agua crece cada día

El acceso al agua potable es un derecho humano y se encuentra en el art. 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En 2014, según cifras del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en México 9.9 millones de personas no tenían acceso al agua en sus viviendas. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), para el 2025, mil 800 millones de personas vivirán en zonas de escasez de agua si no se previene su contaminación y desperdicio, así también se proyecta que para el año 2050 “al menos un 25 % de la población mundial viva en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce” (ODS, 2017); por ello, la concientización sobre el cuidado del agua, evitar su desperdicio y contaminación, debe ser una responsabilidad de la sociedad en su conjunto.

El riego en el mundo consume actualmente del orden del 70% del insumo total del agua que consume y utiliza el hombre en sus actividades personales y productivas. Esta cantidad aumentará en un 14% en los próximos treinta años, ya que la zona de regadío se ampliará en un 20%. Hacia 2030, el 60% del total de las tierras potencialmente regables se encontrarán en explotación. De los 93 países en desarrollo estudiados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), diez están ya utilizando un 40% de su agua dulce renovable para regadío, que es el nivel a partir del cual puede tornarse difícil elegir entre la agricultura y otros usos del agua (United Nations, 2003).

### **La demanda mundial de alimentos aumentará por:**

- a) Crecimiento demográfico. Más de 2,000 millones de nuevos habitantes (7,300 millones a 9,700 millones).
- b) Desarrollo económico. Más de 2,000 millones de habitantes demandaran una dieta alimentaria calóricamente más rica (2,760 a 3,250 Kcal/hab/día).
- c) Sectores de la población no cubiertos. 815 millones de habitantes en condiciones de desnutrición (200 millones son niños).
- d) Efectos del mercado. Importaciones y exportaciones. Para cubrir la demanda al 2050, la producción deberá aumentar 60%.

Este reto exige una gestión sostenible de los recursos agua y suelo:



- Incrementar el rendimiento por unidad de superficie y la eficiencia en México, cuya población pasará de 122 a 150 millones de habitantes, se debe considerar que la superficie bajo riego se incrementará entre 1 y 1.5 millones de hectáreas, la de temporal en 4 millones y el rendimiento por unidad de superficie se tendrá que elevar en un 34.5%, para lo cual en las zonas de riego la eficiencia global se deberá mejorar en no menos de 10 puntos porcentuales (FAO, 2009).

El Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI), informa que la degradación severa de tierras agrícolas resulta en pérdidas de 5 a 10 millones de hectáreas anualmente y que la producción se encuentra en constante declive en un área incluso mayor.

Clercq et al., (2018), indica que la tierra de cultivo del mundo se está volviendo cada vez más inadecuada para la producción: basado en ciertas medidas: el 25% de toda la tierra agrícola ya está clasificada como altamente degradado, mientras que otro 44% está moderada o ligeramente degradado, otro dato a considerar y se considera importante por la erosión producida en el suelo, es que aproximadamente el 80 por ciento de la deforestación global es impulsado por las preocupaciones agrícolas, mientras despeja la vegetación para dar paso a tierras de cultivo.

Otro desafío para lograr la seguridad alimentaria es el cambio climático global. Este fenómeno no sólo afectará el nivel de producción sino la calidad de las cosechas por las altas temperaturas, sequía, inundación y mayor incidencia de plagas y enfermedades (Vermeulen et al., 2012).

Lima et al., (2011), mencionan que, los efectos del cambio climático en la agricultura causan una gran influencia en su propio desempeño ambiental, productivo y económico. Por ejemplo, la producción agrícola es sensible a dos amplias clases de efectos inducidos por el clima: 1) los efectos directos producidos por cambios en la temperatura, precipitación y concentraciones de dióxido de carbono, y 2) los efectos indirectos que ocurren mediante los cambios de humedad del suelo y la distribución y frecuencia del ataque de plagas y enfermedades.

Muchas regiones del mundo han alcanzado el límite de aprovechamiento del agua, lo que las ha llevado a sobreexplotar los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, creando un impacto negativo en el ambiente. En los países en los que se depende del agua subterránea para el riego, como es el caso de México, el exceso de extracción está provocando que los niveles freáticos de agua dulce estén descendiendo a un ritmo muy alarmante. Aunado a lo anterior, el 77% del agua concesionada en México es utilizada en la agricultura (Salazar et al., 2014).

El uso eficiente del agua de riego deberá mejorar lentamente hasta alcanzar los niveles óptimos para cubrir la demanda de la población y gracias a la tecnología y a una mejor gestión del agua de riego esto puede ser posible. La Industria 4.0 que acompaña a la IV Revolución Industrial se está incorporando de manera paulatina en las actividades productivas del sector agrícola nacional. Si bien, cada día es más común encontrar evidencias de esta incorporación, es de reconocer que no se percibe que sea de manera ordenada y planificada, sino que más bien es de forma circunstancial derivado de promociones y acciones individuales, como lo indica Ian Elkins en 2013, editor de Global Water Intelligence, un centro de investigación: “Ha habido un gran aumento en el número de empresas que ofrecen productos basados en las



tecnologías destinados a ayudar a las empresas y a los agricultores a utilizar el agua de manera más eficiente”, lo que abre un espacio de oportunidad para realizar una revisión del potencial de aplicación, bajo una visión integral que considere todos los espacios de actuación en las diferentes áreas y actividades productivas en que la Industria 4.0 puede contribuir al mejoramiento de las actividades productivas del sector hidroagrícola en México.

Mathivanan & Jayagopal (2018), mencionan que el riesgo y la gestión del agua, el riego y la infraestructura inadecuada son algunos de los problemas que enfrentan agricultores mientras cosechan; conduciendo a una reducción del rendimiento del cultivo y una pérdida para el agricultor, aunado a esto se tiene que, la mayoría de los problemas en la agricultura se deben a la inestabilidad; cambio en el clima, erosión del suelo, y pérdida de biodiversidad.



## Capítulo 2 Estado del arte

Dado que se pretende dar a conocer las necesidades del uso de tecnologías de la industria 4.0 en el sector agrícola, la manera en que beneficia su implementación y el impacto que generan sobre todo en el sector agua, se buscaron los antecedentes de las tecnologías aplicadas al sector hidroagrícola, además de aquellas aplicaciones similares que han adoptado estas tecnologías, principales recomendaciones, conclusiones que se han obtenido para aprender de ellas y las estrategias empleadas para la adopción de las mismas. Así mismo, se presentan los objetivos de desarrollo sostenible que se pueden alcanzar con la ayuda de estas tecnologías, se describen las principales limitaciones que se tienen para su implementación, la importancia que tienen los datos para poder implementar las nuevas tecnologías y obtener su máximo provecho, lo mismo que la digitalización como medio para adoptar las tecnologías discutiendo sus principales beneficios.

### 2.1 Beneficios de la aplicación de tecnologías de industria 4.0

Para superar la problemática del agua, del sector hidroagrícola y mitigar el deterioro de los recursos naturales, se hace necesario recurrir al uso de nuevas plataformas tecnológicas como la agricultura de precisión y agricultura 4.0, algunas de estas tecnologías utilizadas, existen desde hace algunos años, pero es en estos tiempos que empiezan a tener un desarrollo notable, esto se debe a la expansión tecnológica, que ha permitido una generación de nuevos procesadores, nuevos sensores, y nuevas capacidades de almacenamiento que han sostenido el desarrollo de nuevas técnicas de inteligencia artificial y en particular de visión (Russo et al., 2018).

Espinoza et al. (2017), menciona en su investigación “Tecnologías de la información y comunicación en la agricultura” que, para incrementar la producción y rentabilidad es necesario una mayor comprensión sobre la importancia de las TIC en la agricultura, enfrentando el mito de que éstas son relevantes solo en otros sectores, pero no así en el rural, cuando objetivamente acontece lo inverso, pues teniendo en cuenta la dispersión de los productores, la propagación de información vertiginosa y pertinente es vital en este sector, por lo anterior, resulta necesario conocer la gama de tecnologías su desarrollo y aspectos importantes para su adopción en el sector hidroagrícola.

“Estas tecnologías permiten que los productores sean capaces de anticiparse a eventos naturales, enfermedades o plagas para agilizar los procesos y tomar las mejores decisiones”, puntualizó Federico Marty, responsable de la Plataforma Global de Datos e Inteligencia Artificial de Microsoft Argentina y participante de la charla, agregó: “No hay una única herramienta capaz de mejorar la actividad agropecuaria, es una combinación de todas, dado que se complementan” y en México no contamos con ningún documento que nos explique las tecnologías existentes, su potencial en el sector hidroagrícola y cómo es que se complementan, lo que nos da una oportunidad de crear un documento que explique el potencial de las tecnologías en el sector hidroagrícola con un nivel de importancia y el complemento que debe existir entre ellas para lograr los mejores resultados.



Diversos estudios empíricos muestran que el cambio tecnológico contribuye a aumentar la productividad y, por tanto, la oferta productiva, pues sus aplicaciones inciden directamente en la reducción de los costos, haciendo la actividad productiva y más competitiva. históricamente, la innovación, investigación y desarrollo aplicados al sector agrícola han tenido éxitos y grandes incrementos en los rendimientos de las cosechas agrícolas (SAGARPA, 2010).

Fernández, (2016), en su análisis e interpretación del cambio tecnológico en las agriculturas españolas menciona que, como alternativa para solucionar problemas respecto al crecimiento demográfico acelerado, problemas climáticos y los planteados anteriormente, se considera la inclusión de tecnologías controladas que permiten manejar adecuadamente los sistemas de producción, de esta manera mejorar el uso de los recursos e incrementar la productividad de los cultivos.

Campero (2016), menciona que optar en el corto y mediano plazos por cambios estructurales sobre la base de acuerdos mundiales es seguir esperando que las cosas cambien mientras seguimos haciendo lo mismo. Los países exitosos en ese escenario son aquellos que lideran el desarrollo tecnológico y lo utilizan en su propio beneficio, generando de forma constante las condiciones necesarias para reproducir sus capacidades tecnológicas y liderazgo mundial. Estos países no son filántropos y no están interesados en aquellos que se encuentran rezagados; las señales por lo tanto son claras, con la 5RI a la vuelta de la esquina, debemos empezar a hacer algo desde el país y para el país, de forma tal que los resultados de las revoluciones que seguirán llegando e impactando al país al menos sean más equitativas y humanas.

Basco et al., (2018), indica en su libro de Industria 4.0 fabricando el futuro que, la combinación de tecnologías como los sistemas ciberfísicos, la IoT, la computación en la nube y Big Data, permiten obtener información en tiempo real, procesarla y analizarla, dejando atrás el modelo de prevención (aplicado al mantenimiento de equipos, a la demanda de insumos, al comportamiento del mercado) y permitiendo nuevas formas para predecir sucesos.

A continuación, se presentan proyectos y aplicaciones de las tecnologías aplicadas al sector agrícola que han revolucionado la forma de producir alimentos, para aprender de ellas e ilustrar los beneficios obtenidos con su aplicación y recomendaciones que se han obtenido de su aplicación:

El sensor hace que los agricultores reduzcan la aplicación no deseada. Los mapas pueden mostrar regiones del campo donde la humedad está bien, por lo tanto, no hay necesidad de agua en ese momento. Este tipo de datos ayuda al agricultor a ahorrar tiempo, recursos y dinero (Mathivanan & Jayagopal, 2018), un ejemplo de esto es el presentado por Aline Baggio en la Universidad Tecnológica de Delft en 2005, en el que desarrolló un proyecto para tratar la enfermedad del cultivo de la papa. Se utilizaron sensores para detectar humedad y temperatura. El monitoreo de estos dos hechos los ayudó a reducir la enfermedad.

La actividad de monitorear los cultivos se puede realizar mediante sensores, la tecnología de red de sensores se utiliza con éxito para obtener la medición de microclima, así como para medir los atributos del suelo y el estado de la planta, todo esto para generar los requerimientos de la planta y así poder modelar los elementos del microclima de cada planta, considerando



la influencia de las variables climatológicas como la evapotranspiración, la edad fenológica del cultivo, la interacción de la humedad y tipo de suelo, su permeabilidad y velocidad de infiltración, entre otros (Ospina et al., 2017).

En la aplicación de una red de sensores y actuadores inalámbricos Lopez et al., (2017), indicaron que el Sistema de Monitoreo ayuda a mejorar las actividades agropecuarias impulsando el monitoreo eficaz de mantos de agua, condiciones ambientales y sistemas de riego. Esto permite garantizar un correcto análisis de las condiciones existentes al realizar actividades como el riego, el consumo de agua para el ganado, la agricultura de precisión, etcétera.

Guerbaoui et al., (2013), presentaron un sistema de riego por goteo automatizado basado en PC aplicado en Marruecos, trabajo en el que concluyeron que el control de riego por goteo basado en computadora puede reducir el consumo de agua en un 20 a 30%, estabilizar la producción de un año a otro y diversificar los cultivos. También debemos señalar el fuerte impacto positivo de este tipo de riego sobre el medio ambiente.

Tapankumar et al., (2006), diseñaron y desarrollaron un sistema de control de riego por goteo basado en computadora que tiene la facilidad de adquisición remota de datos. También presentaron los beneficios de almacenar datos de sensores para estadísticas análisis para conocer los requisitos de riego para diferentes cultivos, concluyendo que el sistema se puede implementar y utilizar en forma cooperativa, lo que ahorrará energía, dinero y tiempo de los agricultores y en el cual centralizó la recolección de datos de diferentes campos ubicados aparte de cada uno. La utilización del sistema será máxima. El sistema ayuda a aumentar la eficiencia del riego, al reducir el coste laboral, ahorro de agua y luz.

Para los sensores Kim et al., (2008), desarrollaron un sistema de riego basado en sensores controlados electrónicamente que proporciona la facilidad para Monitorear la humedad y la temperatura del suelo, la información del clima y la posición del aspersor de forma remota utilizando las tecnologías Bluetooth y GPS. El concepto detrás del desarrollo de su proyecto era maximizar la productividad mientras ahorra agua.

Otro estudio importante fue el realizado por los autores Cohen et al. (2018), en su artículo titulado: “Lógica difusa aplicada a los sistemas de control en cultivos y distritos de riego”, en el señalan que una alternativa para aumentar la eficiencia y alcanzar la optimización en la utilización del recurso hídrico en la agricultura, sugiere utilizar sistemas automatizados en los sistemas de riego con estrategias de control avanzado (Control PID, lógica Difusa, Redes Neuronales Artificiales, etc.), que tengan en cuenta la relación agua-suelo-clima-cultivo, para determinar cuándo, cómo y en qué cantidad el agua debe ser provista a una superficie de cultivo, obteniendo buenos resultados al realizar la implementación de metaheurísticas a los sistemas de control de riego como base para evaluar la estabilidad y consumo de un cultivo de sandía en Colombia.

Meneses et al. (2015), en su artículo uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión concluye que los aviones no tripulados representan una excelente herramienta por la facilidad de montar cámaras multiespectrales y obtener imágenes de alta resolución representadas en 5,0cm/píxel, las cuales permiten identificar problemas y tomar medidas en áreas puntuales de los cultivos que se encuentran enfermos. Con ellos, se pueden hacer análisis y censos puntuales de alta precisión, con



fotografías de 5,0cm/pix a 100,0m lo que puede disminuir el tiempo y trabajo no solo en zonas de difícil acceso, sino también en grandes extensiones.

Además, Pino V., (2019), concluye en su investigación de “Los drones una herramienta para un agricultura eficiente, un futuro de alta tecnología” que la comunidad científica muestra resultados y avances prometedores: se incrementa la precisión de las imágenes, se logran productos más confiables para la agricultura de precisión y cada vez es posible analizar más elementos relacionados con el desarrollo de los cultivos y los factores que condicionan sus rendimientos.

Garzón, (2020) menciona los siguientes impactos ambientales y de innovación con el uso de drones aplicados en la agricultura:

- Reducción en el consumo de agua para los cultivos.
- Reducción en el consumo de pesticidas en los cultivos.
- Reducción en el recurso humano necesario para monitorear los cultivos.
- Mejoramiento del proceso de cultivo de los agricultores.
- La comprensión de la tecnología y la agricultura pueden ir de la mano.

Los desafíos que se tiene en el uso de drones es el alto costo de los sensores, el cumplimiento con la cuestión legislativa, realizar una buena elección dependiendo de las necesidades, y la operación de estos, ya que se requiere un nivel de experiencia, Zeng et al. (2017), menciona que es desafiante operar sensores en un UAV liviano usando un único sistema de control central, y poco práctico para usuarios generales (por ejemplo, agricultores) sin avanzadas habilidades de hardware y software

En la Argentina, los drones lograron una enorme aceptación en el mundo del agro, fundamentalmente aplicados al seguimiento de los cultivos. Empresas jóvenes que, mediante plataformas digitales, articulan conocimientos del agro, de la informática, de la sensorica, del análisis datos y de imágenes satelitales, que ofrecen servicios para determinar el rendimiento del cultivo, la presencia de plagas o la necesidad de aplicar fertilizantes (Basco et al., 2018).

Respecto a los Sistemas de Información Geográfica muchas investigaciones indican la importancia de esta herramienta para obtener información, por ejemplo, Maldonado & Caceres, (2018), indican en su artículo “Propuesta para el desarrollo de una aplicación SIG móvil orientada a la comercialización de productos agrícolas” desarrollado en Colombia, que en la actualidad, los Sistemas de Información Geográfica ocupan un papel importante en el ámbito de la información, la muestra más significativa de esto es el esfuerzo e inversión que se destina a diseñar, implantar y mantener sistemas de información, entendidos como, unidades funcionales que, dotadas de los medios apropiados se dedican a recopilar, almacenar, tratar o transformar, difundir o vender información, además agregan que los SIG son un conjunto de herramientas que facilitan organizar, almacenar, analizar y manipular eficazmente grandes cantidades de información.

El crear un sistema de información geográfica para la agricultura ayudaría a tener un mejor control sobre los cultivos en todas sus etapas, llevar una estadística comparativa entre años y cultivos dentro de los mismos lotes o lugares geográficos. Con una gran ventaja que es la visible ya que los Sistemas de Información Geográfica nos da la posibilidad de poder





presentar los datos en un mapa de nuestra propiedad y así tener una mejor perspectiva de lo que estamos haciendo o hemos realizado en el tiempo (Moncayo Hurtado, 2012).

Respecto a las herramientas más mencionadas que ayudarían a digitalizar y dejar traza de datos de manera estructurada el SIG es de las herramientas más utilizadas en el sector hidroagrícola, puesto que tiene la capacidad de generar una interacción entre el usuario y lo que sucede en campo, permitiendo analizar las operaciones agrícolas de forma rápida y eficaz en sinergia con otras tecnologías, permitiendo visualizar en mapas conjuntos de datos en cantidad y espacio.

En el caso de uso de software especializado las investigaciones indican que su aplicación ha beneficiado en varios factores a la agricultura, un ejemplo es el presentado por Sifuentes et al. (2016) mencionando en las conclusiones de la aplicación del programa IrriModel en el cultivo de papa, al Distrito de Riego 075, Río fuerte, Sinaloa, México, lo siguiente:

- Es posible lograr eficiencias en el uso del agua de 60 a 80% en riego por gravedad, de 85 a 90% en aspersión y de 95% en goteo, además de mejorar la calidad y cantidad de sus rendimientos. Con esta herramienta también se logran potenciar otros insumos, como fertilizante, al reducir los periodos de estrés hídrico y láminas aplicadas por sobre riego.
- El sistema también contribuirá a mejorar el servicio de riego de los módulos hacia el usuario, pues el supervisor de riego podrá atender casi en tiempo real las solicitudes que genere el productor a través de Internet y tener una mejor operación de los canales.
- Se cuenta con una plataforma computacional basada en TIC's, robusta y calibrada para maíz bajo riego por goteo, la cual demostró su funcionalidad, dando como resultado un mejor crecimiento y desarrollo del cultivo. Se aumentó en 40 % la eficiencia de aplicación y productividad del agua, y en similar proporción la eficiencia del uso de fertilizantes nitrogenados.

IoT encierra una gran promesa como habilitador del desarrollo social, incluyendo el logro de los Objetivos de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible, ofreciendo la aplicación de redes de sensores a diferentes desafíos ambientales la calidad y el uso del agua, el saneamiento, la salud y las enfermedades, el cambio climático y el monitoreo de los recursos naturales podría tener un fuerte impacto más allá de la gestión de los recursos. Los datos obtenidos de este tipo de aplicaciones también se podrían utilizar en contextos de investigación y ayudar a los científicos y a las universidades locales a realizar contribuciones únicas al cuerpo de conocimiento científico (Rose et al., 2015)

Un artículo reciente por McKinsey señala que: "se requiere interoperabilidad para desbloquear más de US \$ 4 billones por año en potencial impacto económico, para el uso de IoT en 2025, de un total impacto de US \$ 11.1 billones. En promedio, la interoperabilidad es necesario para crear el 40% del valor potencial que puede ser generado por el IoT en varias configuraciones".

La productividad de la oferta de alimentos respecto a las oportunidades, el McKinsey Global Institute señala que la tecnología de IoT tiene gran potencial en las economías en desarrollo.



Se proyecta que en 2025 hasta un 38% del impacto económico anual de las aplicaciones de IoT provendrá de las regiones menos desarrolladas.

En el uso de IoT Coelho et al., (2020), menciona que, para los agricultores, los beneficios incluyen minimizar las operaciones costos y ahorro del uso excesivo de recursos naturales. Después todos, incluso con los avances tecnológicos, los residuos todavía existen y son significativo. Como resultado, se han llevado a cabo varios proyectos, con el fin de optimizar el uso de los recursos (como el agua, fertilizantes y nutrientes) y garantizar un mayor control en sistemas de riego.

Khelifa, et al., (2015), concluye en su artículo de riego inteligente usando internet de las cosas aplicado en el sur de Argelia que, usando estas tecnologías, el control del riego será asegurado a bajo costo y alta precisión. El sistema propuesto facilita las tareas de riego y optimiza los costes a plazo de minimizar el consumo de agua y reducir el costo de la fuerza de trabajo.

Internet of Food & Farm 2020 (IoF2020), se refiere a un proyecto subvencionado con fondos de la Unión Europea para hacer realidad la agricultura de precisión, (IOF, 2020), menciona que con el uso de 60 dispositivos IoT (puertas de enlace, nodos, controladores de riego) y 79 sensores (aire, suelo, solar, viento, lluvia, medidor de flujo de agua), estaciones meteorológicas, entre otras tecnologías, han logrado reducir el consumo de agua entre el 5% y el 10% y hasta el 10% en gastos generales, además de 20% menos de visitas de campo.

Ramón Fernández, (2020), en su artículo inteligencia artificial y agricultura: nuevos retos en el sector agrario, menciona que, la inteligencia artificial aplicada al sector agroalimentario ofrece nuevas posibilidades de mejora de la explotación y de la sostenibilidad de los recursos.

Para la inteligencia artificial Tapankumar Basu et al., (2006), propuso un controlador de red neuronal artificial para control climático dentro del modelo de invernadero, concluyendo que el invernadero automatizado basado en computadora personal es muy eficaz en comparación con cualquier otro tipo de automatización. Debido a la presencia de una computadora como controlador con red neuronal obtenemos un control preciso sobre un parámetro de entrada según la necesidad del cultivo.

Madrid, (2017), indica que, si se concretan las expectativas con respecto a la innovación y la aplicación de la tecnología, las implementaciones de Internet of Things podrían tener un papel muy importante como facilitadoras del desarrollo social, incluyendo el logro de los Objetivos de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible.

Los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** resultan cruciales porque nada podrá ser posible si la tendencia a destruir, depredar y contaminar el aire, el agua, los bosques, la tierra y los recursos naturales sigue el ritmo y trayectoria actual, por ello la necesidad de anteponer acciones para frenar el cambio climático (PNUD MÉXICO, 2019).

En un marco de acción de la agenda 2030 desarrollada en Nueva York, ciudad donde se realizó la Cumbre de Naciones Unidas en 2015, en torno a un tema crucial e ineludible: el Desarrollo Sostenible. En ese encuentro los gobiernos de 193 países fijaron la Agenda 2030 que contempla 17 objetivos que se articulan entre sí, con el fin de terminar con la pobreza y lograr un crecimiento sostenido con igualdad.



La aplicación de las tecnologías derivadas de la cuarta revolución industrial de forma ordenada y estructurada en el sector agrícola pueden ayudar a México a cumplir con los siguientes objetivos de desarrollo sostenible:

ODS 2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.

- 2.3 De aquí a 2030, duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos en pequeña escala, en particular las mujeres, los pueblos indígenas, los agricultores familiares, los ganaderos y los pescadores, entre otras cosas mediante un acceso seguro y equitativo a las tierras, a otros recursos e insumos de producción y a los conocimientos, los servicios financieros, los mercados y las oportunidades para añadir valor y obtener empleos no agrícolas.
- 2.4 De aquí a 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad de la tierra y el suelo.
- 2.a Aumentar, incluso mediante una mayor cooperación internacional, las inversiones en infraestructura rural, investigación y servicios de extensión agrícola, desarrollo tecnológico y bancos de genes de plantas y ganado a fin de mejorar la capacidad de producción agropecuaria en los países en desarrollo, particularmente en los países menos adelantados.
- 2.c Adoptar medidas para asegurar el buen funcionamiento de los mercados de productos básicos alimentarios y sus derivados y facilitar el acceso oportuno a la información sobre los mercados, incluso sobre las reservas de alimentos, a fin de ayudar a limitar la extrema volatilidad de los precios de los alimentos.

ODS 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

- 6.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua
- 6.a De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.

ODS 8: Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.



- 8.2 Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.
- 8.4 Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.

ODS 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

- 9.1 Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.
- 9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.
- 9.c Aumentar significativamente el acceso a la tecnología de la información y las comunicaciones y esforzarse por proporcionar acceso universal y asequible a Internet en los países menos adelantados de aquí a 2020.

ODS 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

- 12.2 De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
- 12.3 De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha.
- 12.a Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.

ODS 17. Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.

- 17.6 Mejorar la cooperación regional e internacional Norte-Sur, Sur-Sur y triangular en materia de ciencia, tecnología e innovación y el acceso a estas, y aumentar el intercambio de conocimientos en condiciones mutuamente convenidas, incluso mejorando la coordinación entre los mecanismos existentes, en particular a nivel de



las Naciones Unidas, y mediante un mecanismo mundial de facilitación de la tecnología.

- 17.7 Promover el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales y su transferencia, divulgación y difusión a los países en desarrollo en condiciones favorables, incluso en condiciones concesionarias y preferenciales, según lo convenido de mutuo acuerdo.
- 17.8 Poner en pleno funcionamiento, a más tardar en 2017, el banco de tecnología y el mecanismo de apoyo a la creación de capacidad en materia de ciencia, tecnología e innovación para los países menos adelantados y aumentar la utilización de tecnologías instrumentales, en particular la tecnología de la información y las comunicaciones.

Todas las tecnologías de la cuarta revolución industrial han demostrado plenamente una enorme ventaja en los diferentes sectores agrícolas en los que ha intervenido la tecnología, se han reportado buenas aportaciones indicando que han mejorado sus procesos y que han facilitado el operar y administrar mejor los recursos, logrando un riego inteligente y automatizado que permite ahorrar agua, energía y recursos, contribuyendo a combatir el cambio climático con menores emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y menos fertilización química, contribuyendo de esta manera a cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible mencionados anteriormente, muchos países han iniciado con la adopción de estas tecnologías Kenia por ejemplo mejoro las estaciones meteorológicas, conectando los datos meteorológicos localizados y provisión de pérdida de cultivos; sensores de vigilancia del suelo utilizado para mejorar la producción de plantaciones de té (Sri Lanka, Ruanda); pruebas de suministro de alimentos basadas en RFID y sistema de seguimiento (India) y ganado basado en RFID programas de seguimiento, prevención de robos y registros de vacunación (Botswana, Senegal y Namibia).

Con un proceso de asesoramiento y seguimiento de la adopción tecnológica se pretende desarrollar y ofertar una alternativa tecnológica que permita impulsar el uso eficiente del agua y con apoyos gubernamentales se puede impulsar el potencial agrícola para dar cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible, a fin de contribuir en la atención del déficit alimentario y sistemas de riego eficientes en el desarrollo sustentable de los recursos hídricos del país.

## **2.2 Los datos y su importancia en el uso de tecnologías 4.0**

La acumulación de datos debe tener como fin último generar valor y facilitar la toma de decisiones, por lo que para el análisis de estos es importante su precisión. A la hora de poner en práctica en el sector agroalimentario la implementación del IoT, y el aprovechamiento que se pueda hacer de esos datos masivos captados a partir de la popularización de tecnologías Big Data, nos encontramos con datos que proceden de distintas fuentes, que pueden ser a su vez estructuradas y no estructuradas: agricultores y ganaderos, cooperativas, industrias agroalimentarias, empresas tecnológicas, empresas de maquinaria, Administraciones Públicas, Universidades y centros de investigación, (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación Secretaría General Técnica 2019).



No se debe perder de vista la importancia de los datos por lo que las leyes y regulaciones sobre datos deberán ser reconsiderado cuidadosamente en vista de IoT, en términos de cómo se obtienen y pueden usarse los datos, cuánto tiempo se pueden mantener los datos, límites de acceso por terceros (Garrity, 2015).

Por temas de seguridad nacional los datos que se obtengan deberán protegerse, haciendo uso de tecnologías como la ciberseguridad, además de que, mientras más datos pueda acumular una empresa importante para comprender el sistema alimentario, más podrá defenderse de los competidores y aumentar sus ganancias, Aunque cada eslabón de la cadena alimentaria industrial recopila datos, como en las empresas de maquinaria agrícola (producción de datos), los comerciantes de alimentos (datos de mercado) y los grandes procesadores minoristas (preferencia del consumidor), (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

Pensando en la descripción anterior es importante establecer la importancia que tienen los datos para poder implementar las nuevas tecnologías y que se pueda obtener su máximo provecho, Bonneau et al., (2017), mencionan que, la verdadera promesa de Agricultura 4.0 en términos de aumentar la productividad, reside en la capacidad de remotamente recopilar, utilizar e intercambiar datos, explicando que la transformación clave radica en la capacidad de recopilar más datos y medición de la producción: calidad del suelo, niveles de riego, clima, presencia de insectos y plagas. Dado que los datos obtenidos de sensores implantados en tractores e implementados directamente en el campo y en el suelo o con el uso de drones o imágenes de satélite.

Ezcaray et al., (2012), indica que, uno de los problemas de la agricultura actual en nuestro país es la falta de información y de formación necesarias para el buen desarrollo de las diferentes actividades, de hecho, cuando uno tiene la oportunidad de trabajar directamente con el agricultor llega inmediatamente a la conclusión de que muchos de los problemas que le surgen a las explotaciones agrícolas, podrían resolverse con una adecuada labor de formación, y sobre todo de información.

En primer lugar, los agricultores tienen que medir y comprender el impacto de una enorme cantidad y variedad de datos que impulsan la calidad y el rendimiento general de sus campos, en los que los datos meteorológicos, los datos del GPS, los datos específicos del suelo, las semillas, los fertilizantes y los datos de los sensores están generando una gran cantidad de datos cada segundo. La integración y la futura explotación de esos datos para el desarrollo de la agricultura moderna desempeñarán un papel sumamente importante, (Xie et al., 2015).

Sánchez-Olarte et al. (2015), menciona que es frecuente que los estudios campesinos generalicen el conocimiento tradicional sin contemplar variables ecológicas, ni factores como el desgaste de las tierras agrícolas, desgaste energético de los animales de trabajo o la maquinaria, inversiones de tiempo y mano de obra del campesino y de quienes intervienen en el proceso o la toma de decisiones para la elección de semilla a cultivar, entre otras. No obstante, en muchas ocasiones los estudios de la ciencia formal tampoco consideran las variables socioculturales de manera apropiada. Por ello, es que se debe tener un sistema que pueda tomar todas las variables en consideración para mejorar las acciones a implementar, el futuro de la agricultura se encuentra en sus datos y en el conocimiento, donde la información digital influye en las políticas y programas agrícolas de algunos países que se encuentran a la vanguardia.



Se estima que para 2020, más de 75 millones de dispositivos de IoT agrícolas estarán en uso: la granja promedio generará 4.1 millones de datos puntos diarios en 2050, frente a 190,000 en 2014. Pero mientras el creciente número de dispositivos conectados representa una gran oportunidad para los productores de alimentos, También agrega complejidad. La solución está en hacer uso de tecnologías cognitivas que ayudan a comprender, aprender, razonar, interactuar y aumentar la eficiencia (IBM, 2016).

Los datos generados a través del hardware, maquinaria agrícola, drones, robots de procesamiento de alimentos, están vinculados al software con el que se diseñan genéticamente las semillas, los pesticidas, los fertilizantes y el ganado. Además, las empresas están interesadas no sólo en acceder a la mayor cantidad de datos posible, sino también en mantener el control de los mismos, impidiendo que otras empresas, así como los campesinos, accedan a ellos (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

Del beneficio que conlleva el análisis y el proceso de gran cantidad de datos Basco et al., (2018), mencionan que, permite descentralizar la toma de decisiones, y pasar de modelos preventivos a modelos predictivos que pueden aplicarse en todas las áreas de la organización: en la cadena de suministros (ajustando los tiempos en la provisión de insumos y minimizando la necesidad de inventarios); en los sistemas de detección de fallas de los equipos (eliminando las paradas preventivas y anticipando desperfectos); y en el sistema de logística (anticipando el requerimiento de insumos y productos terminados, eficientizando su distribución y entrega).

Un ejemplo de la importancia de los datos es el presentado en el Instituto de Ciencias Matemáticas e Informáticas de la Universidad de São Paulo (ICMC-USP), en donde desarrollaron un sistema inteligente y autónomo para rociar agroquímicos con drones, Oliviera, (2016), menciona que Primero, el dron realiza algunos vuelos de entrenamiento a diferentes alturas y condiciones climáticas para conocer el patrón de deposición de su sistema de fumigación y la influencia que provocan las condiciones climáticas”, explica Faiçal. “Esta información se almacena para que luego se pueda utilizar para construir un modelo de conocimiento que permita al dron tomar decisiones durante la fumigación en condiciones climáticas similares a las anteriores o sin precedentes”.

La contribución del conocimiento como elemento clave para el logro de los objetivos del milenio podría ser de gran importancia, en la medida en que se mejore el acceso a la información y el conocimiento. Los temas que deberán abordarse en relación con el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria requieren conocimientos procedentes de numerosas disciplinas, lo que hace necesario el acceso el acceso a muchos tipos de recursos de información y conocimiento, que hemos descrito en una tipología de sistemas de información relacionados con la lucha contra el hambre y la pobreza. (Rodríguez et al., 2004).

Para la Inteligencia Artificial, los datos son fundamentales para poder alimentar el conocimiento de los algoritmos, ya que esta implica que el agente racional no sólo recopile información, sino que aprenda lo máximo posible de lo que está percibiendo. La configuración inicial del agente puede reflejar un conocimiento preliminar del entorno, pero a medida que el agente adquiere experiencia éste puede modificarse y aumentar. Los agentes inteligentes necesitan el conocimiento acerca del mundo para tomar las decisiones acertadas (Russell & Norvig, 2011).



Los agentes con éxito dividen las tareas de calcular la función del agente en tres períodos diferentes: cuando se está diseñando el agente, y están los diseñadores encargados de realizar algunos de estos cálculos; cuando está pensando en la siguiente operación, el agente realiza más cálculos; y cuando está aprendiendo de la experiencia, el agente lleva a cabo más cálculos para decidir cómo modificar su forma de comportarse. Además, las tareas de inferencia principal en modelos temporales son filtradas, predicción, suavizado, y el cálculo de la explicación más probable. Cada una de éstas puede conseguirse utilizando algoritmos recursivos y sencillos con tiempos de ejecución lineales en la longitud de la secuencia (Russell & Norvig, 2011).

En el contexto agrícola, las decisiones fácticas centradas en los datos tendrán un impacto en la agricultura, las decisiones basadas en datos concretos tendrán un efecto positivo en las actividades conexas. La agricultura de precisión, que es muy popular en los países desarrollados gracias al uso generalizado de los análisis, contribuye directamente a la productividad agrícola. La tecnología de satélites, los sistemas de información de localización geográfica y las tecnologías de tele observación, que utilizan los datos de la agronomía y los tipos de suelo, facilitan el aumento de la producción agrícola. En grandes extensiones de tierra este enfoque es intensivo en capital y útil. Por ello, es más adecuado para el cultivo que se realiza en líneas corporativas con la ayuda de Bigdata Analytics (Senthilvadivu et al., 2016).

### **2.3 La digitalización como medio para implementar las tecnologías 4.0**

Durante el desarrollo de la investigación se encontró mucho, con la importancia de los datos y su digitalización ofreciendo múltiples herramientas y tecnologías para poder tener todo el proceso y sistema agrícola de forma digital, por ejemplo, Sivakumar et al., (2004) indica que tecnologías como el SIG se está convirtiendo en una imprescindible herramienta para combinar varias fuentes de información de mapas y satélites en modelos que simulan las interacciones de sistemas naturales complejos. Se puede utilizar un SIG para producir imágenes, no solo mapas, sino dibujos, animaciones y otros productos cartográficos.

Lopez et al. (2017), mencionan que la recopilación de datos, el monitoreo y la evaluación, son tareas que requieren de amplia planificación metódica y de mucho tiempo. En el pasado, estas tareas se realizaban con papel y bolígrafo, lo cual no solamente hacía que el proceso fuera propenso a errores, sino que también aumentaba la dificultad de realización en gran escala, además de que los costos de operación aumentaban.

La declaración de cooperación “Un futuro digital inteligente y sostenible para la agricultura y las zonas rurales europeas”, de 2019, reconoció el potencial de las tecnologías digitales en la agricultura y la creación de espacios de datos.

Bonneau et al., (2017), indican que, la digitalización de la agricultura se basa en el desarrollo y la introducción de nuevas herramientas y máquinas en la producción.

La transformación digital ofrece a las explotaciones agrarias toda una serie de oportunidades como son la posibilidad de acercarse directamente a los consumidores con información precisa sobre los productos y los procesos de producción, la reducción de pérdidas e ineficiencias dentro de la cadena agroalimentaria, la reducción del uso de insumos de





producción con una aplicación mucho más precisa, la optimización en la toma de decisiones, la simplificación de procesos y tareas administrativas (condicionado a la interoperabilidad de los datos), la mejora del rendimiento y de la calidad de las producciones, el cumplimiento de la cada vez más exigente normativa de la PAC, etc. (Betancourt, 2018).

Asimismo, la digitalización abre paso al surgimiento de nuevos jugadores en la industria. A través de Internet, resulta cada vez más sencillo adquirir nuevas habilidades por más complejas que parezcan; desde tutoriales online hasta patentes de productos, o redes de profesionales en cualquier campo. Es decir, las barreras tradicionales de entrada a los negocios se desmoronaron, al tiempo que se abre el paso a nuevos actores, generalmente, del mundo de las TICs (Basco et al., 2018).

Mariano Larrazabal consultor en Agromarketing Digital y Social Media de Agromarketing Bialar, fue rotundo en su intervención en Smart Agro 2019 en la que menciona que: "El agricultor debe digitalizarse, no le queda otra. Debe hacerlo por criterios de eficiencia, rentabilidad, competitividad y sostenibilidad". En opinión de este empresario y agricultor "no podemos construir el futuro con herramientas del pasado".

Uno de los retos que se tienen en el medio rural y en el sector agrícola es el tener digitalizados sus procesos, tener acceso a la información de manera fácil para poder tomar decisiones rápidas y concretas que ayuden a la planificación de estrategias a realizar para mejorar, en la siguiente tabla se destacan las ventajas de la versión digital de los datos, sobre la analógica:

Tabla 1 Ventajas de datos digitalizados sobre analógicos, (Escobar, 2000).

Digital	Analógica
Fácil de actualizar	Difícil de actualizar, implica rehacer el mapa completo
Transferencia sencilla y rápida (p.ej.: vía internet)	Transferencia lenta (p.ej.: vía correo)
Espacio de almacenamiento relativamente pequeño (dispositivos digitales)	Requiere espacios de almacenamiento grandes (p.ej.: cartotecas tradicionales)
Fácil de mantener	Los mapas en papel se estropean con el tiempo
Análisis automático y fácil	Análisis difícil e inexacto (p.ej.: medición de áreas y distancias)

Los sistemas expertos que incorporan información de utilidad presentan capacidades adicionales en comparación con los sistemas de inferencia puros. Además de ser capaces de tomar decisiones, pueden utilizar el valor de una información para decidir si la adquieren o no y pueden calcular la sensibilidad de sus decisiones frente a pequeños cambios en las asignaciones de probabilidad y utilidad.

Tener la caracterización de cada parcela, capacidad de saber lo que está pasando en las fincas, poder cuantificar suelos malos, encharcamientos, área sembrada y cosechada es la prioridad al digitalizar el sector agrícola, muchas empresas ofrecen la implementación tecnológica bajo un concepto de digitalizar primero el sector para después automatizar y optimizar, tal es el caso de Mapsens Agro indicando que con diferentes herramientas y softwares recogerán datos para un mayor análisis y mejora, ofreciendo el servicio de digitalizar el sector, como se observa en la Ilustración 2 .



Ilustración 2 Propuestas de implementación tecnológica partiendo de la digitalización (MAPSENS AGRO, 2019)

Basco et al., (2018) indican que, entre los principales desafíos para los países emergentes, se destacan: reducir la brecha digital respecto a países desarrollados; promover la penetración y adopción de tecnologías 4.0 en sus ecosistemas productivos; establecer nuevas estrategias de integración comercial en las cadenas globales; mejorar la articulación entre la comunidad científica y el sector productivo; fortalecer los ecosistemas locales de innovación y promover el surgimiento de nuevos actores y nuevos mercados.

No se espera que el proceso de transformación digital en el sector agrario tenga efectos apreciables en los próximos dos o tres años, pero a partir de diez años sus consecuencias serán muy profundas y sin duda van a afectar a la productividad y la calidad de los productos de las explotaciones, a los costes de producción y también a otras variables del proceso de producción como es el impacto ambiental. En este sentido, tener un buen posicionamiento de salida, un liderazgo, es importante, pero es más importante que consigamos llegar a la gran mayoría de agricultores profesionales que producen nuestros alimentos para que estén preparados y adaptados para este intenso cambio (Betancourt, 2018).

## 2.4 Diagnóstico de aplicación de las tecnologías 4.0

Como se puede observar, el uso de las tecnologías de la industria 4.0, sus complementos, técnicas y herramientas han demostrado plenamente una enorme ventaja para la agricultura, dado que se han aplicado exitosamente en diferentes países mostrando resultados favorables en cuanto al ahorro de insumos, Burritt & Christ (2016), mencionan que además de aumentar la eficiencia del uso del agua y el aumento en el rendimiento de los cultivos la industria 4.0 presenta una visión de una mayor digitalización industrial y comercial, la cual nos brinda la posibilidad de mejorar la toma de decisiones basándose en la disponibilidad de datos.



De aquí la importancia de presentar que aprendizajes y dificultades se han obtenido a partir de las aplicaciones de las tecnologías de la industria 4.0, presentando las recomendaciones que han surgido para realizar una correcta adopción tecnológica.

Diversas fuentes muestran que las principales limitantes de uso de las tecnologías es el acceso a internet, nivel educativo de los agricultores, el uso no adecuado de un computador, carencia de habilidades y competencias digitales, etc. A continuación, se presentan las principales barreras de aplicación tecnológica.

**Compatibilidad entre tecnologías.** Hay problemas de compatibilidad entre varios sensores y plataformas, debido a diferencias en computadoras externas, puertos, métodos de activación, y métodos de almacenamiento de datos (Zeng et al., 2017).

**Elección inadecuada de tecnologías.** Una oferta tecnológica inadecuada hace más radical el cambio, lo que conduce a que el encadenamiento de innovaciones afecte a demasiados aspectos (Fernández, 2001).

**Necesidad de estándares.** El desarrollo de la Agricultura 4.0 requiere estándares tecnológicos para garantizar la compatibilidad de los equipos. los estándares son una necesidad para asegurarse de que cualquier elección tecnológica sigue siendo interoperable con los más nuevos equipos y es apoyado en el tiempo por los fabricantes y otros industriales (Bonneau et al., 2017).

**Acceso a Internet.** En México, según cifras oficiales, 65.8 por ciento de la población total tiene acceso a internet. En población urbana, la cifra asciende a 73.1 por ciento, pero en áreas rurales, baja al 40.6 por ciento (INEGI, 2019).

Es imprescindible mejorar este punto, a través de inversiones que doten de cobertura real y de velocidad suficiente no sólo a los núcleos rurales, sino también al campo, lugar de trabajo de los agricultores y ganaderos.

Bonneau et al., (2017), indican que, un requisito clave es, por supuesto, la capacidad de redes de comunicación para desplegar y cubrir las áreas rurales de manera eficiente.

**Falta de datos.** El agricultor no suele disponer de un histórico o sus datos no son representativos y la falta de confianza respecto al uso de los datos o los problemas de interoperabilidad entre las diversas soluciones que existen en el mercado. Por último, la escasez de personal cualificado y asesoramiento, o la falta de formación adecuada también son relevantes (Betancourt, 2018).

García, E., & Flego, F. (2008), concluyen respecto al uso de mapas de rendimiento que, para obtener resultados prácticos hay que trabajar mucho. No sirve la información procedente de los campos de cultivos de otros países europeos o americanos. Es necesario hacerlo durante varios años antes de poder sacar conclusiones.

**Homogeneidad de datos.** El sur de México y Centroamérica son lugares con enorme diversidad geográfica, que se expresa a su vez en una de las diversidades biológicas y culturales más potentes del mundo. Por el contrario, la agricultura industrial y la inteligencia artificial requieren homogeneidad y tendencias predecibles para calcular las probabilidades



de ganancia y ajustar los comportamientos productivos a ello, como si la naturaleza pudiera ajustarse a los deseos de los inversionistas (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

**Mal uso de las tecnologías.** El uso inadecuado a las tecnologías ya sea por falta de conocimiento y capacidades en relación con el uso de tecnologías y la digitalización en el sector, o una mala lectura, una mala calibración, etc. Por ejemplo, en 2010, Monsanto comenzó a recopilar datos de 15 años utilizando algoritmos para adaptar sus variedades de maíz transgénico a las enfermedades previstas para cada temporada. Entonces, un año, el algoritmo no incluyó la enfermedad del marchitamiento de Goss en sus cálculos de Fito mejoramiento, lo que llevó a pérdidas significativas en los cultivos. Más recientemente, Blue River, subsidiaria de John Deere, envió robots a los campos de algodón de Australia para tomar más de 100 mil fotos digitales del cultivo en todas sus etapas. Pero cuando la compañía regresó a los campos de algodón del sur de Estados Unidos, la tecnología “ver y rociar” de los robots regó en exceso plantas de algodón sanas. No está claro si la tecnología malinterpretó las imágenes debido a las condiciones solares y climáticas o a otra cosa, pero las consecuencias fueron desastrosas (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

Williams, (2007), indica que, las tecnologías desarrolladas para las condiciones únicas de clima, suelo y geografía de países desarrollados de clima templado como los EUA no se adaptan bien a las condiciones más calurosas, tropicales o áridas de México. Años de investigación se requieren muchas veces para que se adapten completamente las tecnologías transferidas de los EUA a las condiciones mexicanas específicas de clima, suelo, ambiente y geografía. Por desgracia, no siempre se han hecho las inversiones necesarias en México.

**Diferencias en las regiones.** Sólo algunas regiones de México podrían adoptar una tecnificación agrícola de generación 4.0, los estados con mayor valor monetario agrícola en México son: Sinaloa, Sonora, Michoacán, Chihuahua, Tamaulipas, Baja California, Guanajuato, Colima, Estado de México, Nayarit y Zacatecas, donde cantidad importante de municipios ya están tecnificados con sistemas de riego, están orientados al mercado externo y cultivan materias primas (mercancías de exportación) (SIAP, 2013). Las empresas y dueños de robots, drones y tractores equipados con sensores e inteligencia artificial invertirán en la producción agrícola que garantice el retorno de las inversiones, como estos estados en México (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

**Poco apoyo a los pequeños agricultores.** En el informe de Cofece de 2015, “Reporte sobre las condiciones de competencia en el sector agroalimentario”, menciona que los subsidios gubernamentales para el sector agroalimentario en México para 2015, que ascendieron a 60,900 millones de pesos mexicanos. Señala que mientras el decil más rico de los productores agrícolas recibió 52% de los subsidios, los cuatro deciles más pobres, es decir, la mayoría de los productores agrícolas, recibieron juntos 10%.

**Corrupción e inestabilidad política.** La infraestructura necesaria para la automatización de la producción primaria está lejos de existir en Centroamérica. Los niveles de corrupción y de baja efectividad gubernamental e inestabilidad política, juegan contra el desarrollo de las infraestructuras para la automatización y el funcionamiento ideal de los procesos que integran la agroindustria de punta (Rojas, 2019).

**Medio ambiente.** Bonneau et al., (2017), mencionan que, para poder implementar eficientemente las tecnologías, también necesita ser capaz de soportar las especificidades del



medio ambiente (limitadas acceso a energía, polvo, lluvia, vibraciones, etc.). Cuando no se tienen en cuenta, estos factores pueden retrasar significativamente la adopción de tecnología.

**Poca inversión a la ciencia y tecnología.** Williams, (2007), indica que, la inversión mexicana pública en ciencia y tecnología agrícola cayó en términos reales en los últimos diez a quince años. El porcentaje de los gastos públicos mexicanos en la ciencia y tecnología dedicado a la investigación agropecuaria cayó desde 13.4% en 1990 hasta 6.9% en 2003. Por consiguiente, aunque se invierte capital extranjero cada vez más en tecnología para el desarrollo de ciertas actividades agropecuarias y agroindustriales en México, menos y menos se hace por el sector público para adaptar y comercializar esa tecnología para la agroindustria mexicana en general. A la vez, poca investigación se realiza actualmente para desarrollar tecnologías para ayudar a las empresas pequeñas y medianas a competir en un mercado agropecuario mexicano cada vez más globalizado.

**Aspectos legales.** Principalmente vinculados a la protección y uso de los datos, la falta de regulación pública de los mismos y las iniciativas de autorregulación. Se considera que aun cuando existe un gran decalaje entre el rápido desarrollo de nuevas tecnologías y servicios digitales y el desarrollo de un marco normativo equilibrado, se hace necesario que éste se desarrolle de forma que permita el despegue del uso de las nuevas tecnologías y servicios digitales de una forma inclusiva. A la vez se deben evitar situaciones de dominio o abuso de posición dominante del mercado por parte de unos pocos operadores, o agrandar la brecha estructural existente en el sector agroalimentario (Betancourt, 2018).

Madrid, (2017), menciona que, las tecnologías emergentes normalmente se ven limitadas por la legislación y las regulaciones vigentes, ya que al ser disruptivas suelen desafiar los límites previamente establecidos. La legislación sin duda deberá tratar antes o después situaciones nuevas que aborden los desafíos que van surgiendo para la privacidad, seguridad o propiedad de los datos y la responsabilidad legal que esto conlleva.

**Aspectos sociales.** El problema de la adopción no es puramente tecnológico, sino de “control social”, del cambio por parte de los agentes implicados, indicando que las explicaciones deben ser leídas como razones indicadoras del modelo de transformación desde los intereses de los agricultores pequeños o grandes, (Fernández, 2001).

Janc et al. (2019), menciona que las nuevas tecnologías y las innovaciones que surgen con base digital provocan aprensión y miedo, como alguna vez lo hicieron las nuevas condiciones económicas e institucionales. Eso puede significar que los agricultores perciban la tecnología como una amenaza, como una presión ejercida desde el exterior y que trabaja para erosionar un sentimiento de interés común basado en el comportamiento colectivo. Además, agregan que la falta de conocimientos y habilidades adecuados con respecto al uso de Internet actúa para reducir el alcance de las oportunidades para el desarrollo agrícola.

**Capacidad de los agricultores para modernizarse.** Otro desafío imprescindible en la adopción de Agricultura 4.0 es la capacidad de agricultores para invertir y modernizar sus prácticas de producción. A menudo se enfrentan a una escasez económica, situación con inversión muy limitada, capacidad en nuevas herramientas de producción y acceso limitado al crédito. Además, la fuerza laboral está envejeciendo, con más del 56% mayores de 55 años en Europa (2013). Las habilidades digitales de la fuerza laboral son por lo tanto limitadas y requiere adicional inversión en capacitación a adoptar tecnologías (Betancourt, 2018).



Es por todas las barreras indicadas anteriormente que la adopción tecnológica se debe basar en un sistema de trazabilidad y tomando las recomendaciones de países e investigadores que ya iniciaron con la adopción tecnológica y que plantean estrategias para poder facilitar el uso de las tecnologías 4.0 de manera eficiente y adecuadas.

La existencia de infraestructura de telecomunicaciones de alta velocidad en el medio rural, acompañada de la formación y capacitación digital de sus habitantes, son necesarias para reducir la brecha digital y aumentar la capacidad del medio rural de explotar su potencial digital, (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación Secretaría General Técnica 2019).

González et al., (2016), mencionan en su artículo “Drones aplicados a la agricultura de precisión” que, se ve la necesidad de que los actuales profesionales de las ciencias agropecuarias se apoyen en técnicas de percepción remota para validar todos los conocimientos que poseen y que muchas veces se evidencian en la fenología de las plantas. Es claro, que con un apropiado ejercicio y apropiación de estas técnicas se podría omitir en ocasiones el trabajo de campo, y llegar a soluciones inmediatas y de mayor precisión en estudios de cultivos particulares.

Una de las recomendaciones dadas desde el punto de vista económico es que la adopción de la gestión basada en sensores UAV puede ser más atractiva cuando los agricultores ya están utilizando el manejo de nitrógeno (N) de aplicación dividida, cuando los costos de fertilizantes son muy altos, o cuando pueden ocurrir mayores pérdidas de N, como en un año húmedo. Mayores beneficios de esta tecnología podrían obtenerse de campos con mayor variabilidad espacial, ya que nuestro sistema de soporte de decisiones (DSS) utiliza tanto datos de campo espacial como Imágenes detalladas para abordar la variabilidad espacial en la necesidad de N. En temporada, recomendaciones de N basadas en sensores ya son prometedores y tienen potencial para realizar mejoras adicionales (Thompson & Puntel, 2020).

Según el informe del Foro Económico Mundial de 2016 sobre el futuro del empleo, la cuarta Revolución Industrial se basará en una mano de obra altamente cualificada y con avanzados conocimientos tecnológicos, preparada para dar soporte y desarrollar nuevas tecnologías y modelos empresariales que hagan un uso creciente de los datos.

Para generar esta adopción de tecnologías Sung (2018), resalta la importancia de la aparición de nuevas tecnologías a través de la cuarta revolución industrial, en la cual pueden surgir oportunidades para aumentar la competitividad agrícola y una oportunidad de superar las debilidades estructurales e indica 3 pasos para liderar el cambio los cuales se detallan a continuación:

- Primero, debemos analizar el impacto de la cuarta revolución industrial en nuestro ecosistema agrícola, para tal fin es necesario analizar los impactos en todos los frentes de la agricultura, los efectos en la vida rural y agrícola, y los efectos sobre la estructura y el trabajo agrícola.
- En segundo lugar, debemos considerar la gestión de datos y sus efectos. En el futuro, los datos serán un recurso, y la calidad de los datos será competitiva. Los datos deben ser estandarizados. Los datos agrícolas pueden ser continuamente producidos y gestionados.



- En tercer lugar, debemos facilitar la construcción de una infraestructura que admita agricultura. La red de comunicaciones de quinta generación (5G), la infraestructura de red de Internet, y el sistema de servicio en la nube debe mantener el soporte para estas tecnologías y permitir que se integren fácilmente en la industria agrícola.

De los pasos planteados por Sung (2018) establece que como primer paso se debe analizar el impacto de la cuarta revolución en el ecosistema agrícola, por lo que se debe dar a conocer las tecnologías y las aportaciones que se han obtenido en el sector agrícola.

En España hay que destacar la aprobación e implantación de la **“Estrategia de digitalización del sector agroalimentario y forestal y del medio rural, del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación”** mediante la cual se definen las líneas estratégicas y medidas necesarias para impulsar la transformación digital de los sectores agroalimentario y forestal y del medio rural, así como los instrumentos previstos para su implementación.

Su objetivo, tal y como indica el documento, es “buscar la eliminación o reducción de las barreras técnicas, legislativas, económicas y formativas existentes en la actualidad, contribuyendo así al liderazgo de un sector agroalimentario sostenible económica, social y medioambientalmente, y al poblamiento activo del medio rural haciéndolo un lugar más atractivo, vivo, dinámico y diversificado, generador de riqueza y de empleo de calidad, con especial atención a jóvenes y mujeres”.

Para ello, se establecen tres objetivos bien diferenciados:

- Reducción de la brecha digital fomentando la conectividad;
- Fomento del uso de los datos con abordaje de la interoperabilidad de los datos y la apertura de los mismos, con apertura de los datos en diversos ámbitos: administrativo, investigación y sector privado;
- Impulso del desarrollo de la empresa y creación de nuevos modelos de negocios en relación con la industria 4.0. Todo ello pasa por la modernización, asesoramiento digital del sector agroalimentario y forestal.

Por estos motivos, es importante contar con un instrumento que permita visualizar la transformación digital, que permita sensibilizar a la sociedad y al gobierno de la importancia de adaptarse a un modelo de agricultura y alimentación, Raúk Hopkings experto en desarrollo rural y tecnologías de la información menciona en 2012, que hay tres áreas que le parecen fundamentales para la implementación de las TIC en la agricultura. Primero, es necesaria una mayor sensibilización sobre la importancia de las TIC en la agricultura, en este trabajo de sensibilización debe darse especial atención a la difusión de experiencias exitosas mediante visitas presenciales, publicaciones, videos y portales web atractivos y de fácil acceso. La segunda área prioritaria es dar un fuerte y decisivo impulso a la conectividad en el ámbito rural. La mayor parte de los estudios en este tema coinciden en que la falta de conectividad sigue siendo el obstáculo principal para que los productores rurales puedan beneficiarse de las TIC. La tercera área prioritaria es el desarrollo de capacidades, con metodologías novedosas que distingan las características e intereses de los diversos grupos que conforman la población rural latinoamericana: jóvenes, niños y adultos, así como los diversos tipos de trabajadores. Para que esta labor de capacitación tenga éxito es necesaria una colaboración estrecha con las instituciones públicas y privadas trabajando en el sector de educación.



Es notorio que falta profundizar más sobre las tecnologías derivadas de la industria 4.0, darlas a conocer en México y a consecuencia de que las características propias de los países en los que se han aplicado las tecnologías, son diferentes a las nuestras, obtener una herramienta que permita incorporar de manera adecuada las tecnologías al sector agrícola, además de que la adopción de las tecnologías ha variado según su tipo y por lo general tienden a ser puntuales para resolver cierto tipo de problema o mejorar algunos procesos, ante estas circunstancias y la urgencia por obtener nuevas estrategias que mitiguen los daños ocasionados por el cambio climático en diferentes regiones, las investigaciones resaltan la importancia de realizar una proyección de adopción tecnológica de la industria 4.0, que debe basarse en el conocimiento de las tecnologías, la importancia de los datos y la digitalización, debido a esto la presente investigación se hace necesaria, a fin de contar con una base de datos de las tecnologías derivadas de la industria 4.0 y su aplicación al sector agrícola. Se requiere contar con un instrumento que logré consolidar la información en un mismo espacio y dé a conocer todas las tecnologías, su intervención con la agricultura por área de actuación, caracterizando a cada tecnología, sus complementos y características principales y el procedimiento utilizado para desarrollar la base de datos con las tecnologías 4.0 aplicadas al sector hidroagrícola, la estructura empleada para un mejor entendimiento, descripción de sus características y funciones.





## Capítulo 3 Objetivo y metodología

### 3.1 Objetivos

#### 3.1.1 Objetivo general

Desarrollar una herramienta que permita de manera ordenada y planificada dar a conocer el uso de las nuevas tecnologías derivadas de la IV Revolución Industrial, en los Distritos de Riego de México.

#### 3.2.2 Objetivos particulares

- Analizar las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 que son aplicables en el sector hidroagrícola.
- Obtener una base de datos en que describa la aplicación de tecnologías en el sector hidroagrícola.
- Identificar cuáles son las condiciones facilitadoras para la aplicación de estas tecnologías en los distritos de riego de México.
- Describir una metodología de implementación de las tecnologías en un Distrito de Riego.

### 3.2 Justificación

Ante los retos que enfrenta la producción de cultivos, el compromiso de hacer más eficiente el uso de agua, aumentar la productividad en el sector agrícola, los impactos generados por el cambio climático y la tarea por integrar sistemas sostenibles y amigables con el medio ambiente, se ve la necesidad de plantear una transformación tecnológica que ha demostrado tener buenos resultados.

Por medio de una base de datos que alojará toda la información de las tecnologías derivadas de la 4ta revolución industria: equipos, software, maquinaria, instrumentos, robots, sensores, herramientas, etc., que son aplicables en el sector hidroagrícola, en donde se podrá consultar por campo de actuación las tecnologías a utilizar, su complemento entre ellas, bibliografía consultada: artículos, libros, revistas, páginas, etc., en donde se puede obtener más información para cada tecnología y ejemplos de cómo se han implementado alrededor del mundo, se pretende dar a conocer todas las tecnologías para que puedan ser consultadas y estudiadas.

Establecer un análisis de aplicación tecnológica basado en sistemas de información geográfica, percepción remota e internet se pretende ayudar a todos los agricultores, usuarios, distritos de riego, unidades de riego y administradores del agua en general, a tomar mejores



decisiones respecto a las necesidades y problemáticas particulares que tienen, de tal forma que podrán recurrir a la base de datos de las tecnologías y de esta forma generar una estrategia de implementación ordenada y planificada, basada en la importancia de los datos y la digitalización del sector en que se pretende aplicar las tecnologías.

### 3.3 Metodología

Este trabajo se divide en 2 partes, la primera consiste en realizar una recopilación y explicación de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 que son aplicables en el sector hidroagrícola (Tecnologías de la Industria 4.0) y clasificar su potencial de aplicación en una base de datos que contenga las diferentes áreas y campos de actuación de los distritos de riego, como lo son: las fuentes de abastecimiento (presas y pozos); los sistemas de conducción, distribución, entrega y aplicación del agua; las estructuras para el control, operación, manejo y protección de la infraestructura hidráulica; los equipos y maquinaria para las prácticas agrícolas; y los procesos de seguimiento, control y comercialización de la producción agrícola; entre otros elementos y factores que influyen en este importante sector, por lo tanto se va a caracterizar en una base de datos el potencial de aplicación de las tecnologías derivadas de la industria 4.0 en las diferentes áreas y campos de actuación de los distritos de riego (Ilustración 3) y la metodología empleada para realizar la base de datos, complementándola, con una descripción ordenada del potencial de aplicación de las tecnologías derivadas de la industria 4.0, inteligencia artificial, Big Data, internet de las cosas, robótica, vehículos autónomos y sensores, etc. Abarcando todas aquellas tecnologías, herramientas y técnicas que los complementan, y sin las cuales no se obtendría el mayor beneficio de la aplicación tecnológica en el sector agrícola.

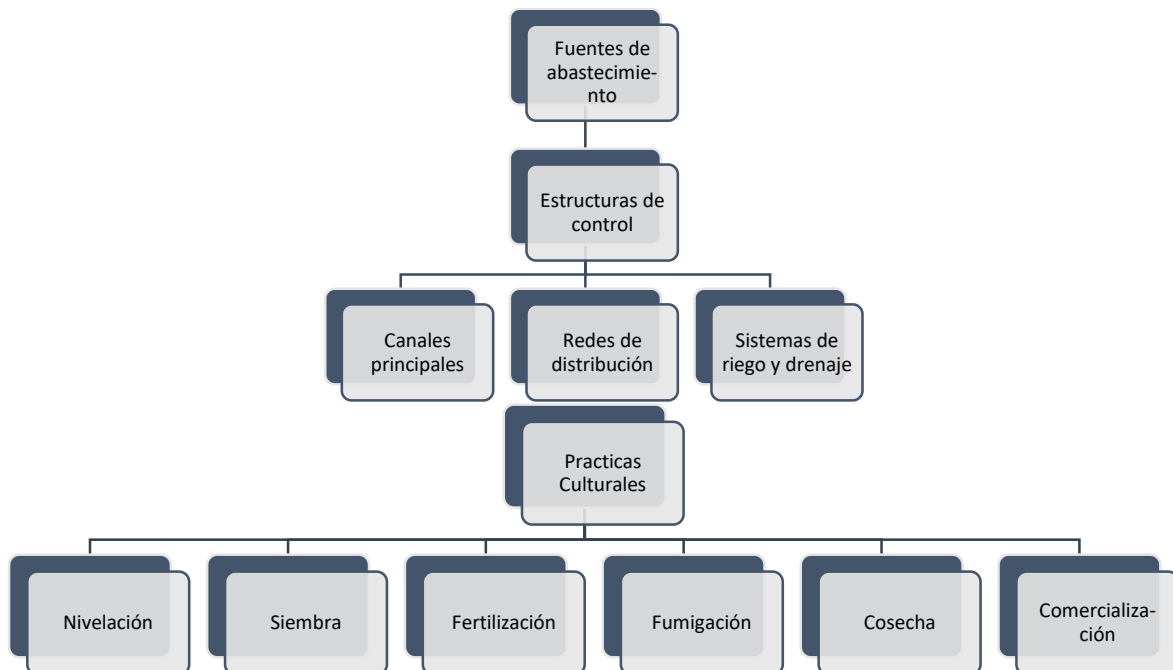


Ilustración 3 Principales campos en que se revisaran las tecnologías de mayor impacto en el sector hidroagrícola



La segunda parte consiste en desarrollar un caso de estudio en los Distritos de Riego en México, lo cual permitirá obtener un análisis mediante la digitalización e información de uso libre, partiendo de la importancia de los datos y la digitalización de la información, para dar a conocer una herramienta estructurada, planificada y ordenada de las tecnologías de uso libre, que pueden ser útiles para obtener las necesidades y problemáticas del lugar de manera sencilla y dejando traza digital, a continuación, se describen las siguientes etapas a ejecutar:

- ***Etapas 1: Recopilación de información:*** es necesario conocer aspectos generales de los distritos de riego, obtener las características principales, descripción de actividades y problemáticas existentes.
- ***Etapas 2: Diagnostico general:*** acotar la zona de trabajo a un módulo de riego, conocer las condiciones actuales, indicar los antecedentes y nivel digitalización del distrito, verificar actualización y que sus datos estén generando traza y que permita visualizarlos de manera rápida.
- ***Etapas 3: Propuesta de tecnologías aplicables para obtención y análisis de datos:*** desde un enfoque de la importancia de los datos y la digitalización de la información, se hará uso sistemas de información geográfica y percepción remota para obtener datos y poder digitalizar la información del distrito de riego, describiendo características y antecedentes principales de cada tecnología.
- ***Etapas 4: Análisis del sector:*** realizar un análisis a partir de imágenes satelitales, sistemas de información geográfica, internet, aplicaciones y drones que permita obtener un marco de referencia, permitiendo presentar datos que generan traza y que pueden ser visualizados de manera rápida.
- ***Etapas 5: Resultados de la obtención de datos y análisis digital:*** a partir del uso de técnicas de Percepción Remota, TIC y SIG, poder obtener un diagnóstico en lo inmediato del comportamiento y nivel de digitalización del sector analizado, observar los cultivos durante su desarrollo pudiendo identificar y ubicar aquellos ambientes o sectores con problemas que requieran una rápida atención, indicando los sitios en donde se debe prestar atención de manera digital y acciones a realizar que nos ayudaran a digitalizar el sector y que son necesarias para realizar la adopción tecnológica de la industria 4.0 de manera ordenada y planificada.



## Capítulo 4 Tecnologías de la industria 4.0

### 4.1 Base de datos de las tecnologías derivadas de la industria 4.0

El avance y la aparición de nuevas tecnologías, herramientas y nuevas técnicas de producción aplicadas al sector hidroagrícola ha crecido de manera acelerada en los últimos años, agricultura de precisión y agricultura 4.0 han revolucionado la producción de alimentos, obteniendo mejores rendimientos en la producción agrícola, disminución de insumos (agua, fertilizantes y fungicidas), optimización de tiempos, entre otros. No obstante, estos avances tecnológicos derivados de la industria 4.0 no son transferidos de manera oportuna y ordenada a trabajadores del sector hidroagrícola. Yang (2018), menciona que en general, la adopción de agricultura de precisión es relativamente lento y varía según el tipo de tecnología, por lo cual, para incrementar el uso de estas tecnologías de forma ordenada e integral, es necesario contar con una herramienta que permita encontrar cada uno de los desarrollos tecnológicos derivados de la industria 4.0 en un solo espacio, por esta razón, se consideró la importancia de consolidar toda esta información en una base de datos, con la información recopilada, analizada, estudiada y clasificada según su área de aplicación, nivel de impacto en el manejo del agua y productividad agrícola, que se obtiene con su implemento, nivel de importancia, de qué forma impacta al cultivo, la fase en que lo hace, especificaciones y ciclo o etapa que cumplen dentro de un marco inteligente.

El concepto de base, procedente del latín *basis*, tiene múltiples usos. El término puede utilizarse con referencia al sostén o fundamento de algo. Un dato, por otra parte, es una información concreta, un testimonio, una prueba o una documentación.

Pérez Porto & Gardey, (2017) definen a la base de datos como el conjunto de informaciones que está organizado y estructurado de un modo específico para que su contenido pueda ser tratado y analizado de manera rápida y sencilla. Al disponer la información de una cierta forma, el usuario puede encontrar aquello que busca con facilidad, a diferencia de lo que le sucedería si todos los datos estuvieran mezclados y sin ningún tipo de orden.

La parte esencial de la estructura de base de datos es el modelo de datos: una colección de herramientas conceptuales para describir los datos, sus relaciones, la semántica (define el tipo de dato) y las ligaduras de consistencia (Silberchatz, 1998).

Existen tres modelos basados en registros: el modelo relacional, el modelo de red y el modelo jerárquico. En el modelo relacional se emplea un conjunto de tablas que representan los datos y las relaciones entre sí mismos, en donde los datos se componen adecuadamente en forma de relaciones (tablas), siendo un objetivo fundamental del modelo mantener la independencia de esta estructura lógica respecto al modo de almacenamiento y a otras características de tipo físico (Castaño & Piattini, 1999).

Desde su nacimiento, la informática se ha encargado de proporcionar herramientas que faciliten la gestión de los datos (Cabello, 2010).

La base de datos de las tecnologías derivadas de la industria 4.0 se realizó en Excel, ya que permite organizar y estructurar adecuadamente la información y consultarla de una manera



fácil y eficiente. Se estructuró en 3 secciones, las cuales son requeridas para un mejor entendimiento de su potencial y la posible implementación bajo un sistema de trazabilidad, que según el Codex Alimentarius, trazabilidad es la capacidad para seguir el movimiento de un alimento a través de etapas específicas de la producción, transformación y distribución (CODEX ALIMENTARIUS, 2004). Las 3 secciones en que se organizó se encuentran en hojas de trabajo independientes, presentando una estructura y diseño distinto para cada sección (Ilustración 4).



Ilustración 4 Portada en Excel de la Base de Datos "Tecnologías 4.0".

#### 4.1.1 Sección 1 Procesos

Para la primera sección, fue necesario identificar puntualmente todo el ciclo de producción (prácticas culturales) y los procesos que interviene en el sector hidroagrícola (fuentes de abastecimiento, estructuras de control, conducción del agua, etc.), de igual forma la infraestructura hidráulica que interviene y forma parte del sector agrícola y por ultimo las tecnologías derivadas da la industria 4.0.

Se diseñó una estructura que permite vincular las nuevas tecnologías con cada ciclo, proceso e infraestructura, las tecnologías se relacionan respecto a su entorno de uso y análisis desde la perspectiva arquitectónica encontrada en los trabajos relacionados con su aplicación en el sector hidroagrícola.



Las tecnologías se catalogaron respecto a las arquitecturas, uso, aplicación en el sector, idoneidad y barreras que puede tener su adopción, fundamentadas en las investigaciones encontradas en la revisión bibliográfica.

Para un fácil acceso y entendimiento, se empleó un sistema de captura de información con los siguientes elementos en columnas:

1. **Proceso:** desglose de actividades (actividades culturales agrícolas) e integración de funcionalidad general (fuentes de abastecimiento, conducción, distribución y control del agua) en un distrito de riego.
2. **Infraestructura:** obras hidráulicas generales que pueden conformar un distrito de riego (presas, canales, obras de control, etc.).
3. **Tecnologías Industria 4.0:** las tecnologías encontradas que pueden participar en diferentes ciclos de inteligencia a mejorar respecto a la arquitectura propuesta, en el manejo de los recursos, control de actividades, y toma de decisiones para mejorar la eficiencia y rendimiento en el distrito de riego.
4. **Ejemplos de ciclos tecnológicos:** imágenes de iteraciones encontrados en la bibliografía.

#### 4.1.2 Sección 2 Tecnologías

En esta sección se consolidó y organizó toda la información de las tecnologías derivadas de la industria 4.0, los criterios considerados para su identificación fueron: que las tecnologías se manejaran en el ámbito de digitalización, agricultura inteligente, de precisión y 4.0, que estuvieran directamente relacionadas con la industria 4.0, que tuvieran disponibilidad de acceso a información complementaria y ser resultado de investigaciones relacionadas con el sector hidroagrícola. Las tecnologías encontradas fueron clasificadas y caracterizadas.

Para un mayor flujo de información, se empleó un sistema de captura de información con los siguientes elementos en columnas:

1. **Nombre:** título de la tecnología, herramienta o técnica encontradas
2. **Tipología:** Las tipologías utilizadas para la clasificación de las innovaciones son:
  - a. **Tecnología:** innovación encontrada en el contexto de la industria 4.0 y que su aplicación está orientada a resolver problemas concretos del sector hidroagrícola.
  - b. **Técnica:** procedimientos que han revolucionado la forma de producción de alimentos y derivan de la implementación de tecnologías de la industria 4.0.
  - c. **Herramienta:** sistemas que facilitan las actividades dentro de la cadena de producción en ámbitos como el administrativo o financiero.
  - d. **Maquinaria:** conjunto de elementos móviles y fijos cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar, transferir, aplicar o regular cualquier tipo de energía, para realizar actividades agrícolas.



3. **Ciclo inteligente:** relacionada directamente con las arquitecturas de aplicación tecnológica encontradas en diferentes investigaciones, colocando la arquitectura más apropiada respecto a un uso integral de todas estas, e indica la actividad que desarrolla la tecnología respecto al área de aplicación de un sistema inteligente que son:
  - i. **Diseño:** aportar los estudios para proyectar, diseñar.
  - ii. **Planificación:** organizar las actividades a realizar.
  - iii. **Recolección:** obtener los datos.
  - iv. **Monitoreo:** controlar el desarrollo de actividades y variables dentro de todo el sistema hidroagrícola.
  - v. **Evaluación:** valorar las condiciones y acciones aplicadas.
  - vi. **Almacenamiento:** recopilar y guardar la información.
  - vii. **Consulta:** permite a los usuarios visualizar en una interfaz los datos, predicciones e información vital del sector y sus actividades.
  - viii. **Comunicación:** conectar a los usuarios, dispositivos, tecnologías entre ellas.
  - ix. **Procesamiento:** generar predicciones y recomendaciones.
  - x. **Ejecución:** realizar las acciones.
  - xi. **Supervisión:** vigilar las condiciones y acciones aplicadas.
  - xii. **Análisis:** estudiar los datos y extraer conclusiones.
  - xiii. **Toma de decisiones:** sistema unificado con bastantes datos y conexiones volviéndose más preciso en sus decisiones.
4. **Descripción General:** descripción del funcionamiento respecto al sector hidroagrícola, cuál es su propósito.
5. **¿Qué hacen?:** principales actividades respecto a la arquitectura propuesta.
6. **¿Qué se obtiene?:** principales alcances respecto a la arquitectura propuesta.
7. **Nivel de importancia:** se relaciona al tipo de sistema que aporta la tecnología:
  - i. **Digitalizar:** registrar datos en forma digital.
  - ii. **Gestionar:** organizar y mantener procesos de datos para satisfacer las necesidades del ciclo inteligente.
  - iii. **Monitor de Condiciones:** recopilar información importante del campo
  - iv. **Automatizar:** sistemas que realizan las tareas de producción por medio de elementos tecnológicos.
  - v. **Optimizar:** mejorar actividades obteniendo mejores resultados en menor tiempo.
  - vi. **Conectar:** comunicar a los usuarios, dispositivos, tecnologías entre ellas.
8. **Especificaciones:** descripción técnica, partes principales que la conforman. características y necesidades básicas para su funcionamiento.
9. **Tecnologías que se complementan:** las tecnologías elementales para obtener el máximo potencial.
10. **Barreras:** información de las dificultades para el uso o implementación respecto a su funcionamiento.



11. **Implementación:** principales factores para adecuarlos, equipo necesario a considerar para una correcta aplicación.
12. **Observaciones:** datos interesantes a considerar respecto a condiciones y formas de uso.
13. **Ventajas** de implementar las tecnologías en el sector hidroagrícola.
14. **Desventajas** al implementar las tecnologías en el sector hidroagrícola.
15. **Imágenes y herramientas** visuales de las tecnologías, que ayuden a entender su aplicación y arquitectura.

De esta forma se ilustra la información de las tecnologías, técnicas, herramientas y maquinaria disponibles en el sector agrícola desde la agricultura de precisión hasta las principales tecnologías de la industria 4.0, permitiendo facilitar el entendimiento y acceso a los usuarios y público en general para poder elegir entre la oferta disponible la que más convenga a sus necesidades.

#### 4.1.3 Sección 3 Bibliografía

En esta sección se presentan todo el material que dio origen a la información: referencias que soportan la información presentada, análisis de contenido, mediante la identificación y recopilación de los resultados de investigaciones, artículos, tesis, revisiones, estados del arte, conferencias, blogs, noticias reportes, libros, páginas de internet, videos, tutoriales, webinars, que estuvieran relacionados con el tema de tecnologías 4.0 y su aplicación al sector hidroagrícola y por medio de criterios de selección puntualizados, los cuales debían responder a preguntas específicas de esta investigación:

- ¿Qué tecnologías han surgido a partir de la industria 4.0?
- ¿Cuáles de estas tecnologías intervienen en el sector hidroagrícola?
- ¿Cómo interfieren en el sector hidroagrícola y en que procesos?
- ¿De qué forma se han implementado y que se obtiene con su adopción en el sector hidroagrícola?

Como parte del proceso de recolección y análisis de contenido de información de la investigación documental, se empleó un sistema de captura de información con los siguientes elementos en columnas:

1. **Tema:** indica el contenido principal del documento al que hace referencia la fila.
2. **Título:** es el encabezado principal del documento al que hace referencia la fila.
3. **Formato:** distingue el tipo de documento al que hace referencia la fila.
4. **Bibliografía, Sitio Web:** referencia o liga de internet sobre el documento al que hace referencia la fila.
5. **Observaciones:** descripción de características importantes del documento.
6. **Importancia del documento:** se realizó una clasificación jerárquica con base en el tipo de documento, contenido y periodo de tiempo, que determina el nivel de importancia de la investigación documental para cada registro, respecto al tema fundamental que es saber el potencial de las tecnologías derivadas de la industria 4.0 y que lograron responder a las preguntas planteadas en esta investigación. A





continuación, se muestran los criterios selectivos empleados para clasificar los documentos fundamentales del estado del arte de esta investigación:

- i. **Alto:** artículos, tesis, libros, tutoriales, que respondan a publicaciones comprendidas entre el año 2014 y 2020, y abarcan las investigaciones sobre tecnologías derivadas de la industria 4.0, proyectos de adopción de tecnologías al sector hidroagrícola, que se ha hecho en el sector, resultados a partir de su adopción indicando arquitecturas utilizadas y como interfieren en el sector.
  - ii. **Medio:** artículos, tesis, revisiones, estados del arte, conferencias, reportes, libros, páginas de internet, videos, tutoriales, webinars, que respondan a publicaciones comprendidas entre el año 2010 y 2020, y abarcan las investigaciones sobre la evolución de tecnologías, su adopción en otros sectores, destacan la importancia de la aplicación de nuevas tecnologías.
  - iii. **Bajo:** páginas de internet, folletos, promociones, videos, artículos, tesis, libros, que respondan a publicaciones comprendidas en cualquier año, y abarcan investigaciones de TIC, agricultura de precisión, manuales de tecnologías, catálogos de maquinaria y equipos.
7. **Resumen:** ideas principales del archivo.

La mención de nombres o productos comerciales es con el único fin de proporcionar información específica, obtención de imágenes y fotografías, y no implica recomendación o respaldo de parte de esta investigación.

Se podrá acceder a la base de datos ingresando al siguiente enlace:

<https://www.hidroagricola4.info/>

En la siguiente ilustración, se aprecia la página de internet que contiene una breve explicación de la Industria 4.0, y en la que se puede descargar la base de datos en formato Excel.

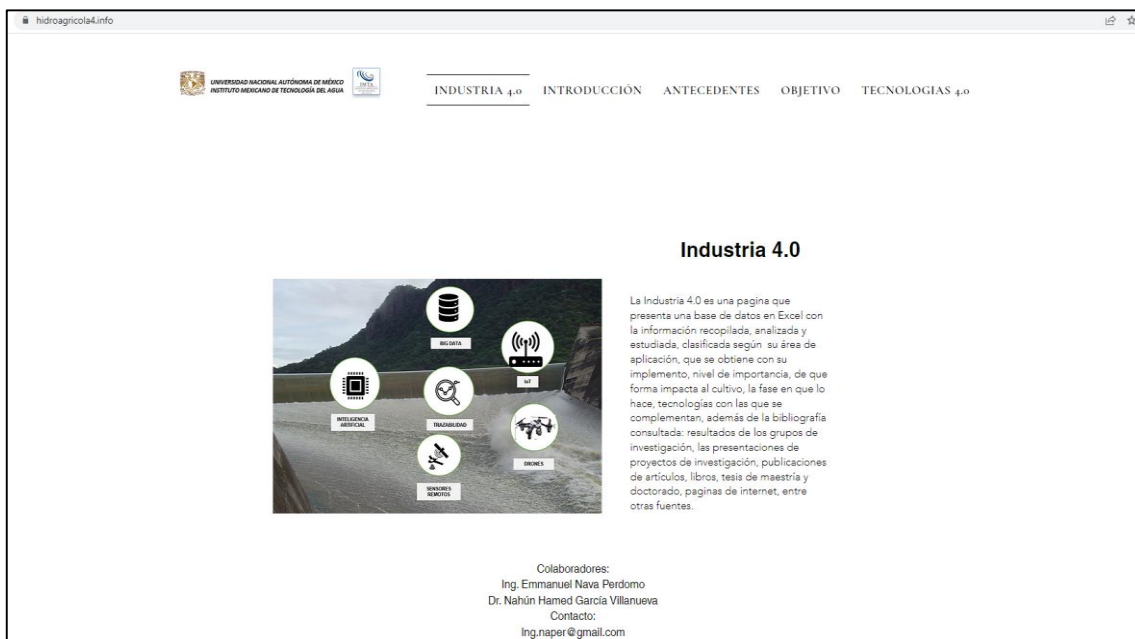


Ilustración 5 Página de Internet desde la cual se puede descargar la Base de Datos Tecnologías 4.0



Como complemento a esta Base de Datos, a continuación, se define, explica y describe cada una de las tecnologías, técnicas y herramientas derivadas de la cuarta revolución industrial usadas en el ecosistema hidroagrícola, por tal motivo se presenta en los siguientes apartados una revisión bibliográfica de las tecnologías que han acontecido a partir de la cuarta revolución industrial desde antes que se acuñara el término, describiendo las principales tecnologías de la agricultura de precisión y la agricultura 4.0, además de los pilares de las tecnologías derivadas de la industria 4.0, las principales herramientas, técnicas y herramientas que han surgido para revolucionar la manera de producir alimentos, presentando una descripción de cada una de las tecnologías y su contribución para afrontar los principales problemas relacionados con el sector hidroagrícola.

## 4.2 Agricultura de Precisión u Agricultura 3.0

Bongiovanni et al. (2006), definen que la agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo.

La principal característica de la agricultura de precisión es la adquisición de datos de todas las posiciones del terreno, de esta forma se puede trabajar con más detalle. Al tener información exacta de cada posición se puede comparar las características de distintas coordenadas introduciendo la variabilidad; en este tipo de agricultura se tienen en cuenta las variaciones temporales, espaciales e históricas o predictivas. (Kreimer, P. 2003).

La agricultura de precisión, una de las principales herramientas de la agricultura 4.0, comenzó cuando las señales de GPS se pusieron a disposición del público en general. Permite la orientación de los vehículos y la vigilancia y el control específicos al lugar del movimiento. Esto permite mejorar la precisión de las operaciones y también la gestión de las variaciones de desplazamiento sobre el terreno. El objetivo es dar a cada planta exactamente lo que necesita para crecer de forma óptima, con el fin de mejorar la producción agronómica y al mismo tiempo reducir los insumos, produciendo más con menos (CEMA, 2017).

Además, Mosquera et al. (2020), agrega que la agricultura de precisión contribuye a lograr un menor impacto ambiental, en lo que, a la aplicación de pesticidas, abonos y otras sustancias nocivas se refiere.

Yousefi & Razdari, (2015), mencionan que la agricultura de precisión es una tecnología relativamente nueva, la cual permite hacer uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) como son: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG), uso de Internet, control automático, aplicaciones móviles, telecomunicaciones, sensores, las cuales se describen a continuación:



### 4.2.1 Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC)

Se comprende bajo la denominación de TIC a aquellas tecnologías surgidas de los avances basados en la informática, la internet, las telecomunicaciones y las tecnologías audiovisuales, incluyendo los procesos de convergencia de reciente desarrollo. Para efectos del estudio, el foco se centra en el acceso y uso de computador, Internet y telefonía celular y sus efectos sociales, económicos y culturales en el sector agropecuario y en las áreas rurales (Nagel, 2012).

De acuerdo con Espinoza et al. (2017), indica que las TIC son instrumentos que deben ser aprovechados por los productores agrícolas y convertirse en ayuda, a su vez, con ello se lograría generar un uso racional e inteligente de los recursos naturales, lo que contribuirá a reducir los procesos de degradación de los ecosistemas y al mismo tiempo el cambio climático, sin embargo al analizar las TIC relacionadas con la agricultura se enfrentaron al problema de la falta de sensibilidad en este nexos, que provoca bajas inversiones en herramientas TIC (hardware, software, intranet, web, celulares, entre otros) ocasionando el atraso digital de las instituciones públicas para la agricultura en territorios tan necesitados como América Latina y el Caribe.

Es importante mencionar de igual forma la importancia de las TIC en el marco del acceso a la información y organización del conocimiento facilitando de esta forma el poder realizar una implementación ordenada de las tecnologías nuevas y tradicionales que logren sacar el mayor provecho al sector agrícola, la siguiente gráfica (Ilustración 6) muestra las etapas de adopción de las TIC, en un camino de progresiva intensificación del uso de la información y el conocimiento.

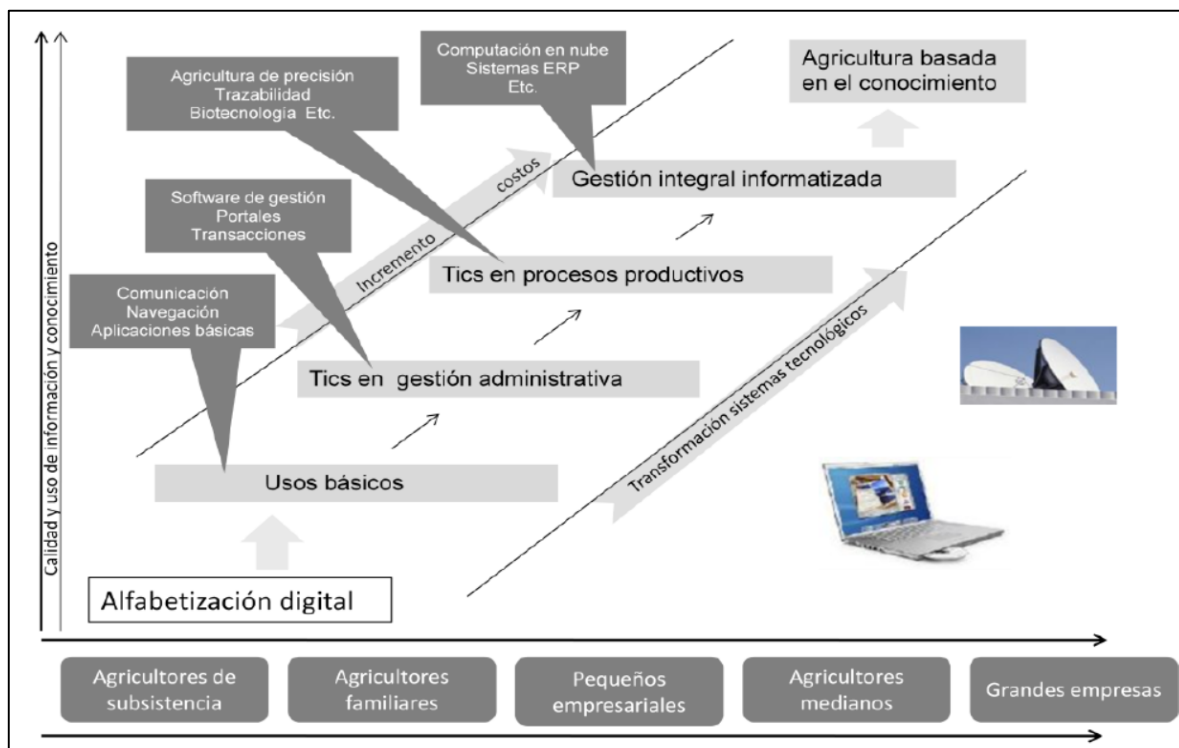


Ilustración 6 Estadios de adopción de las TIC por los agricultores (Nagel, 2012).



Destacando que la fase de una alfabetización digital es elemental para poder aprovechar los usos básicos, que son comunicación, navegación y aplicaciones básicas para poder introducirse en las TIC de manera profesional, sin perder de vista que para subir de nivel hay un incremento en los costos y demanda de mejores sistemas tecnológicos.

#### **4.2.2 Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)**

El GPS está basado en la localización de un punto terrestre por medio de satélites, permitiendo identificar y registrar las coordenadas de un punto específico, esto ayuda a ubicar con mayor facilidad un objeto o persona. El GPS es la base de la agricultura de precisión, siendo un dispositivo que permite determinar la ubicación exacta de sensores para diferentes variables en el territorio (Fernández de Castro Fabré & Albóniga Gil, 2011).

Yousefi & Razdari (2015), afirman que el GPS ha permitido a los agricultores ser más productivos y eficientes en sus actividades agrícolas, una de las ventajas es que permite conocer la ubicación exacta de sensores que permiten la recepción de información ya sea de irrigación, fertilización, estado de cosecha, entre otros; permitiendo la elaboración de planes y toma de decisiones para próximos cultivos que permitan elevar la producción paulatinamente.

Existen diferentes equipos en la agricultura de precisión que requieren del uso del GPS para su correcto funcionamiento y operación, Bongiovanni et al. (2006), indica que los equipos se pueden diferenciar en dos tipos: aquellos que permiten realizar, monitoreos de parámetros productivos tales como monitores de rendimiento y de calidad y otros equipos que permiten la aplicación de productos en forma diferencial aplicación de productos en forma diferencial, aplicación de productos en forma diferencial es decir, que consideran la variabilidad espacial de los requerimientos del cultivo (agua, fertilizantes) o de plagas y enfermedades (insecticidas, fungicidas).

#### **4.2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Se define como una tecnología con un sistema de software y procedimientos diseñados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelación y salida de datos espacialmente referenciados. Así mismo, es frecuente el uso del término SIG para referirse exclusivamente a la aplicación o programa informático que permite gestionar y analizar la información geográfica y los datos vinculados a ésta (Taracido et al., 2014).

El uso de GIS permite presentar mapas combinando varias capas, mostrando así la interacción entre cosecha, características topográficas, propiedades del suelo, etc. De esta manera se puede observar la variabilidad en las parcelas y obtener una mejor comprensión de qué zonas son más productivas que otras (Kreimer, P. 2003).

Para el sector agrícola Ortiz et al. (2015), mencionan que esta tecnología permite facilitar el trabajo en el campo a los agricultores, debido a que ayuda a los usuarios a crear consultas,



análisis de información espacial, editar datos, mapas y presentar resultados de todas estas operaciones de forma rápida y eficaz, lo cual resulta ventajoso para el agricultor.

Además, Lopez et al. (2017), menciona que una de las áreas más intervenidas con esta tecnología ha sido la agricultura, En este caso se ha demostrado que adoptar un SIG en campo es un acierto; es una tecnología que cada vez tiene mayores aplicaciones y que se encuentra ligada directamente a lo que hemos llamado “Agricultura Inteligente” y que definimos como la aplicación correcta de insumos en el momento adecuado y en el lugar exacto. Puesto que mantenerse informados de las novedades tecnológicas requiere de un compromiso que implica analizar el sinfín de posibilidades que esto representa.

#### 4.2.4 Red de Internet

La red Internet es una herramienta útil para el desarrollo rural y agrícola que aporta nuevas fuentes de información, pudiendo abrir otros canales de comunicación para el sector rural y organizaciones agrícolas. Esta red ofrece un medio para atenuar la brecha que existe entre los profesionales del desarrollo, la población rural y los productores agrícolas a través del diálogo y la interacción. Asimismo, promueve alianzas y redes interpersonales, además de nexos transversales y paralelos entre organizaciones. Los beneficios principales incluyen además una mayor eficiencia en el uso de recursos para el desarrollo, menor duplicación de actividades y costos reducidos de comunicación, así como un acceso global a la información y recursos humanos (Sifuentes et al., 2016).

Otros de los usos a los que se puede acceder gracias a la red de internet son las redes sociales, a las cuales se ha recurrido para obtención de datos, las plataformas sociales han transformado nuestra vida cotidiana a través de la comunicación instantánea, global y de uno-a-muchos. La comunicación en los entornos industriales se verá enormemente mejorada con una interacción más dinámica de contenido enriquecido que favorezca la colaboración y la innovación. Por otro lado, las redes sociales "clásicas" facilitarán la fabricación bajo demanda y proporcionará gran cantidad de información sobre los clientes (del Val, 2016).

Las soluciones que se encuentran en Internet constituyen el “sistema nervioso” que sustenta las áreas inteligentes y la agricultura inteligente, dada la responsabilidad del flujo de información y la capacidad de acción rápida (Janc et al., 2019).

Es importante también mencionar que en internet se pueden encontrar distintas bases de datos, que se usan como recurso con las tecnologías más relevantes, en las que se pueden encontrar la utilización de tecnologías, campos de aplicación, buenas prácticas, donde comprar y vender insumos y productos, métodos de capturar y difundir el conocimiento y sistemas de trabajo a todos los agentes involucrados, algunas de estas se describen a continuación:

- SAGARPA Produce: proporciona información detallada para conocer el potencial productivo del campo donde te encuentres
- SAGARPA Mercados: permite visualizar el precio diario en las principales centrales de abasto de México.



- Base de datos de tecnologías TECA de la FAO en donde se puede encontrar una base de datos de las tecnologías, una tecno biblioteca, herramientas de apoyo, etc.
- AQUASTAT es el sistema de información mundial de la FAO sobre recursos hídricos y gestión del agua para la agricultura. Recopila, analiza y proporciona acceso gratuito a más de 180 variables e indicadores por país a partir de 1960. AQUASTAT se basa en las capacidades y la experiencia nacionales con un énfasis en África, el Cercano Oriente, los países de la ex Unión Soviética, Asia y América Latina y el Caribe.
- Base de datos mundial armonizada de suelos v 1.2. la Base de datos mundial armonizada de suelos es una base de datos ráster de 30 segundos de arco con más de 15000 unidades de mapeo de suelos diferentes que combina las actualizaciones regionales y nacionales existentes de información de suelos en todo el mundo ( [SOTER](#) , ESD, Soil Map of China, [WISE](#) ) con la información contenida en el Mapa mundial de suelos FAO-UNESCO escala 1: 5 000 000 (FAO, 1971-1981).
- AQUAMAPS : base de datos espacial mundial sobre agua y agricultura (<https://data.apps.fao.org/aquamaps/>).
- Red de Conocimiento sobre cambio climática (<http://www.cckn.net/>)
- Grupo de discusión entre expertos de la FAO y académicos de la Universidad Politécnica de Madrid (<http://eagriculture.bitacorras.com/>)
- Red SERCOTEC ofrece información, herramientas y servicios a gestión de empresas.
- Ask- agricultura del Centro de Información Agraria UAE-AGRICENT
- En Colombia, se cuenta con el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología Agroindustria – SNCTA, el cual es conformado por entidades del sector agropecuario que desarrollan procesos de investigación, formación y transferencia de tecnología.
- El Atlas Climático Digital de México (ACDM) es el proyecto eje de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) del Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM y su desarrollo ha permitido colaborar y participar con diversos proyectos e investigaciones. El ACDM se fundamenta en la necesidad de disponer de mapas y datos de nuestro país, que contengan información de distintas variables climáticas que son necesarias para una gran diversidad de usuarios, destacando la de modelar la distribución de la biodiversidad, así como para manejar o adecuar el impacto de un posible cambio climático sobre ella (UNIATMOS, 2013).

#### 4.2.5 Maquinaria

La línea de la ingeniería agrícola se refiere a la evolución de las máquinas agrícolas, utilizando sensores y sistema de posicionamiento global (GPS) para mapeo y aplicación de insumos con dosis variada (Bongiovanni et al., 2006).



Morgan and Ess (1997), mencionan que, en la mayoría de las cosechadoras disponibles en el mercado mundial, que operan dentro del concepto de agricultura de precisión, se encuentran los siguientes componentes del sistema de monitoreo de rendimiento de granos:

- Sensores para medir el flujo de los granos;
- Humedad de los granos;
- Velocidad de cosecha;
- Indicador de posición de la plataforma de corte de la cosechadora;
- Monitor de funciones de las operaciones; y
- GPS.

Son los sensores los que complementan a la maquinaria para que esta pueda realizar tareas de agricultura de precisión, recoger datos y poder cosechar en los lugares señalados.

CEMA (2017), indica que, ahora los fabricantes de máquinas agrícolas se centran, en primer lugar, en el desarrollo de máquinas adecuadas para la agricultura digital. En otras palabras, la industria se centra en el desarrollo de máquinas que son compatibles con la infraestructura digital de la granja y pueden hacer el requerido. Contribución a la optimización de los procesos productivos.

Las máquinas agrícolas digitalmente inteligentes deben:

- Poder enviar y recibir información a través de sensores y hardware de comunicación adecuados,
- Facilitar las operaciones automatizadas,
- Permitir la utilización óptima de la maquinaria, y
- Ayudar al conductor.

#### 4.2.6 Aplicaciones

Son un tipo de software desarrollado principalmente para dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes, tabletas, computadoras de bolsillo, entre otros. Presentan un conjunto de ventajas como portabilidad y disponibilidad que son superiores a las aplicaciones de computadora convencionales. Las aplicaciones móviles permiten sacar un mayor provecho de las características de hardware del dispositivo, así como información proporcionada directamente por el usuario, con fines de alimentación de sistemas de información (Consumidor, 2018).

Existen diversas aplicaciones vinculadas con los dispositivos móviles, que permiten a los agricultores o personas relacionadas con la producción agrícola realizar cálculos en área, dimensiones, diseño de instalaciones e incluso se pueden controlar diferentes sistemas de producción incorporando cámaras que ayuden a determinar adecuadamente el estado del cultivo, períodos de riego, épocas de fertilización y controles fitosanitarios periódicos o inminentes desde un lugar externo al sistema de producción (Molina et al., 2010a).

Palmer, (2012), indica que, la tecnología móvil ofrece la oportunidad de que los productores se conviertan en recolectores de datos a nivel local, lo que hace posible poder obtener datos



en tiempo real e identificar tendencias como el desplazamiento de plagas, para poder alertar a los productores. A continuación, se exponen algunas aplicaciones existentes que ofrecen diferentes apoyos para el sector agrícola.

Las aplicaciones Mide Mapas y FloraMatch™ App, por señalar algunos ejemplos, la primera permite medir la parcela y los cultivos de una propiedad, además de hacer mediciones, los datos pueden ser trasladados al ordenador para ser procesados y analizados; la segunda por su parte facilita la planificación en fertilización, teniendo datos como área de la parcela, edad del cultivo y requerimientos nutricionales. Asimismo, con ayuda de un GPS y el computador se pueden controlar todas las labores de los cultivos, horarios de riego, entre otros, lo cual se puede establecer en la aplicación y de esta manera se puede reducir considerablemente la cantidad de mano de obra en la producción (Aguayo, 2012).

Una de las aplicaciones más extendidas es el control de humedad del suelo mediante sondas de suelo instalados en campo y equipos de recogida de datos en continuo. A través del dispositivo móvil, el usuario puede comprobar in situ las condiciones del suelo y guardar los datos en un archivo. El archivo se puede abrir, posteriormente, utilizando una hoja de cálculo (Molina et al., 2010b).

Aplicaciones como LOOP de Digital Green que ayuda a más de 1.5 millones de pequeños agricultores a vender sus productos y a reducir los costos de transporte, cuando la producción de los agricultores está lista para vender, el agregado determina que mercado ofrece el mejor precio, organiza el transporte y vende el producto.

GreenSat, herramienta para estimar la cantidad de Nitrógeno que se debe aplicar al terreno, utilizando datos actualizados de Índices de Vegetación (NDVI) generados a partir de imágenes SPOT para diferentes regiones del proyecto MasAgro.

La interfaz de programación de aplicaciones, conocida también por la sigla API, en inglés, application programming interface, es un conjunto de definiciones y protocolos que se utiliza para desarrollar e integrar el software de las aplicaciones, de acuerdo con Arista (2020) indica que son rutinas, funciones y procedimientos desarrollados en algún lenguaje informático y que se presentan como una librería o extensión para desarrollar aplicaciones, agregando que existen APIs que ayudan a desarrollar mapas en línea y que residen en un servidor web y utilizan lenguaje de programación utilizado por los navegadores de internet del lado del cliente, a continuación, se presentan algunos APIs que se pueden utilizar para crear mapas y aplicarlas en la agricultura.

MasAGRO API, que mediante coordenadas y puntos directamente sobre el mapa se pueden obtener una serie de datos que son extraídos de diferentes fuentes (Ilustración 7).



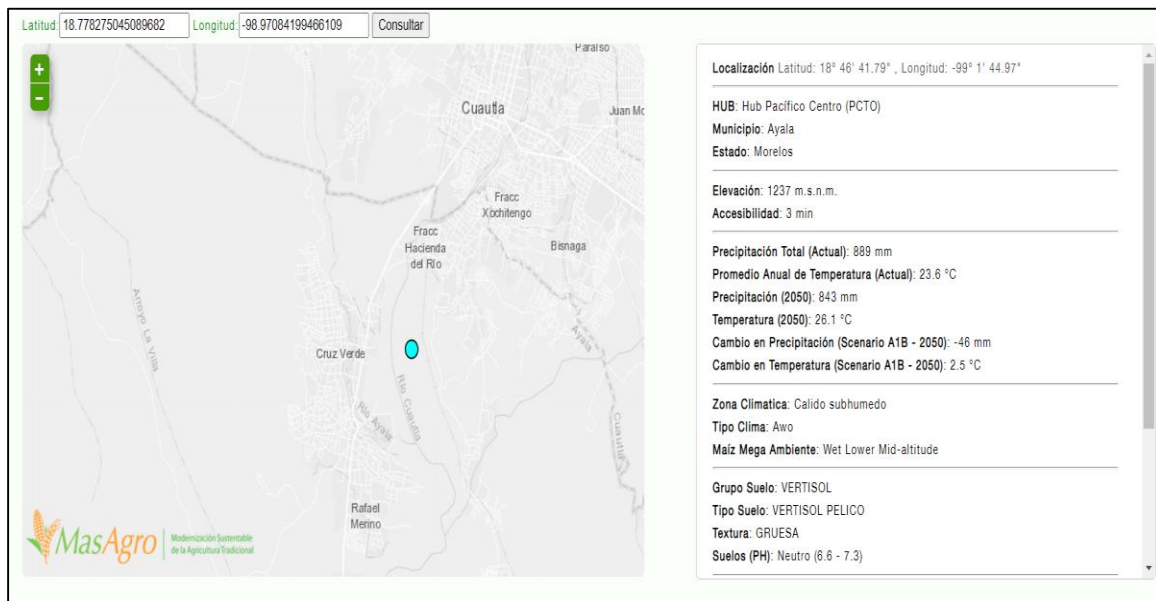


Ilustración 7 Mapa para acceder a los datos expuestos por el API de Conservation Earth, recuperado: <http://46.20.115.195/MasAgroTTF/api/>

#### 4.2.7 Software

Rutinas que se han elaborado para realizar diferentes tareas, permitiendo al usuario analizar, controlar, determinar, calcular y elaborar varios aspectos importantes dentro del sector agrícola. Permitiendo adecuar los componentes lógicos a las necesidades del usuario, que hacen posible resolver un problema, mejorar algún proceso, administrar costos e insumos, hacer un seguimiento, etc.

Algunos ejemplos de los softwares y plataformas que se han aplicado en el sector agrícola de México son los siguientes:

**Yara**, la segunda mayor empresa de fertilizantes a escala global, presentó en 2019 en México, su programa Atfarm, que la compañía quiere posicionar como “un google agrícola”, desde el cual se puede buscar el terreno de un agricultor o empresa, y analizar la necesidad diferenciada de fertilizantes. Yara lo ofrece “gratuitamente” por un año en el país.

El paquete “**Farmbeats**” que Microsoft presentó en México a mediados de 2019, un sistema de monitoreo permanente de la condición de suelos, humedad y agua, estado de los cultivos (si necesitan riego, si hay enfermedades, plagas u otras deficiencias), datos climáticos, datos del tiempo (dirección del viento, lluvias, niveles de humedad y más), para avisar desde la nube de Microsoft, cuándo y dónde sembrar, aplicar riego, fertilizantes o agrotóxicos, cuando cosechar o cuánto esperar.

**AquaCrop** es un modelo de simulación de crecimiento de los cultivos desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO para abordar la seguridad alimentaria y evaluar el impacto del medio ambiente y la gestión de los cultivos sobre la producción. AquaCrop simula la respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua y es particularmente



adecuado para las condiciones en las que el agua es un factor limitante en la producción de cultivos. AquaCrop equilibra precisión, simplicidad y robustez. Utiliza un número relativamente pequeño de parámetros y variables que requieren métodos simples para su determinación, lo que simplifica su utilización en diferentes condiciones y localizaciones.

El paquete de **software DSSAT** comprende modelos de simulación de cultivos para más de 42 cultivos. El paquete DSSAT consta de: 1) sistema de gestión de base de datos para suelo, clima, coeficientes genéticos e insumos de manejo, 2) modelos de simulación de cultivos, 3) serie de programas de utilidad, 4) serie de programas de generación del clima, 5) programa de evaluación de estrategias para evaluar opciones, incluida la elección de la variedad, la fecha de siembra, la densidad de la población de plantas, el espaciamiento de las hileras, el tipo de suelo, el riego, la aplicación de fertilizantes, las condiciones iniciales de los rendimientos, el estrés hídrico en las etapas vegetativas o reproductivas de desarrollo y los rendimientos netos.

Rendón-Sustaita et al. (2018), presenta el caso de **Magros**, una tecnificación de los sistemas de riego basado en el desarrollo de un software y hardware en el cual a base de información que se recopila de los cultivos se crea un plan de riego con parámetros agronómicos y climatológicos que es en tiempo real, sin necesidad de afectar la infraestructura del sistema de riego existente.

**El Software ICC** (Indicadores del cambio climático) ofrece un conjunto de herramientas para almacenar y procesar grandes conjuntos de datos meteorológicos diarios. El software permite el cálculo y análisis de 27 índices de cambio climático y cuatro índices para viñedos en crecimiento. Los datos se pueden analizar en intervalos de tiempo mensuales, estacionales y anuales para identificar tendencias y anomalías climáticas. La comprensión del cambio climático puede ayudar a elaborar estrategias más eficaces para mitigar los efectos de los eventos extremos en la agricultura y los ecosistemas en general (Bautista et al., 2019).

Programa **IrriModel 2010** opera bajo una plataforma computacional para la gestión integral del riego a través de internet, Sifuentes et al., (2013), menciona las siguientes características que el software ofrece:

- Calcula la demanda hídrica del cultivo aún bajo condiciones variables de clima
- Elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua y sistemas de riego.
- Pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo, determinado por la acumulación de grados día (GDA).
- Ayuda a mejorar la administración de las actividades de las unidades de producción.
- Genera y envía solicitudes de riego al módulo que le presta el servicio de riego.
- Evalúa el manejo del riego de una o un grupo de parcelas al final de un ciclo agrícola.
- Consulta de bases de datos climáticos en tiempo real.

Otro uso de los Softwares es la simulación computacional la cual ayuda a garantizar la eficiencia y operabilidad de todo un sistema ya que, con ayuda de una computadora, los profesionales pueden realizar diferentes análisis hidráulicos, hidrológicos, ambientales entre otros, que ayudan a tomar mejores decisiones, reducir tiempos, a interpretar mejor las condiciones actuales y de proyecto integrando todos los datos que intervienen en un proceso.



#### 4.2.8 Sensores

El objetivo primordial del uso de sensores inalámbricos en la agricultura de precisión es permitir al agricultor o productor determinar con cierto grado de exactitud las necesidades de riego y fertilizantes, los puntos óptimos de siembra y recolección, las fases de desarrollo y de maduración de productos y demás actividades agrícolas primordiales. Los sensores inalámbricos son muy útiles en la agricultura de precisión, este tipo de sensores exigen la utilización de varias redes que pueden estar compuestas de diferentes tipos de dispositivos (gateways, nodos, sensores, repetidores, entre otros). Con estos sensores se monitorizan los parámetros más importantes del suelo como temperatura, pH, humedad, conductividad eléctrica, etc. (López Riquelme et al., 2016).

Existen sensores muy actualizados como es el sensor de cosechas que permite al agricultor saber el rendimiento que obtuvo en cada unidad de producción, también estos sensores permiten al agricultor medir la humedad o fertilidad del suelo; existen además sensores multispectrales y sistemas de teledetección que permiten conocer el estado de la vegetación y la presencia de plantas(Díaz García-Cervigón, 2015).

Debido a la importancia de la recolección de datos es el mayor potencial de la agricultura de precisión, se vio la necesidad de abundar más en el tema y presentar la selección de los sensores.

La selección de un sensor es principalmente afectada por la calidad, la infraestructura, el rango de medición y el tiempo de respuesta. Parámetros de entrada, tipo de material, tecnología, transducción son algunas de las variaciones en el sensor (Mathivanan & Jayagopal, 2018).

Tovar Soto et al. (2019), documentaron a partir de la recopilación de 46 documentos una gráfica que se observa en la Ilustración 8, de los sensores más utilizados por variable de medición física y por tecnología, logrando evidenciar que los sensores más utilizados en tecnologías IoT en agricultura corresponde a dispositivos de medición de temperatura y humedad con porcentajes de 22% y 19% respectivamente.

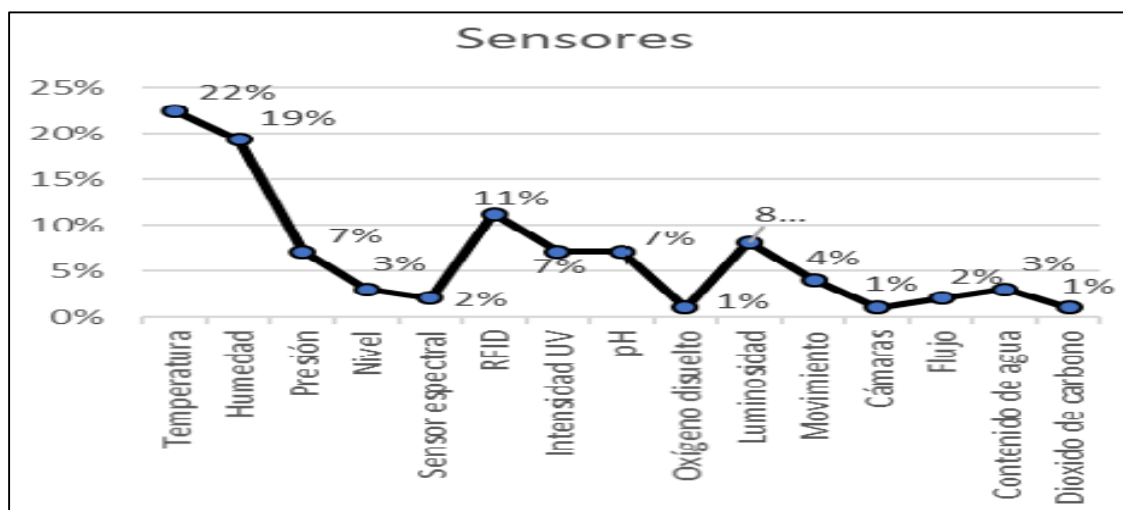


Ilustración 8 Porcentaje de inclusión de dispositivos sensores en agricultura (Tovar Soto et al., 2019).



En la Tabla 2, se presenta una recopilación de algunos sensores con las diferentes variables que pueden medir del suelo.

Tabla 2 Comparación del sensor relacionado con el suelo (Mathivanan & Jayagopal, 2018).

Sensores	Características
Sensor de suelo portátil Pogo	Humedad del suelo, flujo de agua, temperatura del suelo, conductividad, salinidad.
Sensor de suelo Hydra probe II	Humedad del suelo, flujo de agua, conductividad de la temperatura del suelo, salinidad, nivel del agua.
ECH2OEC-5	La humedad del suelo
VH-400	Humedad del suelo, el nivel del agua
EC-250	Humedad del suelo, flujo de agua, nivel del agua, temperatura del suelo, conductividad, salinidad.
THERM200	Temperatura del suelo
Medidor de lluvia con cubo basculante	Volumen de agua
Aqua Trak500	Nivel del agua
WET-2	Temperatura del suelo, conductividad, salinidad

En la Tabla 3, se presenta una recopilación de algunos sensores con las diferentes variables que pueden medir de la planta.

Tabla 3 Comparación del sensor relacionado con la planta (Mathivanan & Jayagopal, 2018).

Sensor	Características
Sensor de humedad de la hoja	Humedad
237-L, sensor de humedad de la hoja	Humedad, temperatura, humedad
LW100, sensor de humedad de la hoja	Humedad, temperatura, humedad
TPS-2 fotosíntesis portátil	Humedad, temperatura, humedad, CO 2, fotosíntesis
Fotosíntesis de mano CI-340	Humedad, temperatura, humedad, CO 2, fotosíntesis, hidrógeno
Monitor de fotosíntesis PTM-48A	Humedad, temperatura, humedad CO 2, fotosíntesis

En la Tabla 4, se presenta una recopilación de algunos sensores con las diferentes variables que pueden medir del clima.

Tabla 4 Comparación del sensor relacionado con el clima (Mathivanan & Jayagopal, 2018).

Sensores	Características
Sensor de clima compacto CM-100	Temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento
Met Station One (MSO)	Temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento
XFAM-115KPASR	Temperatura, humedad, presión atmosférica
HMP45C	Temperatura, humedad, presión atmosférica



SHT71 (sensor de humedad y temperatura)	Temperatura, humedad, presión atmosférica
SHT75	Temperatura, humedad, presión atmosférica
Fotosíntesis de mano CI-340	Temperatura, humedad
Sensor de temperatura de 107 L	Temperatura

### 4.3 Agricultura Inteligente u Agricultura 4.0

La agricultura 4.0 es un término derivado de la industria 4.0, aplicado a la agricultura, refiriéndose al uso de tecnología de punta en la producción de alimentos. Esta tecnología permite maximizar el uso de los recursos naturales, utilizando, por ejemplo, menos agua para riego o insumos para fertilizar el suelo (Ribeiro et al., 2018).

Clercq et al. (2018), mencionan que la agricultura 4.0 contribuirá a reducir el consumo de agua, fertilizantes y pesticidas, comúnmente aplicado uniformemente en los campos. Con tecnología, será posible utilizar sólo las cantidades mínimas necesarias aplicadas en áreas específicas.

Ribeiro et al. (2018), afirman que además de la introducción de nuevas herramientas y prácticas, la verdadera promesa de la agricultura 4.0 se refiere a una mayor productividad y reside en la capacidad de recopilar, usar e intercambiar datos de forma remota. En la Ilustración 9, se pueden observar todas las tecnologías conectadas e integradas en un sistema de comunicación, proporcionando un servicio y recopilando una cantidad de datos que se integran en un ecosistema de producción para mejorar los procesos y comprender mejor sus necesidades siendo capaz de detectar una pérdida de rendimiento, plagas, enfermedades, una baja oferta en el mercado, etc.



Ilustración 9 Digitalización de la agricultura, caracterizada por la recopilación e intercambio de datos de forma remota. (Adaptado de CEMA (2017))



Las tecnologías bases de la agricultura 4.0 que han revolucionado la forma de producir alimentos, logrando bajar los costos, siendo favorables para el medio ambiente y aumentando la producción y la eficiencia de los recursos naturales, se describen a continuación:

#### 4.3.1 Automatización

La Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas de la Universidad Politécnica de Cataluña en 2012 definió a la automática como el conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas.

Cada día aparecen más sistemas automatizados, gracias al avance que se han tenido en diferentes disciplinas y al desarrollo tecnológico con el que se cuenta hoy en día, existen diferentes sistemas automatizados que se han realizado por ejemplo: Pérez et al. (2014), presentan un prototipo de bajo costo de un sistema de riego agrícola automatizado, monitoreado y controlado remotamente desde un teléfono celular, con la utilización de Arduino para la automatización del sistema y Android facilita la interacción con el usuario, mostrándole los datos del sistema, brindándole la opción de monitorear y controlar el sistema de riego a través de internet desde cualquier parte del mundo, logrando seguridad y flexibilidad al agricultor.

#### Estructuras automáticas

Las estructuras automáticas, por medio de instrumentación, son aquellas a las que se han adicionado dispositivos electrónicos, requieren adecuaciones físicas de la infraestructura, como lectores de niveles y aberturas, y de un *software* que permita ordenar los movimientos requeridos a la estructura. La complejidad del *software* va en función del grado de automatización.

García (2015), menciona que el control local automático permite realizar la operación del canal sin la intervención humana. Se lleva a cabo mediante un sistema de componentes, herramientas y dispositivos que pueden ser fluidicos, mecánicos, eléctricos y/o electrónicos, que operan localmente en los puntos de control en que son instalados. Este equipo monitorea los niveles de la superficie libre del agua, la posición y las aperturas de las compuertas y de las obras de toma. Esta información es procesada a través de un algoritmo de control, por medio del cual se toman las decisiones que conducen a los ajustes que se requieren para satisfacer las necesidades y demandas que la política de operación necesita para el buen funcionamiento del canal

Salcedo (2014), presenta un Sistema automatizado para riego por goteo en aguacate, a partir de medir la humedad de suelo de los cultivos (específicamente palta o aguacate Hass), que se transforma a una señal eléctrica, la cual es acondicionada para su transmisión y posterior procesamiento, que a su vez es digitalizada por el conversor análogo digital (ADC), y se compara con un nivel de referencia, para que el controlador con el actuador (válvula solenoide) decida apertura/ cierre de la misma, con el objetivo de limitar el flujo de agua aplicada. Además, cuenta con un software de monitoreo basado en Labview.



### 4.3.2 Robots Autónomos

Robots se define como las máquinas que pueden llevar a cabo tareas que van desde manejar invernaderos y semillas hasta tractores autónomos capaces de detectar y calcular la cantidad necesaria de sustancias y aplicarlas solo en las áreas requeridas. La robótica no sólo facilita la recolección de datos, sino también previene la pérdida de cosechas, optimiza la eficiencia, monitorea ecosistemas y previene la contaminación (PRIMORDIALES, 2018).

Aquí se incluye a toda la maquinaria que se ocupa en el sector agrícola tales como el tractor, niveladora, cosechadoras, sembradoras, pulverizadoras, etc., un mercado que sigue creciendo, ofreciendo más y mejores maquinas inteligentes y autónomas.

Equipados con aprendizaje automático, los robots pueden adaptar sus acciones como resultado de la experiencia, y lo que es más importante, de la experiencia de robots similares. Por ejemplo, un vehículo sin conductor puede “aprender” al conducir por las calles de una ciudad, pero puede aumentar masivamente su capacidad si aprende de otros vehículos que transitan en otras ciudades del mundo, otros climas, otros terrenos, etc. (Mooney, P., & Grupo, E. T. C. 2019).

#### Robótica Colaborativa y sensorial

Se trata de una nueva generación de robots, caracterizados por ser ligeros, flexibles y fáciles de instalar y, diseñados especialmente para interactuar con humanos en un espacio de trabajo compartido sin necesidad de instalar vallas de seguridad.

La mejora de la inteligencia artificial junto con una nueva sensorial, ha permitido crear robots cada vez más autónomos, flexibles y cooperativos. Con el tiempo, van a interactuar unos con otros y trabajarán con seguridad junto a los seres humanos, aprendiendo de ellos ofreciendo una gama de capacidades muy superiores a las utilizadas en la fabricación de hoy en día, (del Val, 2016).

### 4.3.3 Biotecnología

La biotecnología hace referencia a todas las aplicaciones que se aprovechan de los seres vivos para proporcionar servicios y necesidades mientras que la Ingeniería genética hace referencia a un conjunto de procedimientos técnico-científicos capaces de alterar, modificar o suprimir genes del genoma o incluso, transferir genes entre especies con el fin de obtener unas características o propiedades deseadas en una especie para que sean transmitidas a las siguientes generaciones. (MORCILLO, et al., 2013). La Biotecnología comprende diversas disciplinas, entre las que se incluye la ingeniería genética, como la microbiología, la bioquímica o la biología molecular. (GARCÍA, et al., 2002).

El ADN puede “editarse” por computadora en decenas o cientos de sitios a lo largo de los cromosomas para producir nuevos rasgos o para reflejar una secuencia de genes descubierta en otra especie. Al silenciar una secuencia de genes, “los editores de genes” asumen sus



nuevos rasgos se replicaran en forma segura en cruces con otras razas o variedades (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

Dentro de las estrategias que se han empleado se incluyen mejoramiento vegetal y animal para incrementar rendimientos, caracterización y conservación de recursos genéticos, diagnóstico de enfermedades de plantas y animales, desarrollo de vacunas e inocuidad de los alimentos (Pérez Vázquez et al., 2018).

Clercq et al. (2018), menciona que se están desarrollando algunos estudios para utilizar algas con proteína de alta calidad como sustituto de la proteína animal, minimizando los problemas ambientales y de derechos de los animales. Otros intentan producir carne a partir de células de vaca producidas en el laboratorio.

#### **4.3.4 Impresoras 3D**

Las impresoras 3D son equipos que permiten generar objetos sólidos tridimensionales mediante la adición de material. Este hecho las diferencia de los tradicionales sistemas de producción, que por lo general trabajan por sustracción, es decir, generando formas por medio de la eliminación de material en exceso. Las impresoras 3D trabajan en base a archivos de figuras tridimensionales que contienen la geometría a imprimir. El software de la impresora se encarga de traducir el fichero CAD y generar las órdenes necesarias para reproducir la pieza tridimensional (Carrillo et al., sf).

Las principales ventajas que ofrece la impresión 3D son que ayuda a ofrecer productos y procesos más innovadores en un tiempo más corto. Esto significa que ahorra el tiempo al mercado, que es un tema muy importante en un mundo global y competitivo. Además, establece un relación más amplia y colaborativa con todos los elementos de la cadena de valor, como clientes, proveedores y socios comerciales (Jornadas de Automática, 2017).

Además, la fabricación aditiva eliminará las desventajas en eficiencia de la producción de productos personalizados. Permitirá la creación rápida de prototipos y una fabricación altamente descentralizada: el modelo del producto podría enviarse al sitio de “impresión” más cercano al cliente eliminando pasos intermedios (del Val, 2016).

#### **Impresoras 4D**

En tema de tecnologías de la industria 4.0 se habla sobre impresoras 4D las cuales serán capaces de producir herramientas que puedan cambiar con la luz, temperatura u otra variable.

#### **4.3.5 Realidad Virtual**

Es una simulación artificial o una recreación de un entorno o situación de la vida real. Sumerge al usuario haciéndole sentir que está experimentando la realidad simulada de primera mano, principalmente estimulando su visión y audición. Esta tecnología se está utilizando de forma experimental para acciones demostrativas y formativas





fundamentalmente dirigidas a asesores agrarios y agricultores, de forma que se puedan observar de forma directa simulaciones de operaciones agronómicas a realizar en las explotaciones. (Betancourt, 2018)

Con la realidad virtual se pueden realizar, simulación de entornos virtuales: los entornos en los que interactúan personas, máquinas y productos pueden ser modelados y simulados de manera virtual. Esto permitiría anticipar riesgos, fallas y averías, reduciendo los costos asociados a los procesos de aprendizaje por prueba y error (Moreda, 2020).

#### **4.3.6 Realidad Aumentada**

Tecnología que permite superponer elementos virtuales sobre nuestra visión de la realidad. La realidad aumentada es la mezcla del entorno real con el virtual en un dispositivo tecnológico (Smartphone, Tablet, computadoras, etc.).

Permite complementar el entorno real con objetos digitales. Se trata de sistemas que combinan la simulación, el modelado y la virtualización permitiendo nuevas fórmulas para el diseño de productos y la organización de los procesos, otorgando flexibilidad y rapidez en la cadena productiva (Basco et al., 2018).

Del Val (2016), indica que esta tecnología permitirá proporcionar a los trabajadores información en tiempo real para mejorar la toma de decisiones y los procedimientos de trabajo. Por ejemplo, los trabajadores podrán recibir instrucciones para una reparación y visualizarla haciendo uso de dispositivos como gafas de realidad aumentada con lo que se incrementará la eficiencia y la seguridad.

#### **4.3.7 Redes Inalámbricas de Sensores**

Las Redes Inalámbricas de Sensores o RIS (también llamadas WSN por sus siglas en inglés) están compuestos por decenas, cientos o incluso miles de estos sensores electrónicos que operan con baterías, llamados nodos sensores (motes) y que son distribuidos a lo largo de un ambiente de interés particular. Por ello se considera que cada sensor inalámbrico en una red ad-hoc recolecta datos de su ambiente, como la cantidad de luz, temperatura, humedad, vibraciones y otros factores ambientales. Cada nodo, envía los datos recolectados a sus vecinos, estos a su vez a sus propios vecinos y así sucesivamente, hasta que la información alcanza un destino específico, donde será procesada por computadores, brindando una buena imagen del ambiente circundante en tiempo real (Pérez et al., 2014).

Las redes de sensores están jugando un papel vital en la medición de la variabilidad en el campo para apoyar la toma de decisiones a tiempo. Todos los datos recopilados a través de sensores se utilizan para propósito de análisis o para la toma de decisiones (Aqeel-ur- & Zubair A., 2012). A continuación, en la Ilustración 10 se muestra un ecosistema de entrada y salida de los diversos parámetros que influyen para obtener un modelo más preciso de lo que está pasando en los cultivos.

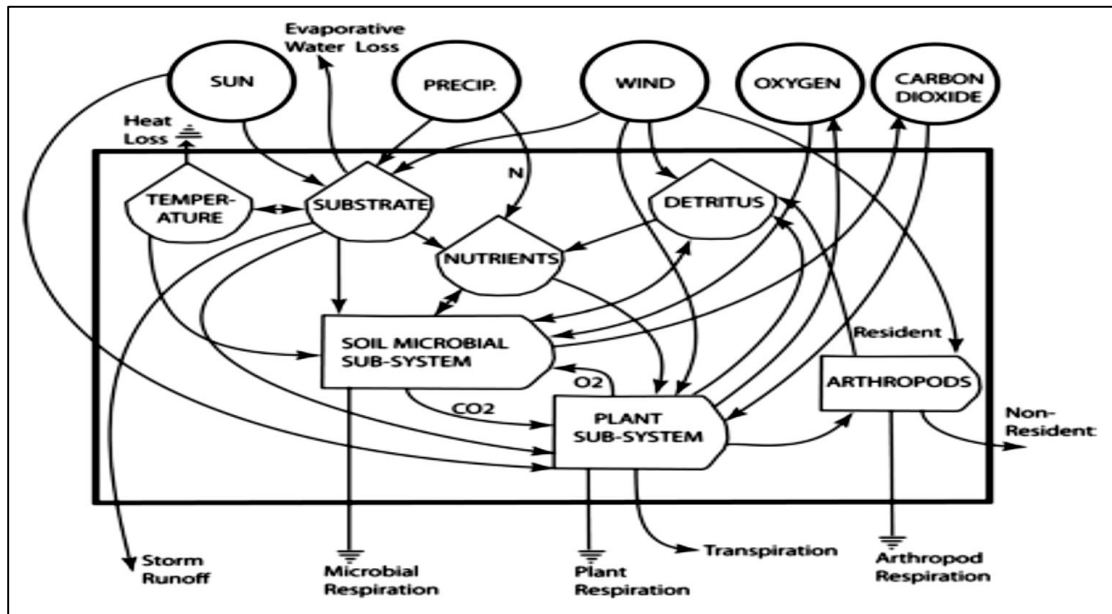


Ilustración 10 Se muestra el flujo de energía, agua, nutrientes y organismos de un ecosistema (Sutton, 2015).

Lopez et al. (2017), concluye en su artículo que con la plataforma de la red inalámbrica de sensores y actuadores (WSAN) es posible monitorear fácilmente un equipo o entorno con nodos de censado, los cuales ofrecen habilidades de análisis y control local, además agrega que cada red inalámbrica puede escalar desde uno, hasta decenas y cientos de nodos. La escalabilidad y modularidad de los nodos permiten personalizar el sistema hacia un amplio conjunto de campos donde los sistemas inalámbricos pueden complementar sistemas alámbricos, reduciendo costos de cableado y permitiendo nuevos tipos de servicios de medición

Existen diferentes arquitecturas para la red de sensores, que dependen directamente de la elección de sistemas, software, hardware, tipo de comunicación, de almacenamientos, etc. Para la elección de la arquitectura y diseño de la red de sensores se debe tomar en cuenta las características del sitio, implementar un sistema que sea capaz de conectarse con más dispositivos, que la implementación y tipo de variable a medir sea de gran relevancia, se deben adecuar a las condiciones del sitio y tener identificados los puntos vulnerables con necesidad de información, a fin de obtener el máximo provecho de los sistemas a implementar.

#### 4.3.8 Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT)

Se sabe que el uso de drones en la navegación y el geoprocésamiento permiten la mayor aplicación de drones UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicle) en agricultura. Son relativamente económicos y fáciles de usar. Presentan sensores y recursos de imagen cada vez más avanzados, lo que ayuda a aumentar productividad y ayudando a reducir el daño a los cultivos, ya que permiten monitoreo en tiempo real (Oliviera, 2016).



Con los drones en la producción agrícola, se logra localizar tempranamente plagas y enfermedades que pueden afectar la productividad de los cultivos, gracias a imágenes de alta resolución que son capturadas desde el aire, lo que permite detectar algún problema fitosanitario en los cultivos permitiendo al agricultor tener un control más eficiente y obtener productos de excelente calidad (Barreiro & Valero, 2014).

Pino V., (2019), indica que en el mercado internacional hay diversos tipos de drones para la agricultura. Los más utilizados en este campo son el multirrotor-cuadróptero (tiempo de vuelo de 30 minutos y cobertura por vuelo de 65 ha) y el de ala fija (tiempo de vuelo de 30 a 90 minutos y cobertura por vuelo de 120 a 3.800 ha).

Un sistema UAV montado con un sensor pasivo podría usarse varias veces durante el crecimiento temporada que proporciona una mayor resolución temporal, por lo tanto, más oportunidades para detectar a tiempo el estrés de N y traducirlo en un mapa de prescripción más específico (Thompson & Puntel, 2020).

El uso de sensores en drones ha tenido un gran avance, consiguiendo desarrollar nuevos sensores miniaturizados que pueden ser llevados con gran facilidad en los drones, la Tabla 5 muestra los principales sensores que se han utilizado en los drones y que permiten un análisis de vegetación.

Tabla 5 Sensores y sus bandas espectrales, (García-Cervigón & José, 2015).

SENSOR	BANDA ESPECTRAL
Visible –RGB (Cámara Fotográfica)	380-780 Nanómetros
Visible (Cámara de Video)	380-780 Nanómetros
Infrarrojo cercano 3 Bandas	500-950 Nanómetros
Multiespectral 18 Bandas	500-950 Nanómetros
Hiperespectral 400 Bandas	450-950 Nanómetros
Térmico	8-12 Micrómetros

Los drones se pueden usar en distintas áreas del sector agrícola, presentando 8 formas diferentes de utilización que se encontraron en la revisión bibliográfica:

1. Topografía, planificación y diseño;
2. Fertilización, aplicación de fertilizante;
3. Fumigación, aplicación de fumigante;
4. Supervisión y peritación de infraestructura dentro del sector;
5. Control de cultivos, evaluación del suelo y campo;
6. Monitoreo, análisis de suelo y campo;
7. Plantación de semillas.



### 4.3.9 Teledetección o Percepción Remota

La percepción remota (remote sensing) o teledetección está basada en la percepción de los objetos debido a la refracción de la luz en un rango específico de longitud de ancho. Así pueden percibirse de manera remota objetos en el espectro de luz visible al ojo humano o no mediante dispositivos especializados (Bustamante et al., 2016).

Sivakumar et al. (2004), expone que la teledetección es básicamente una ciencia multidisciplinaria que incluye una combinación de varias disciplinas como óptica, espectroscopia, fotografía, informática, electrónica y telecomunicaciones, lanzamiento de satélites, etc. Todas estas tecnologías están integradas para actuar como un sistema completo en sí mismo, conocido como sistema de detección remota. Hay una serie de procesos en la teledetección que son:

- Emisión de radiación electromagnética, o EMR (sol / auto emisión).
- Transmisión de energía desde la fuente a la superficie de la tierra, así como absorción y dispersión.
- Interacción de EMR con la superficie terrestre: reflexión y emisión.
- Transmisión de energía desde la superficie al sensor remoto.
- Salida de datos del sensor
- Transmisión, procesamiento y análisis de datos

EMR es una forma dinámica de energía que se propaga como movimiento de onda a una velocidad de  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/seg. En la Ilustración 11 se aprecian los parámetros que caracterizan un movimiento ondulatorio, los cuales son longitud de onda ( $\lambda$ ), frecuencia ( $\nu$ ) y velocidad ( $c$ ), la relación entre los anteriores es  $c = \nu \lambda$ .

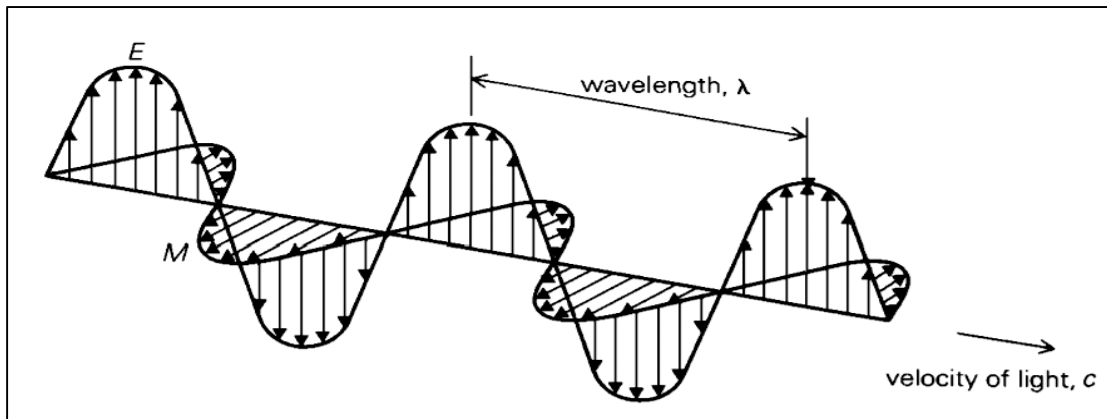


Ilustración 11 Onda electromagnética. Tiene dos componentes, campo eléctrico  $E$  y magnético. campo  $M$ , ambos perpendiculares a la dirección de propagación (Aggarwal, 2004).

La teledetección ha aumentado constantemente desde la década de 1990 debido a mejoras en resoluciones espaciales, espectrales y temporales de sensores remotos tanto aéreos como satelitales. Las imágenes satelitales permiten al agricultor tener una vista aérea de los cultivos que crecen en todo el campo o en toda la granja, además de numerosos suelos y cultivos terrestres, las imágenes de teledetección se han convertido en datos importantes fuentes para



documentar la variabilidad del crecimiento del suelo y los cultivos porque proporciona una vista continua de todos los campos en el área de imagen (Yang, 2018).

Los sensores de imágenes en el aire se pueden clasificar como multiespectral e hiperspectral basado en el número de espectrales bandas y anchos de banda, sensores de imágenes multiespectrales típicamente miden la energía reflejada o emitida en 3-12 diferentes bandas espectrales, en contraste con las imágenes hiperspectrales que los sensores miden la radiación en decenas a cientos de estrechas bandas espectrales a través del espectro electromagnético (Yang, 2018).

Los objetos y cobertura terrestre interactúan con la energía y reflejan o emiten está dependiendo sus características, Sivakumar et al. (2004), analiza como midiendo la energía que reflejan cada uno de los objetivos en la superficie de la tierra sobre una variedad de diferentes longitud de onda, podían construir una firma espectral para ese objeto, y al comparar el patrón de respuesta de diferentes características, es posible distinguir entre ellos, presentando las características de reflectancia de las siguientes coberturas terrestres y que ayudan a entender el cálculo de los índices multiespectrales que se elaboran en este trabajo:

**Vegetación:** las características espectrales de la vegetación varían con la longitud de onda. El pigmento vegetal en las hojas llamado clorofila absorbe fuertemente la radiación en las longitudes de onda rojas y azules, pero refleja la longitud de onda verde. La estructura interna de hojas sanas actúa como reflector difuso de longitudes de onda del infrarrojo cercano. Medir y monitorear la reflectancia del infrarrojo cercano es una forma de los científicos determinan qué tan saludable puede ser una vegetación particular.

**Agua:** la mayoría de la radiación que incide sobre el agua no se refleja, pero ya sea absorbido o transmitido. Longitudes de onda visibles más largas e infrarrojo cercano la radiación es absorbida más por el agua que por las longitudes de onda visibles. Así el agua se ve azul o verde azulado debido a una reflectancia más fuerte en estas longitudes de onda y más oscuro si se ve en longitudes de onda rojas o infrarrojas cercanas. los factores que afectan la variabilidad en la reflectancia de un cuerpo de agua son la profundidad de agua, materiales dentro del agua y rugosidad superficial del agua.

**Suelo:** la mayor parte de la radiación que incide en la superficie del suelo se refleja o se absorbe y se transmite poco. Las características del suelo que determinan sus propiedades reflectantes son su contenido de humedad, contenido de materia orgánica, textura, estructura y contenido de óxido de hierro. La curva del suelo muestra menos pico y variaciones del valle. La presencia de humedad en el suelo disminuye su reflectancia.

#### 4.3.10 Computación en la nube (Cloud Computing)

El término Cloud Computing (Computación en la Nube) fue definido por NIST (National Institute of Standard and Technology), (Mell, 2011) como un modelo para permitir, el acceso ubicuo a la red bajo demanda a un conjunto de recursos informáticos compartidos y configurables (por ejemplo, redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que pueden ser distribuidos y liberados rápidamente con mínimo esfuerzo de administración o



interacción del proveedor de servicios. Este modelo de nube se compone de cinco características esenciales, tres modelos de servicio, y cuatro de despliegue modelos (Campoverde et al., 2015).

La nube proporciona servicios como plataforma, infraestructura, software para la toma de decisiones. La gestión de datos, la calidad de los datos y la moneda de los datos son los principales temas en la toma de decisiones en la nube. Demirk y Denle en 2014 presentaron datos, información; el análisis se describe como un sistema de apoyo a la toma de decisiones orientado a los servicios.

Díaz M. et al. (2013), indica que es una herramienta virtual que brinda la oportunidad de un gran almacenamiento, sin necesidad de tener infraestructura amplia, ajustándose a los requerimientos de cada cliente. Ofrece alta disponibilidad de información en tiempo real, esta información es guardada en servidores que existen de forma física.

La nube comprende aplicaciones e infraestructuras ofrecidas como servicio a través de redes públicas o privadas, a menudo en modelo de pago por uso. Los productos y sistemas inteligentes (CPS y CPPS) generarán enormes cantidades de datos a almacenar y procesar que deben ser accesibles on-line desde cualquier lugar. La nube permite este flujo de datos sin fronteras y elimina la necesidad de inversión en infraestructuras para incrementar la capacidad, permitiendo una flexibilidad sin precedente (del Val, 2016).

## **4.4 Pilares de las tecnologías derivadas de la industria 4.0**

A continuación, se exponen lo que diferentes fuentes indican como los pilares tecnológicos de la industria 4.0 y que son los que han venido a revolucionar la manera de trabajo y permiten potenciar y complementar todas las tecnologías sacando el máximo provecho.

### **4.4.1 Big Data (BD)**

Lohr (2012), definió el término Big Data como “una nueva tendencia tecnológica que abre la puerta a una nueva manera de entender el mundo y tomar decisiones”.

Es una base de datos no convencional la cual tiene como función principal analizar datos que se han vuelto tan grandes que no se pueden procesar, almacenar y analizar mediante métodos convencionales (Sarmiento et al., 2014).

Se refiere a un conglomerado de información digital, que para la Agricultura 4.0, estos datos pueden ser información histórica sobre el rendimiento de los cultivos y el clima, información sobre el mercado, datos sobre los costos de insumos como semillas, pesticidas y fertilizantes. Para el caso de las semillas, Big Data puede referirse a la secuenciación digital de los genomas (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).



Deshmane (2015), agrega que, para manejar los volúmenes continuamente crecientes de datos, las tecnologías de procesamiento por lotes han evolucionado de las basadas en Java a las basadas en Hadoop de grandes datos.

De las mayores ventajas que se obtienen al implementar esta tecnología es la velocidad de almacenamiento y acceso a la información, Mathivanan & Jayagopal (2018), afirman que Big Data es un método óptimo para aumentar la productividad de la agricultura mediante la recolección y el procesamiento de información como: crecimiento de plantas, monitoreo de tierras de cultivo, monitoreo de gases de efecto invernadero, cambio climático, monitoreo de suelo y así sucesivamente, en la siguiente tabla se muestra un resumen de las etapas importantes en la aplicación de BIG DATA en la agricultura inteligente.

*Tabla 6 Resumen de la aplicación de grandes datos en la agricultura inteligente y cuestiones críticas (Mathivanan & Jayagopal, 2018).*

Diversas etapas de la cadena de datos	Descripción	Cuestiones clave
Captura de datos	Sensores, datos abiertos, datos capturados por VANTs, detección biométrica, información del genotipo y datos recíprocos.	Disponibilidad, calidad, formato.
Almacenamiento de datos	Una plataforma basada en la nube, un sistema de almacenamiento híbrido del Sistema de Archivo Distribuido Hadoop (HDFS) y un almacén de datos basado en la nube	Control rápido y seguro del coste de los datos.
Transferencia de datos	Plataforma inalámbrica, basada en la nube, datos abiertos vinculados	Seguridad, acuerdo sobre responsabilidad y obligaciones
Transformación de datos	Algoritmos de aprendizaje automático, normalizar y visualizar anonimizar.	Fuente de datos, datos automatizados limpieza y preparación.
Análisis de datos	Modelos de rendimiento, instrucciones de plantación, benchmarking, ontologías de decisión y cognitivas	Heterogeneidad semántica, análisis en tiempo real de limpieza y preparación de datos.
Marketing de datos	Visualización de datos	Propiedad, privacidad, modelos de negocio de innovación

Big data consiste principalmente del volumen, velocidad, variedad, valor, verificación, veracidad, viabilidad, visualización y validez de los datos que se generan, los cuales han aumentado en gran medida en los últimos años, sin embargo, el proceso de extracción de información sobre Big Data es bastante complejo, requiere herramientas con capacidades para recopilar, almacenar, buscar, procesar, analizar y visualizar grandes conjuntos de datos (Goya et al., 2014), a lo largo de los años se han desarrollado algunas herramientas que se han implementado para ayudar en las tareas de procesamiento y visualización de los datos, presentando a continuación, las herramientas más conocidas según (Sanchez, 2019):

**Apache Hadop**, es la herramienta de Big Data más utilizada, de hecho, compañías como Facebook o The New York Times la emplean, y ha servido de modelo para el resto. Hadoop



es un framework que permite procesar grandes volúmenes de datos en lote usando modelos de programación simples. Es escalable, por lo que puede pasar de operar en un sólo servidor a hacerlo en múltiples

**Elasticsearch**, permite el procesamiento de grandes cantidades de datos y ver la evolución de éstos en tiempo real. Además, proporciona gráficos que ayudan a comprender con más facilidad la información obtenida. Una de las ventajas de esta herramienta es que puede expandirse con Elastic Stack, un paquete de productos que aumentan las prestaciones de Elasticsearch. Mozilla y Etsy son algunas de las empresas que han empleado esta herramienta de Big Data.

**Apache Spark**, la característica más destacable de esta herramienta de Big Data es su velocidad, siendo 100 veces más rápida que Hadoop. Spark analiza datos por lotes y también en tiempo real, y permite la creación de aplicaciones en diferentes lenguajes: Java, Python, R y Scala.

**Python**, cuenta con la ventaja de que sólo hay que tener unos conocimientos mínimos de informática para poder usarla, lo que hace que tenga una gran comunidad de usuarios con la opción de crear sus propias librerías. El inconveniente de esta herramienta de Big Data es la velocidad, ya que es notablemente más lenta que sus competidoras.

**Apache Cassandra**, es una base de datos NoSQL desarrollada en un principio por Facebook. Es la mejor opción si lo que necesitas es escalabilidad y alta disponibilidad sin comprometer el rendimiento. Netflix y Reddit son usuarios de esta herramienta.

**Lenguaje R**, es un entorno y lenguaje de programación enfocado mayormente al análisis estadístico, ya que es muy parecido al lenguaje matemático; aunque también se emplea para el análisis de Big Data. Cuenta con una extensa comunidad de usuarios, por lo que hay disponible una gran cantidad de librerías. R es muy usada por estadistas y minería de datos.

**Apache Drill**, es un framework open-source que permite trabajar en análisis interactivos de grupos de datos a gran escala. Fue diseñado para poder alcanzar una alta escalabilidad en servidores y para poder procesar de petabytes de datos y millones de registros en pocos segundos. Soporta una gran variedad de sistemas de archivos y bases de datos.

**PgHydro**, amplía la base de datos geoespacial PostGIS / PostgreSQL para proporcionar funcionalidad de análisis de redes de drenaje para ayudar en la toma de decisiones sobre recursos hídricos.

**PostgreSQL**, es un sistema de gestión de bases de datos objeto-relacional, distribuido bajo licencia BSD y con su código fuente disponible libremente. utiliza un modelo cliente/servidor y usa multiprocesos en vez de multihilos para garantizar la estabilidad del sistema. Un fallo en uno de los procesos no afectará el resto y el sistema continuará funcionando.

La elección de herramientas a utilizar depende del proceso, número y tipo de datos, por ejemplo, Xie et al., (2015), presentaron los pasos para el procesamiento de datos, que incluye las tecnologías clave utilizadas, considerando los siguientes aspectos: la recolección, almacenamiento, análisis y visualización de grandes datos de la agricultura. La recolección de datos se utiliza para obtener recursos de varios lugares como la web, los sensores y la red. Para el almacenamiento y mantenimiento de grandes datos, NoSQL fue utilizado





eficientemente. MapReduce y Hadoop se utilizaron para el análisis de grandes datos y la minería. La presentación de la virtualización se determinó en base a atributos, variables y la información requerida.

#### 4.4.2 Internet of Things (IoT)

El Internet de las cosas es la conexión entre la red de los objetos físicos, entornos, vehículos y máquinas a través de dispositivos electrónicos que permite la recogida y el intercambio de información. Kopetz (2011), menciona que el internet de las cosas se basa en la siguiente visión: “Objetos inteligentes, que es la piedra angular de internet de las cosas, es sólo otro nombre para un sistema integrado que se conecta a Internet” es decir, los objetos inteligentes, son objetos físicos cotidianos que se han mejorado a través de pequeños dispositivos electrónicos que le proporcionan la capacidad de almacenar información y de transmitirla, comunicándose de este modo con otros dispositivos mediante el ciberespacio establecido por Internet.

Por lo general, el término Internet de las Cosas se refiere a escenarios en los que la conectividad de red y la capacidad de cómputo se extienden a objetos, sensores y artículos de uso diario que habitualmente no se consideran computadoras, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una mínima intervención humana (Rose et al., 2015).

Para poder implementar esta tecnología no existe un método estándar por lo que su aplicación es definida de manera frecuente por cuatro capas : capa de recolección y comunicación, capa de almacenamiento, capa de análisis y procesamiento y capa de consulta y toma de decisiones y el diseño de cada capa depende de las necesidades del entorno a trabajar, de los dispositivos a utilizar sensores, actuadores, selección de sistemas embebidos, software, tecnologías y protocolo de red, a continuación, se describen los conceptos básicos para poder diseñar un sistema IoT en el sector agrícola y dispositivos a utilizar.

##### **Sistemas embebidos**

Es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas, frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real, cuyo fin es cubrir necesidades específicas; la mayoría de sus componentes se encuentran incluidos en una misma placa base, generalmente se pueden programar directamente en lenguaje ensamblador o mediante un compilador utilizando lenguaje C o C++, su principal objetivo es reducir costos.

La elección de sistemas de embebido a utilizar se debe tener presente para poder sacar el mayor provecho respecto a las condiciones de software a utilizar por ejemplos: el uso de tarjetas de IoT Arduino YÚN la cual combina la potencia de Linux con la facilidad de uso de Arduino (Montoya et al., 2017), los más conocidos hoy en día son:

- Controlador lógico programable (PLC), es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida.



- Mbed, es una plataforma de desarrollo con librerías listas para su uso utilizando un compilador que está totalmente bajo un entorno WebBeagleBoard, sistema de desarrollo basado en un microcontrolador ARM Cortex-A8 con entradas y salidas de audio, video y conexión USB.
- Raspberry Pi (sistema embebido con sistema operativo basado en Linux), pequeña computadora desarrollada en el reino unido por la fundación Raspberry PI, responde a la implementación de servidores web y alojamiento de bases de datos para la generación de gran cantidad de información. Lo anterior, junto con la posible implementación gráfica y la posibilidad de realizar la programación en diferentes lenguajes de alto nivel, posicionan a esta tarjeta como una herramienta útil si se requieren aplicaciones más complejas con interfaces de usuario más agradables en términos de software.
- ARDUINO (microcontrolador) consiste en una placa para desarrollo basada en lenguaje C, de sus mayores características es que poseen una versatilidad que provee la placa para extender sus funciones mediante tarjetas de expansión (shields), que permiten interconectar otras placas, ya sea Arduino u otra tarjeta de desarrollo, actualmente existen muchas referencias de dicha placa cada una con características y capacidades diferentes.
- Sensores de nodo (Mote) en un **sensor** de red que es capaz de realizar algún procesamiento, reuniendo información sensible y comunicando con otros **nodos** conectados en la red.
- Controlador programable de interrupciones (PIC)
- NODE (microcontrolador)

En la Ilustración 12 se presentan a partir de una gráfica los resultados de la recopilación de 46 documentos relacionados con aplicación de IoT en el sector agrícola, de los sistemas embebidos de mayor uso, a partir de cuales tarjetas de desarrollo están implicadas en tareas como servidor central de datos, unidad de procesamiento y como dispositivo de comunicación entre el usuario, el cultivo y las herramientas de monitoreo y control.

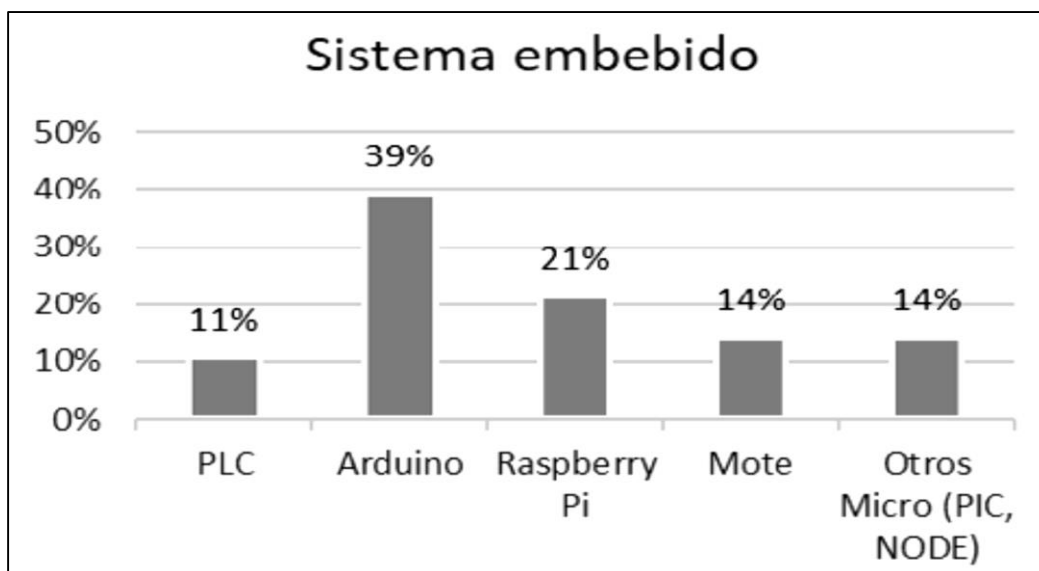


Ilustración 12 Sistemas embebidos de mayor uso en aplicaciones agrícolas(Tovar Soto et al., 2019)



### Tecnologías de red de comunicación.

Las tecnologías de comunicación para la decodificación de información, estas son las encargadas de llevar los datos a los servidores finales, intercomunicar diferentes dispositivos. Se puede utilizar una gama de diferentes tecnologías inalámbricas y alámbricas para proporcionar una conectividad completa de IoT. Estas tecnologías pueden segmentarse en función de las tecnologías inalámbricas o alámbricas, y las tecnologías inalámbricas pueden agruparse por tecnologías de red de área personal (WPAN), red de área local inalámbrica (WLAN), red de área amplia (WWAN) o redes de bajo consumo y área extensa (LPWAN), y cada tecnología tiene características distintas, entre ellas el alcance de su señal, la frecuencia de trabajo, la duración de la batería, entre otros atributos. En la Tabla 7 se presenta una recopilación de diferentes fuentes en donde se examinan estos atributos en detalle.

Tabla 7 Diferentes características de las tecnologías de conectividad inalámbrica IoT (Nota: no exhaustivo)

Nombre de Tecnología	Tipo de tecnología inalámbrica	Descripción	Rangos de alcance	Operación de vida de Batería	Frecuencia de trabajo	Transferencia de datos
LoRa	LPWAN	Tecnología inalámbrica, utiliza un tipo de modulación en radiofrecuencia, como la AM o la FM o el PSK	10 a 20 km	Hasta 10 años con una batería	868 MHz en Europa, 915 MHz en América, y 433 MHz en Asia	200 Kbps
SigFox	LPWAN	Utilizan señales de gran alcance que pasan libremente a través de objetos sólidos y que requieren poca energía	30 a 50 km (rural), 3 a 10 km (urbano)	Hasta 20 años con una batería	915 MHz América, 868Mhz Europa	10-1000 bps
ZigBee	WPAN	Tecnología inalámbrica más centrada en aplicaciones domóticas e industriales	100 m	Hasta 2 años con una batería	2.4GHz	250 Kbps
Bluetooth 4.0	WPAN	Es una de las tecnologías de transmisión de datos de corto alcance más establecidas, muy importante en el ámbito de la electrónica de consumo	50 m	Algunas horas	2.4GHz	24 Mbps
NFC	WPAN	(Comunicación de campo cercano) es una tecnología que permite dos vías simultáneas de interacción segura entre dispositivos electrónicos	10 cm	n/a	13.56 MHz	424 Kbps



Nombre de Tecnología	Tipo de tecnología inalámbrica	Descripción	Rangos de alcance	Operación de vida de Batería	Frecuencia de trabajo	Transferencia de datos
Wi-Fi Basado en 802.11n	WLAN	Existe en la actualidad una extensa infraestructura ya instalada que transfiere datos con rapidez y permite manejar grandes cantidades de datos	300 m	4 a 8 horas	2.4GHz y 5GHz	150-200 Mbps, en función del canal de frecuencia y del número de antenas
2G	WWAN	Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM), fue la primera generación digital y la primera red global de comunicaciones celulares	35 km	4 a 8 horas	Banda global GSM	9.6 Kbps - 384 Kbps
3G	WWAN	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS), la tercera generación de telefonía móvil	100 km	2 a 4 horas	Varias licencias	384 Kbps - 10Mbps
4G	WWAN	La red de telefonía celular también puede ser una opción para soluciones IoT. Sus grandes ventajas son la gran cobertura con múltiples proveedores, y muy buen ancho de banda	100 km	2 a 3 horas	Varias licencias	3 Mbps - 100 Mbps
5G	WWAN	Permitirá una mejor comunicación y procesamiento de imágenes, mejoras significativas en latencia y ancho de banda respecto a 4G	100 km	3 a 3 horas	Varias licencias	Hasta 10000 Mbps

### Modelos de comunicación

IoT utiliza cuatro modelos de comunicación comunes y el tipo de tecnología inalámbrica a implementar dependerá de estos modelos:

- Dispositivo a dispositivo, representa dos o más dispositivos que se conectan y se comunican directamente entre sí y no a través de un servidor de aplicaciones intermediario.
- Dispositivo a nube, el dispositivo de la IoT se conecta directamente a un servicio en la nube, como por ejemplo un proveedor de servicios de aplicaciones para intercambiar datos y controlar el tráfico de mensajes.
- Dispositivo a puerta de enlace (gateway), significa que hay un software de aplicación corriendo en un dispositivo de puerta de enlace local, que actúa como intermediario



entre el dispositivo y el servicio en la nube y provee seguridad y otras funcionalidades tales como traducción de protocolos o datos.

- Compartir datos de back-end, se refiere a una arquitectura de comunicación que permite que los usuarios exporten y analicen datos de objetos inteligentes de un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes.

## Protocolos

Por otro lado, cada una de las tecnologías analizadas en la documentación tiene una forma de operar. La manera correcta de realizar una transferencia de información es a través de protocolos, quienes permiten establecer las comunicaciones entre los dispositivos utilizados en las tecnologías ya mencionadas, entre los más utilizados tenemos.

A continuación, se presentan los protocolos más conocidos y su descripción según (Garrity, 2015),(Rose et al., 2015) y (Tovar Soto et al., 2019):

**El protocolo IP**, se ha convertido en el estándar dominante para la creación de redes y ofrece una plataforma bien definida y ampliamente implementada en software y herramientas que se pueden incorporar en una variedad de dispositivos de forma fácil y económica.

**Los protocolos de radio**, como el de Banda Ultra Estrecha pueden proporcionar una cobertura de mayor alcance (útil para la ciudad inteligente aplicaciones como la vigilancia por vídeo).

**El Bluetooth**, este protocolo opera mediante un enlace de radiofrecuencia y ha sido utilizado en la agricultura de precisión bajo la plataforma IoT, es una tecnología de alta velocidad, corto alcance y alta velocidad de datos, pero con una baja duración de las baterías.

**Protocolo IEEE 802.15.4**, para comunicaciones punto a punto y punto a multipunto. También cuenta con una baja latencia de transmisión, bajo consumo energético y largo alcance. Además, se pueden configurar para implementar una red Mesh para futuros desarrollos (Montesinos, 2013).

Es importante analizar qué tipo de sistema de embebido, tecnologías y protocolos se van a ocupar en la adopción de IoT al sector hidroagrícola, pues hay muchos factores a tomar en cuenta (incluyendo hardware, software, sensores a conectar, algoritmia, arquitectura). Lopez et al. (2017), menciona en su trabajo de modelado de sensores y actuadores inalámbricos aplicados a la agricultura de precisión muestran un ejemplo de la elección de sistemas a elegir, financiado por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en el que se desarrolló un sistema IoT que se basó en la utilización de tarjetas de Arduino para el servidor central y los nodos de transferencia de datos. Se hizo uso de una red WSN por su modularidad y versatilidad. La información recopilada se realizó mediante un servicio en la nube y las estadísticas se implementaron mediante el lenguaje del programa R. El módulo seleccionado para la transmisión en red fue el modelo Xbee y el software para visualización se realizó mediante programación orientada a servicios a través de una aplicación web. Entre sus características se destaca que cada nodo puede conectar hasta un número máximo de 24 sensores para recibir información, además de recibir señal de GPS para ubicación específica del terreno. Finalmente, se concluyó que el sistema propuesto facilita la realización estadística y la recopilación de información que proviene del cultivo.



Otro ejemplo, es el presentado por Garrity, (2015), en el que menciona que la estación meteorológica Syngenta's Kilimo Salama ("Safe Farming ") monitorea eventos agrícolas y facilita enlaces con firmas de seguros. El objetivo es mitigar los riesgos asociados con el clima adverso, proporcionando así una red de seguridad muy necesaria para los agricultores mientras se promueve inversión agrícola y mejores medios de vida. Este mecanismo ha automatizado y simplificado eficazmente el proceso de reclamaciones, cultivando un entorno de apoyo financiero para los agricultores individuales y fomentando la producción agrícola a todos los niveles.

Un ejemplo de arquitectura de referencia estándar para mejorar la gestión en BIG DATA y que comprende al IoT es conocida como la arquitectura Lambda, la cual consta de cuatro componentes a saber: Captura de Datos, capa de Velocidad o Procesamiento, la Capa de Almacenamiento o Seguridad y la Capa de Consulta. La capa de Captura de Datos, encargada del ingreso de la información, procesamiento de streaming o capa de velocidad, satisface todas las solicitudes que están sujetas a requisitos de baja latencia usando algoritmos rápidos e incrementales, considerando únicamente datos recientes. La capa de almacenamiento o lotes soporta la gestión de todo el conjunto de datos obtenidos, haciendo un histórico con estos. Finalmente, la capa de consulta donde se representa la información ya sea la obtenida en tiempo real o la parte almacenada (Deshmane, 2015).

#### 4.4.3 Inteligencia Artificial (IA)

Russell & Norvig (2011), presentan definiciones de inteligencia artificial extraídas de ocho libros y mencionan que a lo largo de la historia se han seguido cuatro enfoques, los cuales se explican a continuación:

**1. Sistemas que piensan como humanos.** “El nuevo y excitante esfuerzo de hacer que los computadores piensen... máquinas con mentes, en el más amplio sentido literal” (Haugeland, 1985), “[La automatización de] actividades que vinculamos con procesos de pensamiento humano, actividades como la toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje” (Bellman, 1978).

**2. Sistemas que piensan racionalmente.** “El estudio de las facultades mentales mediante el uso de modelos computacionales” (Charniak y McDermott, 1985), “El estudio de los cálculos que hacen posible percibir, razonar y actuar” (Winston, 1992).

**3. Sistemas que actúan como humanos.** “El arte de desarrollar máquinas con capacidad para realizar funciones que cuando son realizadas por personas requieren de inteligencia (Kurzweil, 1990), “El estudio de cómo lograr que los computadores realicen tareas que, por el momento, los humanos hacen mejor” (Rich y Knight, 1991).

**4. Sistemas que actúan racionalmente.** “La Inteligencia Computacional es el estudio del diseño de agentes inteligentes” (Poole et al., 1998), “IA... está relacionada con conductas inteligentes en artefactos” (Nilsson, 1998).

La inteligencia artificial puede utilizar algoritmos de aprendizaje de la máquina, en inglés Machine Learning (ML) desarrollados hasta la fecha, que también pueden mejorar con



aprendizaje adicional cuando hay más datos disponibles. Con este sistema, más decisiones gerenciales eficientes pueden hacerse en riego, fertirrigación (sistema de válvula automatizado dentro del diseño de riego), manejo del dosel (comunicación a poda robótica-máquinas), pesticida diferencial, aplicaciones de fungicidas, diferencial en la cosecha (basada en calidad), evaluaciones de contaminación por humo. Uno de los principales problemas en la viticultura moderna no es relacionado con maximizar el rendimiento o la baya calidad, pero tratando con lo temporal y variabilidad espacial de estos factores dentro de un viñedo Gestión a minimizar estas diferencias requiere un sistema más inteligente que se puede lograr con avances tecnológicos recientes, nosotros solo necesitamos ser lo suficientemente inteligentes como para reconocer el potencial de estos tecnológicos avances y aplicarlos en consecuencia dentro de la industria (Fuentes & Tongson, 2018).

### **Técnicas de Toma de Decisiones**

Berbel (1989), menciona que, en la construcción de un sistema experto en algún tema relacionado con la economía agraria, o cualquier otra disciplina, tiene como efecto indirecto positivo el obligar a los centros decisores a explicar su forma de razonar. De esta manera se obtiene una gran cantidad de conocimiento sobre los procesos reales de toma de decisiones, de ahí la importancia de conocer cómo funcionan los diferentes sistemas en la toma de decisiones.

De acuerdo con Mathivanan & Jayagopal (2018), se describen algunas de las técnicas de toma de decisiones utilizadas en diferentes sistemas de Big Bata e Inteligencia Artificial:

#### **Técnicas matemáticas**

Apoya en etapas como la curación de datos y el análisis de datos. El concepto central de la toma de decisiones depende de la relación, correlación y muestras en el enfoque estadístico. La innovación se implementa para mantener grandes datos usando estadísticas paralelas, computación estadística y aprendizaje. Método de optimización utilizado para resolver problemas a un mayor costo de memoria, reducción de datos de consumo de tiempo y paralelismo respectivamente. La optimización en tiempo real puede definir el problema de la toma de decisiones para la red inalámbrica de gran escala y el sistema de transporte inteligente.

#### **Técnica de análisis de datos**

Consiste principalmente en la minería de datos, el aprendizaje automático y las redes neuronales. La mayoría de ellas pueden procesar grandes datos. La minería de datos se clasifica, agrupa y regresa. Oculta el conocimiento y los patrones de los datos dados. Muchas clasificaciones y algoritmos de agrupación tienen muestras de datos sustanciales como un sistema de base difusa, y un colosal algoritmo de aplicación de agrupación. El razonamiento difuso proporciona incertidumbre tanto en los datos como en los resultados.

#### **Aprendizaje automático**

Es otra técnica de inteligencia artificial que permite métodos tanto supervisados como no supervisados. Un algoritmo de aprendizaje automático como las máquinas de vector soporte



(SVM) mejora el rendimiento de un sistema paralelo a gran escala como el mapa/reducción. Será utilizado por muchas aplicaciones como datos biológicos y de sensores.

ML por sus siglas en inglés Machine Learning, en ciencias de la computación, una máquina «inteligente» ideal es un agente flexible que percibe su entorno y lleva a cabo acciones que maximicen sus posibilidades de éxito en algún objetivo o tarea, ventajosamente la lógica difusa permite predecir con adecuada precisión los números del futuro, atenuando los problemas de la perplejidad, lo cual es válido para interpretar datos en la producción agropecuaria (Smarandache & Leyva-Vázquez, 2018).

### **Red neuronal artificial**

Se aplica principalmente en el reconocimiento de patrones y el control adaptativo. Los principales desafíos radican en las capas de la red neuronal, los nodos, el rendimiento y el consumo de memoria y tiempo en la red neuronal. Técnicas de muestreo utilizadas para reducir el tamaño de los datos. Las redes neuronales se aplican en paralelo y en un entorno distribuido.

### **Visualización**

Hoy en día la representación de los datos es demasiado complicada. Se centra especialmente en los datos significativos y trata de identificar la descripción adecuada de los datos. La extracción de características proporciona una reducción en el tamaño de los datos. Thompson y otros muestran la presentación de los datos en una aproximación compacta pero informativa para datos masivos.

### **Virtualización**

La virtualización se ha utilizado ampliamente en la investigación durante mucho tiempo, el término entidades "virtuales" que afectan a una forma de vida real. En la agricultura, tiene muchos más objetos físicos, sensores y dispositivos. Este objeto físico está virtualizado y tiene representación digital para almacenar, comunicar y procesar a través de Internet. La información del objeto virtual tiene un gran volumen de datos que ayuda al análisis de datos significativos o a aspectos para hacer servicios de aplicación como la toma de decisiones, la notificación de problemas y el manejo de la información. La gran virtualización de datos ayuda al agricultor a tomar mejores decisiones mediante herramientas o métodos de apoyo a la toma de decisiones para conseguir los recursos necesarios.

Algunos softwares que se han desarrollado en el ámbito de inteligencia artificial son:

- Weka es un software libre desarrollado por la Universidad de Waikato (Nueva Zelanda), el cual cuenta con una extensa colección de algoritmos de aprendizaje de máquina implementados en Java, los cuales pueden ser aplicados sobre datos ya sea mediante la interfaz gráfica o para embeberlos dentro de cualquier aplicación. Además, Weka contiene las herramientas necesarias para realizar transformaciones sobre los datos, tareas de clasificación, regresión, clustering, asociación y visualización. Weka está diseñado como una herramienta orientada a la extensibilidad por lo que añadir nuevas funcionalidades es una tarea sencilla (Kulkarni & Kulkarni, 2016).





- DINAMICA EGO, es un software gratuito desarrollado en Brasil, el cual cuenta con amplias ventajas en la identificación de impulsores de cambio, cálculos de tasas de transición, así como en la simulación de escenarios a futuro para monitorear las trayectorias de los cambios por medio de cadenas de Márkov y autómatas celulares.

## 4.5 Nuevas técnicas de Producción

Ribeiro et al. (2018), mencionan que las nuevas técnicas de producción de alimentos demuestran una alta capacidad de adaptación sector agrícola, generando soluciones para los más diversos sesgos que han surgido (uso excesivo de suelos y calentamiento global), también creando la posibilidad de reducir los residuos, que ocurren en proporciones exorbitantes. A continuación, se describen las nuevas tendencias en la producción de alimentos que han surgido a partir de la industria 4.0 (PRIMORDIALES, 2018), (Clercq et al., 2018):

### 4.5.1 Agricultura Vertical o Granjas Verticales

La práctica de crecer cosechas en estructuras verticales a través del uso de la hidroponía permite el desarrollo de ciertas plantas en instalaciones bajo techo, sin necesidad de químicos. Estas instalaciones pueden ser monitoreadas en su totalidad por robots.

Por ejemplo, AeroFarms con granjas en desarrollo en varios estados de los EE. UU. Y en cuatro continentes es el líder comercial en agricultura vertical de interior totalmente controlada, con una productividad 390 veces mayor por pie cuadrado al año en comparación con la agricultura de campo tradicional mientras usa un 95% menos de agua y cero pesticidas. Utilizaron las últimas tecnologías de detección y ciencia de datos, así como herramientas de visión e inteligencia artificial.

### 4.5.2 Hidroponía

Sistema de producción en el que las raíces de las plantas son irrigadas con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en agua y en el que en vez de suelo se utiliza como sustrato un material inerte y estéril, o incluso la misma solución (Salazar et al., 2014).

Técnica utilizada para cultivar plantas en el agua, sin necesidad de tierra. Se han desarrollado sistemas que utilizan la energía solar para promover la desalinización del agua de mar y, por lo tanto, la utilizan en el proceso de la hidroponía. Esto hace posible producir alimentos en un clima desértico, por ejemplo.

El agua enriquecida con nutrientes puede ser utilizada para crecer plantas en ambientes sin tierra y esto ha llevado a nuevas formas de cultivar ciertas especies de plantas bajo techo.

Por ejemplo, Sundrop, una empresa con sede en Australia ha desarrollado tecnologías que integran la energía solar, la generación de electricidad, la producción de agua dulce y la hidroponía. Utilizan la energía del sol para producir agua dulce para riego, y lo convierten en electricidad para alimentar el invernadero para calentar y enfriar los cultivos.



### **4.5.3 Invernaderos**

Salazar et al., (2014), indican que, el invernadero es un sistema de producción que puede incrementar la eficiencia en el uso del agua, creando un microclima para mejorar la fotosíntesis de la planta, reduciendo la evapotranspiración excesiva e incrementando los rendimientos

Además, concluyen que otro tipo de sistemas modernos son los invernaderos cerrados y semicerrados, los cuales han dado buenos resultados en Europa y Estados Unidos de América, en términos de ahorro de agua y energía; en este tipo de sistemas se puede recuperar el agua transpirada por las plantas a través de la condensación y utilizarla como agua de riego. Combinando los sistemas descritos antes, el uso del agua prácticamente se reduciría a la mitad o menos de la transpiración de las plantas, y por lo tanto es una alternativa prometedora e innovadora para países donde existe escasez de agua.

### **4.5.4 Biogranjas**

El enfoque biológico se basa en medir la vida microbiana en la tierra y aplicar nutrientes, microorganismos y composta que la tierra necesite para recuperar un balance. Esto se logra utilizando solo sustancias naturales y orgánicas y previniendo el monocultivo en tierra fértil.

Agricultura en el desierto y los océanos: gran parte de la superficie terrestre está compuesta de océanos y desiertos. Varios estudios han tratado de adaptar la agricultura a estas zonas. Estudios relacionados con modificaciones genéticas, reguladores del crecimiento y hormonas que permiten mejorar la resistencia de semillas y plantas, para que para desarrollarse completamente en condiciones adversas.

### **4.5.5 Subirrigación**

Lugo & Villanueva (2010a), describen que la subirrigación consiste en la aplicación del agua a los cultivos a través de tubos enterrados en el subsuelo, de manera que la humedad llega a la raíz por ascenso capilar.

Consiste en el riego de plantas por medio del ascenso capilar, suministrando el agua desde el subsuelo. Para ello es necesario colocar tuberías subterráneas desde donde se suministra el agua.

El sistema de riego por Subirrigación permite evitar pérdidas de agua por percolación profunda; es decir, se trata de un sistema cerrado en el estrato inferior del suelo. Para evitar estas pérdidas de agua hacia los estratos inferiores del suelo, se colocó una frontera impermeable a 1 metro de profundidad mediante la instalación de una geo membrana impermeable en fondo y paredes. Esta barrera impermeable evita la pérdida de agua por percolación profunda y mantiene la humedad del suelo en el sistema radicular.



#### **4.5.6 Agricultura de labranza mínima**

Este término genérico incluye técnicas agrícolas de protección del suelo, evitar erosión y otras formas de degradación. Los principios en que se basa son: rotación de cultivos, coberturas vegetales, siembra directa sin remoción del suelo y reintegrar los residuos al suelo. Hace un uso eficiente y efectivo de los recursos naturales a través del manejo integrado del suelo, el agua y los recursos biológicos, a los que se suman insumos externos (FAO, 2015).

#### **4.5.7 Agricultura Hi-Tech**

En las últimas décadas se han experimentado cambios radicales en el empleo de innovaciones tecnológicas en la producción agropecuaria. La agricultura de alta tecnología (Hi-Tech) implicará cultivar a control remoto usando computadoras, robots, cámaras de video, drones y otros. Esta tecnología será cada vez más importante, particularmente en un contexto de modernización del campo, que inducirá a cultivar plantas y criar animales de manera automatizada y a distancia, usando teléfono móvil o Tablet. Además, la detección de enfermedades se hará a través de kits de PCR para obtener rápidos y eficientes diagnósticos en tiempo real (Pérez Vázquez et al., 2018).

### **4.6 Nuevas herramientas**

De la industria 4.0 han surgido nuevas herramientas, que aumentan la eficiencia en la cadena alimentaria y que son importantes mencionar puesto que se complementan con muchas otras tecnologías que llevan la producción de alimentos a otro nivel, las cuales se describen a continuación:

#### **4.6.1 Blockchain**

Cadenas de bloques en castellano, generalmente se describen como libros digitales de contabilidad capaces de rastrear un contrato o una actividad con el uso de computadoras a través de internet de tal manera que las partes involucradas se aseguren que el contrato o procedimiento se ha llevado a cabo (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

Sanghera (2018), menciona que lo que hace que Blockchain sea tan único es que los datos almacenados en sus redes son transparentes e incorruptibles. Los datos están incrustados en la red en su conjunto, por definición son públicos y los datos una vez almacenados no se pueden corromper alterando cualquier información en la cadena de bloques. En teoría, con Blockchain en control de campesinos con teléfonos celulares, se podría eliminar a los intermediarios, a la vez que ahorraría tiempo y mejoraría los mercados. Si funciona, algunos esperan que una cadena de bloques pueda rastrear el flujo de los subsidios agrícolas de la India (con un valor de 4 mil 900 millones de dólares en 2017- 2018).

De igual forma se puede llegar a tener un mayor control sobre la gestión del agua permitiendo una representación virtual del derecho a la misma y su negociación, totalmente de acuerdo con las reglas que administran ese derecho, de una manera más rápida, transparente y eficiente, Valero Flores (2019) indica que con Blockchain podemos certificar de forma



transparente y segura la fuente del agua y la idoneidad del uso, si es válida según especificaciones de planificación y, en su caso, su legitimidad en términos de volumen autorizado.

Las criptomonedas están estrechamente asociadas con las blockchains y a menudo se describen como capital digital que se puede extraer, ganar e intercambiar por productos o servicios de manera similar a una moneda nacional, controladas por algoritmos y blockchains.

#### **4.6.2 Benchmarking**

El benchmarking de esquemas de riego es una forma comparativa (externa) de valuación del desempeño que ha sido frecuentemente utilizada. De manera general, el benchmarking busca comparar el desempeño de los esquemas con las “mejores prácticas” contra esquemas de menor desempeño, e identificar cuáles son las diferencias en desempeño (Burton, 2010).

Una manera de llevar a cabo el benchmarking es a través de estudiar la eficiencia técnica con la que los diferentes organismos comparados realizan sus actividades.

#### **4.6.3 (Building Information Modeling) BIM**

El modelado de información de construcción es una metodología que permite crear simulaciones digitales de diseño, manejando coordinadamente toda la información que conlleva un proyecto.

#### **4.6.4 Chatbots (Asistentes Virtuales)**

Actualmente, chatbots con inteligencia artificial, se utilizan en venta minorista, viajes, medios de comunicación y sectores de seguros. Pero la agricultura también podría aprovechar esta tecnología al ayudar agricultores con respuestas y recomendaciones sobre problemas específicos (Clercq et al., 2018).

#### **4.6.5 Fintech**

Tecnologías financieras, describe la aplicación de tecnologías digitales a las finanzas y la administración. Fintech puede utilizar algoritmos, establecer y administrar blockchains y Big Data para aumentar la gestión efectiva de dinero o recursos (Pat Mooney & Grupo ETC, 2018).

#### **4.6.6 Ciberseguridad**

Es fundamental para que todas las demás tecnologías logren una adecuada penetración en esta fase de digitalización. La evolución hacia una industria inteligente y la integración creciente de los actores de las cadenas de valor a través de internet, la computación en la



nube y las plataformas digitales obliga a desarrollar mecanismos de la ciberseguridad en los entornos industriales. En la medida en que sean más los dispositivos, máquinas y personas conectadas, se valorará la oferta de herramientas preventivas que permitan detectar, anticipar y neutralizar amenazas sobre los sistemas de información de las empresas (Basco et al., 2018).

La agricultura, agroindustria y en si todo el sector agrícola del futuro requiere que todo el sistema esté conectado, por eso que la ciberseguridad es un elemento clave para proteger los sistemas, controles operadores y los datos, de las amenazas potenciales y fallos que pueden causar problemas en la operabilidad del sistema, en la producción y seguridad de la población.

Para medir al avance y el trabajo en cuestiones relacionadas con la ciberseguridad en distintos países alrededor del mundo, es posible consultar el Índice Global de Seguridad Cibernética, (Global Cybersecurity Index GCI-2017, (Rozo-García, 2020).



## Capítulo 5 Caso de estudio: Distritos de Riego

Tras la revisión realizada en el capítulo 4 de las tecnologías derivadas de la 4ta revolución industrial, aquellas que las complementan y que se pueden aplicar al sector hidroagrícola, partiendo desde tecnologías de la información y comunicación hasta los 3 pilares fundamentales de la industria 4.0, se presenta en este capítulo un caso de estudio, el cual permitirá describir desde la importancia de los datos y la digitalización, la aplicación tecnológica de la industria 4.0 al sector agrícola, desarrollando el caso de estudio al Distrito de Riego de México, DR016 “Estado de Morelos”, llevando a cabo un análisis al sector agrícola, diagnóstico que permite identificar y digitalizar las problemáticas, condiciones actuales del distrito, sus carencias, y antecedentes de aplicaciones tecnológicas, niveles de digitalización y actualizaciones realizadas al mismo.

### 5.1 Etapa 1: Recopilación de información

#### 5.1.1 Aspectos generales de los Distritos de Riego

CONAGUA (2018), indica que un Distrito de Riego (DR) es un área geográfica donde se proporciona el servicio de riego mediante obras de infraestructura hidroagrícola.

Los DR son los sistemas de explotación y aprovechamiento de agua con fines agrícolas más importantes de México. Éstos han sido establecidos a lo largo de más de 80 años mediante diversos decretos o acuerdos presidenciales, y están conformados por una o varias superficies previamente delimitadas y dentro de cuyo perímetro se ubica la zona de riego; además, cuentan con las obras de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y del subsuelo, así como con sus vasos de almacenamiento, su zona federal, de protección y demás bienes y obras conexas, pudiendo establecerse también con una o varias unidades de riego (CONAGUA, 2009).

En México, la superficie sembrada bajo riego se realiza en 6,5 millones de hectáreas dominada por infraestructura hidroagrícola, de las cuales un poco más de la mitad corresponden a 86 distritos de riego, 3.3 millones de hectáreas (Ilustración 13), que son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal desde 1926, año de creación de la Comisión Nacional de Irrigación, e incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos, entre otros (CONAGUA, 2018).



Ilustración 13 Distribución de los 86 Distritos de Riego de México

### 5.1.2 Características principales de los Distritos de Riego

#### Módulos de Riego

Los distritos de riego fueron conceptualizados como proyectos institucionales de irrigación desarrollados y operados por el gobierno federal, a partir de la creación de la Comisión Nacional de Irrigación en 1926. En la década de los noventa se inició la transferencia de la administración, operación y conservación de infraestructura de riego, maquinaria y equipo, a las asociaciones organizadas como Asociación Civil de Usuarios (ACU), la asociación civil es una persona moral cuya autoridad máxima recae en la asamblea general, y para su funcionamiento cuenta con un consejo directivo y un consejo de vigilancia y se rigen por sus estatutos sociales, cuyos directivos son seleccionados por la asamblea de usuarios del riego. Para el proceso de transferencia los distritos de riego se dividieron en áreas de riego a las que se denominó «Módulos», existiendo actualmente 478 en el país, su delimitación se hizo atendiendo a las características de la infraestructura, de tal forma que se facilite la entrega, distribución y medición del agua, así como los trabajos de conservación de la infraestructura (Olvera et al., 2014).

A diciembre de 2016, se había transferido a los usuarios más del 99% de la superficie total de los DR. Hasta dicha fecha, solamente dos distritos no habían sido totalmente transferidos a los usuarios: 003 Tula y 018 Colonias Yaquis, en los estados de Hidalgo y Sonora, respectivamente (CONAGUA, 2018).



La función de los Módulos de Riego es la de dar el servicio de riego de la mejor manera posible optimizando el recurso agua para maximizar la producción y el valor de la producción agrícola, por lo que llevar una contabilidad confiable de los gastos y volúmenes del agua de riego debe ser prioridad en los Módulos y Distritos de Riego (González et al., 2018).

### **Padrón de usuarios**

El Padrón de Usuarios de un Distrito de Riego es el documento en el cual deberán estar registradas todas las personas físicas o morales que hacen uso de los servicios de riego, drenaje, domésticos, industriales o de cualquier otro tipo que se proporciona con sus obras de infraestructura; consecuentemente, deberá contener nombres de los usuarios, superficies físicas y de riego o de drenaje de los lotes o parcelas beneficiadas y los datos complementarios para su identificación y localización dentro del área del Distrito, (CONAGUA, 1991).

Para el manejo del Padrón de Usuarios la Comisión Nacional del Agua, ha creado dos sistemas: el sistema de cómputo llamado SIPAD3 “Sistema Padrón de Usuarios, versión 3” y el Sistema de Información Geográfica (SIG).

### **Infraestructura**

Los distritos de riego cuentan con infraestructura hidráulica que abarca desde las fuentes de abastecimiento hasta la entrega del agua en las parcelas, siendo así de los sectores con mayor variedad de obras hidráulicas teniendo presas de almacenamiento, presas derivadoras, redes de conducción, redes de distribución, estructuras de control, estructuras de medición, red de caminos, red de drenaje, pozos y bombeos todas ellas con el propósito de almacenar, transferir y utilizar el recurso hídrico. Toda esta infraestructura se agrupa respecto a la función de responsabilidad de operación, mantenimiento y conservación, a cargo de la Comisión Nacional del Agua se encuentran las obras de cabeza, las cuales comprende en algunos casos la red principal de conducción (red mayor de canales), presas de almacenamiento y derivadoras. La red de canales, caminos y drenes, a cargo de las asociaciones civiles; y las regaderas sistemas de tecnificación en las parcelas, a cargo de los propios usuarios, las partes principales que conforma el sistema de conducción de un Distrito de Riego se puede ilustrar a través de una zona de riego (Ilustración 14).

Las fuentes de abastecimiento de agua de los distritos de riego pueden estar constituidas por una o más de las siguientes obras: presas de almacenamiento, presas derivadoras, pozos profundos y plantas de bombeo, principalmente.



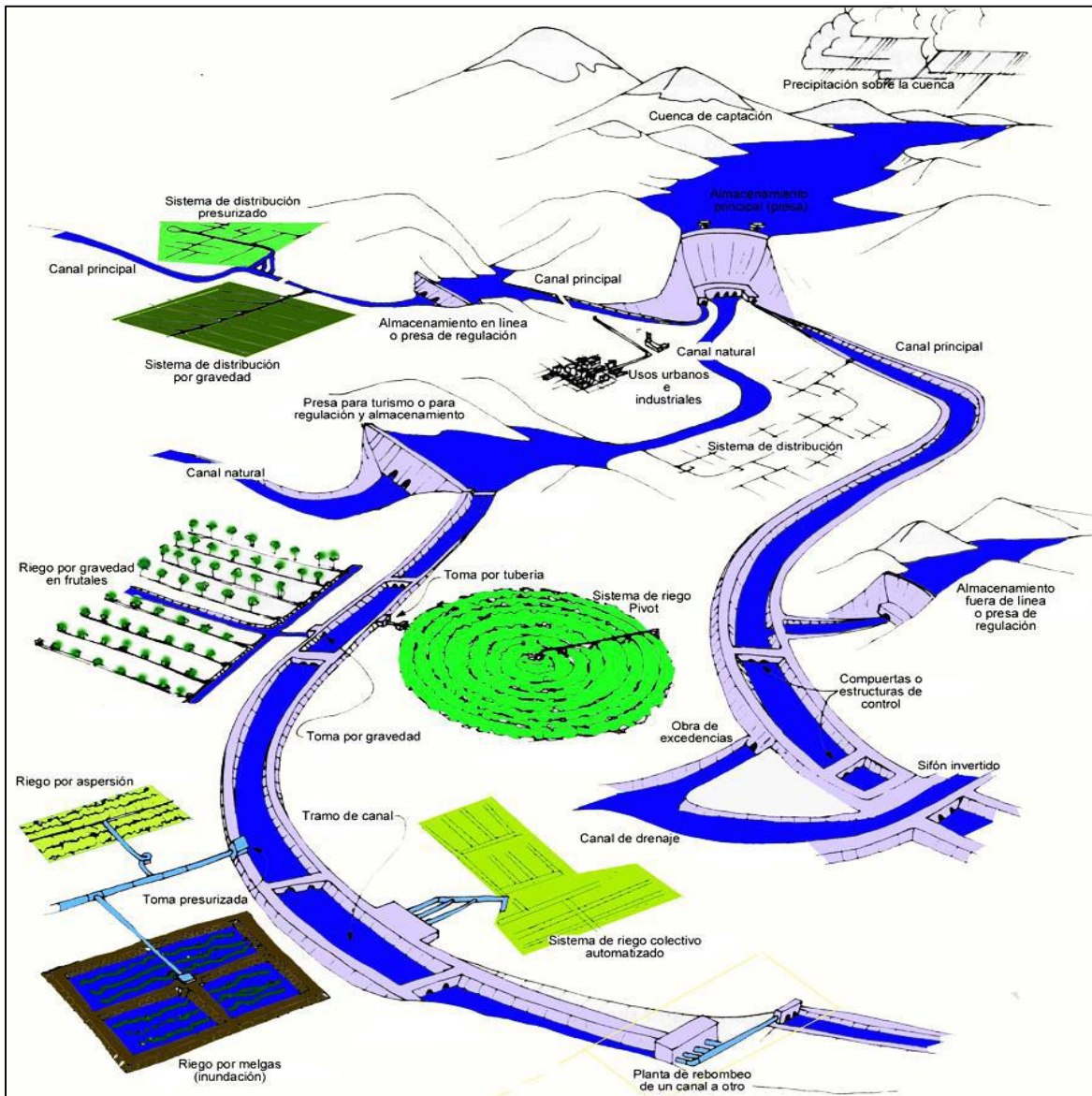


Ilustración 14 Sistema de conducción en una zona de riego, (García, 2015)

### 5.1.3 Principales actividades dentro del Distrito de Riego

#### Plan de riegos

El plan de riegos es el documento rector de la planeación de un distrito de riego. Este documento se elabora al inicio de cada año agrícola y en él se programan los cultivos a establecer, las superficies a sembrar y regar, y los volúmenes de agua a utilizar entre otros, para lo cual se realiza un balance entre los volúmenes de agua que se esperan disponer en las fuentes de abastecimiento y los que se consideran necesarios durante el año agrícola para el riego de los cultivos a establecer y en su caso para los otros usos que se tengan comprometidos en el distrito (CONAGUA, 2003).



Los sistemas de riego operan mediante un conjunto de estructuras (represas y tomas), que regulan los gastos y niveles de agua en diferentes puntos de la red, para mantenerlos constantes o casi constantes, para conducir y distribuir, los volúmenes requeridos a cada usuario, sin pérdidas por sobreconsumo o derrames. En México, todos los sistemas de canales de los distritos de riego son de control aguas arriba.

### **Monitoreo de cultivos, suelos y clima**

Los factores que determinan los requerimientos totales de agua de un cultivo son la evapotranspiración, tipo de suelo, permeabilidad del suelo y periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale & Choudhary, 2011). Por lo anterior es que el monitoreo es un aspecto importante de la agricultura, determinar la lámina de agua que requiere un cultivo para una correcta planeación de riego requiere de mediciones en campo precisas. Conocer el estado de los cultivos, el suelo y el clima es crucial para los agricultores, ya que sus decisiones de regar cultivos, rociar pesticidas, aplicar fertilizantes, etc. Son basados en sus estados. El monitoreo físico de una gran tierra agrícola no produce buenos resultados, ya que es casi imposible realizar un monitoreo las 24 horas, así como también verificar múltiples variantes a la vez.

### **Aplicación de pesticidas y fertilizantes**

De las actividades esenciales hoy en día en los distritos de riego es la aplicación de pesticidas y fertilizantes, para lo cual (Grasso & Díaz-Zorita, 2018), indican que la base para un manejo efectivo de nutrientes, y lo que permite a los productores lograr eficiencia y efectividad en la nutrición de las plantas y asegurar sus beneficios económicos, sociales y ambientales son las buenas prácticas de manejo de fertilizantes o nutrientes (BPM), que se divide en las siguientes áreas:

- Elección de fuente (fuente correcta).
- Dosis de aplicación (dosis correcta).
- Momento de aplicación (momento correcto).
- Lugar de aplicación del nutriente (lugar correcto).

La aplicación de pesticidas es un tratamiento de organismos (por ejemplo, cultivos) de posibles daños por otras plantas, hongos, insectos o animales. El tiempo, la cantidad y la ubicación de la aplicación son muy críticos en caso de pulverización de pesticidas. Las cuales se deben desarrollar correctamente para beneficiar a los cultivos y obtener el máximo provecho.

En los últimos años la agricultura ha utilizado mayor cantidad de agroquímicos, que han derivado en la contaminación de suelos y acuíferos (CONAGUA, 2018).

El uso de tecnologías se está convirtiendo en un gran apoyo para lidiar con el tiempo, el control de cantidad y encontrar la ubicación adecuada en la demanda de pesticidas y fertilizantes.

### **Irrigación**

Se define como la aplicación de agua. Es útil en aquellas áreas donde las lluvias no son suficientes para satisfacer el cultivo. Requerimientos de agua. La escasez de agua se está



convirtiendo en el problema mundial. Esto instiga la necesidad del uso adecuado del agua y que debe proporcionarse solo a aquellos lugares donde se necesita y en cantidad requerida. Además de eso, también se desea minimizar el desperdicio de agua. Para hacer frente con estos requisitos, se utilizan muchos métodos diferentes de riego, como el riego por goteo, riego por aspersión, etc. El propósito de los diferentes métodos de riego es el agua controlada distribución en los lugares requeridos para que el agua se pueda ahorrar sin comprometer los requerimientos de agua de cultivo. Para averiguar la cantidad de agua requerida en una ubicación específica en un determinado (Aqeel-ur- & Zubair A., 2012).

Gurovich (2015), señala que la técnica más adecuada para la determinación de las necesidades hídricas de un cultivo es la resultante de la combinación de las propiedades del suelo y el agua, en relación con las condiciones de clima y necesidades hídricas del cultivo de acuerdo con su etapa de crecimiento.

Palerm Viqueira et al., (2010), agregan, que dentro de las actividades que se encuentran en los distritos de riego son las siguientes:

#### **Conservación.**

Acciones para preservar el funcionamiento de la obra civil en la infraestructura hidroagrícola activa. Abarca secciones transversales en los canales, drenes y caminos, cortinas de las presas, diques, muros de contención, sifones, puentes, estructuras, muros y losas en represas y en tomas granja, edificios, casetas, etcétera.

#### **Mantenimiento.**

Acciones para preservar el funcionamiento de la obra electromecánica inherente a la infraestructura hidroagrícola activa. Incluye mecanismos, sistemas electromecánicos, electrónicos, eléctricos e hidroneumáticos, alumbrado, maquinaria, vehículos y equipo en general.

#### **Rehabilitación.**

Acciones para restituir a la infraestructura hidroagrícola las condiciones del diseño original o del modificado en el transcurso de su construcción. Modernización. Acciones para actualizar las condiciones del diseño original o del modificado en el transcurso de su construcción con objeto de incorporar técnicas que conduzcan a un mejor funcionamiento de la infraestructura hidroagrícola.

#### **Modernización.**

Acciones para actualizar las condiciones del diseño original o del modificado en el transcurso de su construcción con objeto de incorporar técnicas que conduzcan a un mejor funcionamiento de la infraestructura hidroagrícola.

#### **Tecnificación**

La tendencia mundial en los sistemas de riego presurizado o tecnificado consiste en aplicar conocimientos de ingeniería con el fin de controlar los procesos de irrigación. Esto se obtiene mediante los conceptos de la teoría de control y como puede ser empleado para diseñar controladores de riego automático (Salcedo, 2014).



Rendón-Sustaita et al. (2018), indican que la agricultura se ha tecnificado buscando obtener altas productividades e índices de utilidad, fenómeno que se ha incrementado desde el surgimiento de la revolución verde el siglo anterior. Uno de los aspectos más involucrados en la producción agrícola es la utilización del agua mediante sistemas de riego: en el caso mexicano “el rendimiento en toneladas por hectárea de la superficie bajo riego es de 2.2 a 3.3 veces mayor que la superficie en régimen de temporal” (Conagua, 2016).

Se tiene como meta la tecnificación de 1 722 000 hectáreas con infraestructura hidroagrícola y alcanzar una superficie de 3 139 000 hectáreas. En 2009, se puso en marcha el Proyecto Estratégico de Tecnificación del Riego, para apoyar los proyectos de adquisición e instalación de sistemas de riego que permitieran el uso eficiente y productivo del agua. En 2011 se atendieron tres mil 227 proyectos con una inversión de 1 500 millones de pesos, lo que se reflejó en la tecnificación de 114 827 hectáreas. El rendimiento de cultivos en superficie de riego se incrementó de 2,2 a 3,6 veces, en comparación con los que no cuentan con infraestructura hidroagrícola (Olvera et al., 2014).

#### **5.1.4 Problemáticas en los Distritos de Riego**

##### **Operación del agua**

La operación del agua es una de las actividades a la que más se le debe prestar atención dentro de los distritos de riego ya que administra el recurso agua, y sobre la que se encuentra una gran problemática ya que la toma de decisiones respecto al manejo del agua no se ha adecuado en muchos de los casos a las condiciones actuales, E. Sifuentes et al. (2016), menciona que la operación de zonas de riego, como los distritos, se ha fundamentado en particular en reglas empíricas que se han obtenido con base en la experiencia acumulada por el personal que los opera. Su aplicación no ha permitido optimizar el uso de los recursos agua, tierra, capital y personal disponibles en los distritos del país. Las razones principales que afectan su estimación son:

- En muchos casos, el servicio de riego se programa de modo prioritario en función de la facilidad en el manejo hidráulico de la red de distribución y no en las necesidades de agua de los cultivos.
- Cuando se toman en consideración los cultivos, la planeación se efectúa estimando las necesidades hídricas con base en estimaciones generales del uso consuntivo de los cultivos (requerimientos hídricos), y no se toman en cuenta factores fundamentales como el suelo y su variabilidad espacial, y las condiciones meteorológicas.
- En muchos casos, cuando la programación se hace por la demanda de los usuarios, ésta obedece más bien a factores de tipo tradicional o simplemente a la apreciación empírica y subjetiva de necesidad de regar.

Ante esta problemática (García, 2015), menciona que para mejorar la operación de un canal, la tendencia internacional indica que las acciones y actuaciones deben enfocarse hacia la automatización hidráulica de la red de canales. Esto no quiere decir que deba contemplarse



como única meta la automatización total de toda la red, sino que debe definirse y establecerse un programa de automatización gradual y selectivo respecto de las diversas estructuras de control que se requieren instalar o modernizar para alcanzar paulatinamente, pero de manera sostenida, una mejor eficiencia y una mayor flexibilidad en la operación de los canales.

### **Cambio climático**

El cambio climático es un hecho y está cambiando rápidamente el medio ambiente. El grado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por el hombre alcanzaron el mayor grado de historia, según un informe de 2014 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático Cambio climático (IPCC).

La agricultura es uno de los principales productores de GEI. Durante los últimos 50 años, Emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra casi se duplicó. El cambio climático contribuirá a problemas a largo plazo factores ambientales, como el agotamiento de las aguas subterráneas y la degradación del suelo, que suministro, calidad, acceso y uso de alimentos. Los recursos hídricos están siendo muy afectados, con más del 40% de la población rural del mundo viviendo en áreas con escasez de agua (Clercq et al., 2018).

Los cambios en los patrones de precipitación en las diferentes regiones del país, causados por el cambio climático debería tener un impacto directo en la agricultura, en la generación y distribución de energía y recursos hídricos en las regiones, ya que el agua debe volverse más rara en las regiones del norte y noreste y más abundantes en el sur y sureste, advierten los investigadores (Alisson, 2013).

Para México, la mayoría de los modelos proyecta un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio, aunque se espera un incremento de esta variable en otras regiones del mundo, (Seager et al. 2007).

El sector hidroagrícola es un ecosistema complejo y en constante evolución, respondiendo a los cambios que han surgido a través del tiempo, por lo que estimar la vulnerabilidad ante el cambio climático es una tarea complicada debido a la incertidumbre que existe actualmente ante las proyecciones realizadas en los sistemas que se venían manejando, impulsando a los investigadores a tomar otras rutas, apoyándose de las nuevas tecnologías que permitan obtener un sector resiliente y con mejores estrategias de adaptación y mitigación para responder con oportunidad al impacto del cambio climático.

En el entorno actual en que es previsible la disminución de la disponibilidad del agua por el cambio climático, es imperativo elevar las eficiencias de conducción. Cabe aclarar que la productividad del agua puede tener una gran variación en función de las condiciones meteorológicas, así como de las características fenológicas de cada cultivo, (CONAGUA, 2018).

Lima et al., (2011), indican que, desde el marco general de estas proyecciones, al ser México un país con amplia diversidad natural, cultural y socio institucional, es evidente la necesidad de identificar problemas y oportunidades regionales para el fortalecimiento de capacidades sociales de aprendizaje científicas, tecnológicas y de innovación como parte de las estrategias de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático, las cuales se conviertan en



una oportunidad de largo plazo para combinar procesos de mejoramiento económico, tecnológico, social y ecológico hacia la sustentabilidad.

### **Grandes variaciones en las precipitaciones**

Efecto del cambio climático en el escurrimiento, la precipitación es la principal variable en el balance hidrológico. Cualquier cambio en la precipitación tiene implicaciones en su ciclo y en la disponibilidad de los recursos hídricos (Esguiarte F., et al., 2019).

Las altas tasas de evapotranspiración y la reducción de las precipitaciones y la humedad del suelo pueden restringir las actividades agrícolas, especialmente los cultivos de regadío, resultando en cultivos de bajo o nulo rendimiento y calidad. Asimismo, la recarga del acuífero y la calidad del agua del mismo pueden verse afectadas negativamente, ya que las tasas de infiltración serían nulas (Ospina Noreña et al., 2017).

De igual forma Lugo & Villanueva (2010), afirman que las lluvias presentan grandes variaciones, severas sequías originan que los acuíferos vayan disminuyendo sin recuperación y lluvias torrenciales originan problemas de inundaciones y pérdidas importantes de superficies de cultivo.

### **Zonas áridas y sequia**

Dos terceras partes del territorio mexicano se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500 mm, mientras que una tercera parte, el sureste, es húmedo, con precipitaciones anuales que superan los 2 000 mm por año, (CONAGUA, 2018).

La sequía es un fenómeno que se presenta periódicamente en las cuencas de la mayor parte de los ríos del país, con efectos negativos para la agricultura; sin embargo, este efecto suele ser de mayor significancia en la agricultura de riego, debido a que en muchos casos no se hace un adecuado manejo de los embalses de las presas, (Saénz et al., 2002).

### **Supervisión insuficiente**

Los esfuerzos por tecnificar los sistemas parcelarios de riego resultan en muchas ocasiones inefectivos. Los programas de tecnificación requieren proyectos ejecutivos bien diseñados, y en 40 o 50% de los casos son adjudicados a empresas sin experiencia suficiente. Como consecuencia de ello, los sistemas de riego parcelario son ineficientes, no entran en funcionamiento o dejan de estarlo seis meses después. Los responsables locales no son capaces de corregir las fallas y, en ocasiones, ni siquiera de conservar y operar las obras. Como la Comisión Nacional del Agua carece de los recursos humanos y financieros suficientes para supervisar y promover el uso de sistemas de riego más eficientes, la tecnificación avanza muy lentamente. En ocasiones, los sistemas de riego funcionan por periodos breves y, en consecuencia, muchos de ellos corren el riesgo de ser insostenibles (Palerm Viqueira et al., 2010).

### **Bajas eficiencias de agua en el sector agrícola**

La superficie dedicada a la agricultura es de alrededor de 21 millones de hectáreas; de ellas, 3.5 millones de hectáreas corresponden a Distritos de Riego, 3.0 millones de hectáreas a



Unidades de Riego y 14.5 millones de hectáreas a temporal. Sin embargo, la eficiencia con que operan es muy baja, pues en los Distritos de Riego es de 37% y en las unidades de riego de 57% (Arreguín et al., 2010).

Los DR fueron diseñados por el gobierno federal con una tecnología de aplicación del riego por gravedad en las parcelas, construyendo en muchos de ellos canales y drenes principales mientras que las obras parcelarias quedaron a cargo de los usuarios, lo que aunado a varias décadas de deterioro en la infraestructura, por falta de conservación y mejoramiento, propiciaron una eficiencia global baja en el manejo del agua (Olvera et al., 2014).

Gran parte del problema se debe a las pérdidas generadas por la conducción y distribución, las cuales de acuerdo a su origen son: a) por infiltración; b) por evaporación; c) por fugas en las estructuras en mal estado; y d) por manejo del agua en la red de distribución (Palacios, 1996).

Para fines prácticos, se asume que la eficiencia de conducción en la red de canales es del 64.7%, la de conducción intraparcilaria es del 75% y la de aplicación de agua en las parcelas es del 70%, por tanto, la eficiencia global estimada en forma general corresponde a 34% (Peña, 2007).

En general, la eficiencia en la conducción del agua en las redes de distribución de los distritos de riego ha sido relativamente baja. Esto se debe a que la mayor parte de los canales no están revestidos y las estructuras de control no son adecuadas para mantener niveles constantes durante la distribución del agua, así como una deficiente conservación en las obras de infraestructura, lo que favorece las pérdidas operativas en la red (Saénz et al., 2002).

### **Disminución en la medición de datos**

La medición de agua en los Distritos de riego es deficiente y en algunas partes prácticamente nula, la falta de calibración y mantenimiento de equipos aforadores e instrumentos de medición en la red de canales y tuberías provoca la imprecisión en la entrega de agua a los usuarios.

González et al. (2018), mencionan que la medición del agua de riego en los módulos de riego es esencial en la administración del recurso. Esta medición durante la administración de los Distritos de Riego por la SARH y luego CONAGUA era más confiable que la actual porque existía personal especializado en la medición (hidrometría) y un procedimiento de registro y manejo más de los datos, actualmente en los Módulos de Riego la medición ha disminuido a su mínima expresión, por lo anterior es que concluyen que se requiere de la instrumentación de la medición en los Módulos de Riego para mejorar la precisión y confiabilidad de la medición del agua de riego. Esto puede hacerse con diversos niveles tecnológicos y de presupuesto. Los puntos de control son los que primero requieren atención y es donde conviene invertir en instrumentación precisa y de medición continua con telemetría. En las Tomas Granja también se requiere de instrumentación.

La instrumentación de la medición debe ser un paso previo a la instauración de la dotación volumétrica o cobro volumétrico que es el paso más efectivo para mejorar las eficiencias de aplicación del agua en la parcela por parte del usuario y de las eficiencias de conducción por parte de los módulos de riego.



## **Reducción de recursos**

Lomelí (2020), indica que se estima que, en la última década, se ha tenido una disminución del 60% en la inversión pública en la infraestructura hidroagrícola de los Distritos de Riego, la falta de esta inversión ha provocado una deficiente conservación y casi nula rehabilitación y modernización en las presas que sirven de fuente de abastecimiento de los distritos de riego, muchas de la cuales tienen más de 50 años iniciaron su operación y teóricamente ya cumplieron su vida útil.

La disminución de los recursos a generado deficiencias en el mantenimiento de todo el sistema de riego, aumentando la vulnerabilidad y ocasionando una mala operación del agua, produciendo pérdidas y deficiencias en el servicio.

Ante estas problemáticas, en las últimas décadas, la aplicación de recursos en los diferentes programas que apoyan a los distritos de riego, no han sido suficientes para que funcionen eficientemente y que permitan reducir las pérdidas de agua desde la red de conducción y distribución hasta la parcela, aumentando la disponibilidad de la misma y logrando un mejor aprovechamiento de la dotación con mayor eficiencia, mejorando la calidad y oportunidad del servicio de riego e incrementar la producción y productividad del agua.

Palerm Viqueira et al., (2010), indican que, es conveniente hacer notar que muchos distritos de riego no son de “grande irrigación” propiamente dicha, sino más bien agregados administrativos de pequeños regadíos, y que muchos otros distritos se desarrollaron a partir de un núcleo de viejos regadíos o de plano son viejos regadíos con mejoras incipientes, como es el caso del DR016 Estado de Morelos, por lo cual es el caso de estudio de este trabajo.

## **5.2 Etapa 2: Diagnostico general**

### **5.2.1 Distrito de Riego 016 “Estado de Morelos”**

El Distrito de Riego 016 se localiza en el estado de Morelos (Ilustración 15), en la Región Hidrológica Administrativa IV Balsas una de las principales corrientes dentro de la República mexicana. El Distrito de Riego cuenta con 5 módulos de riego y una superficie total de 28,471 ha y da servicio a 15,407 usuarios que se encuentran registrados en el padrón, las fuentes principales de abastecimiento de agua las constituyen las derivaciones de los ríos Chalma, Tetlama, Apatlaco, Yautepec, Dulce, Cuautla, Ayala y Amacuzac; así como las aguas del río Tembembe que se almacenan en la presa El Rodeo.



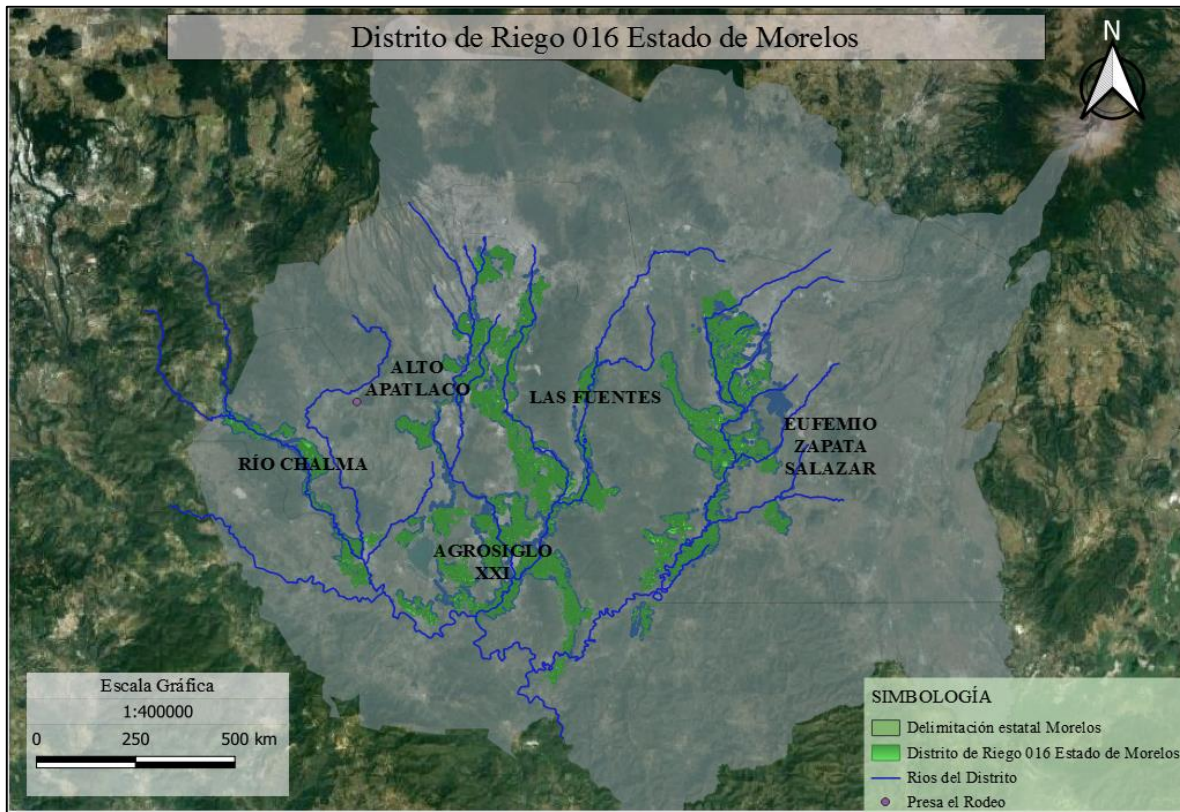


Ilustración 15 Distrito de Riego 016 Estado de Morelos

El uso agrícola en Morelos tiene concesionadas prácticamente tres cuartas partes del total del volumen de agua disponible en la entidad, constituyéndose, así como el mayor usuario de las aguas en el estado. El hecho de incrementar la eficiencia del riego mediante acciones de rehabilitación, equipamiento y modernización de la infraestructura hidroagrícola representa un reto trascendente para incidir significativamente en la gestión y uso racional del líquido. La superficie de riego en Morelos abarca aproximadamente 56 mil 811 hectáreas, la mitad corresponde al Distrito de Riego 16 denominado “Estado de Morelos” que agrupa 5 módulos de riego y la otra mitad a 274 Unidades de Riego dispersas por toda la entidad. El uso desproporcional e ineficiente del agua en el sector agrícola en relación con los otros usos se debe en buena medida a que por mucho tiempo, se dejó de rehabilitar, modernizar y ampliar la infraestructura hidroagrícola en las líneas de conducción, red de distribución y aplicación interparcelaria del líquido en los cultivos, por lo que aún se tienen algunos bombeos ineficientes y de altos costos de operación, canales rústicos sin revestimiento, pérdidas por infiltración considerables, fracturas en los canales que están revestido y en general, un deficiente uso del agua, ya que la eficiencia global de riego en Morelos es de alrededor de 36%, (Programa Hídrico del Estado de Morelos 2019 – 2024).

El distrito de Riego 016 Estado de Morelos se distribuye en los siguientes municipios Coatlán del Río, Puente de Ixtla, Zacatepec, Jojutla, Cuernavaca, Cautla, Jantetelco, Ciudad Ayala, Tetecala, Xochitepec, Jiutepec, Tlaltizapán, Yecapixtla, Jonacatepec, Amacuzac, Temixco, Emiliano Zapata, Tlaquiltenango, Zacualpan, Tepalcingo, Tlayacapan. Los recursos hidráulicos superficiales son aprovechados mediante 44 presas derivadoras.



### 5.2.2 Nivel de digitalización del Distrito de Riego 016 “Estado de Morelos”

Los distritos de riego se han dado a la tarea de adoptar modelos de información Geográfica para poder cuantificar el área regada a nivel parcela, sin embargo, las metas en muchos de ellos no se alcanzaron por falta de presupuesto y no dar el seguimiento necesario por lo que la información con la que se cuenta ya está atrasada o incompleta, CONAGUA proporcionó los archivos magnéticos del DR 016 del estado de Morelos (Ilustración 16), que cuenta con una base de datos que tiene las siguientes capas en el SIG:

- Parcelas, superficie y el padrón de usuarios, con las características y datos que marcan las leyes y reglamentos, entre los datos más importantes se encuentra el municipio, número de cuenta, módulo, superficie física y superficie de riego y cultivo.
- Red de canales: canales laterales, sublaterales, ramales, subramales, de los atributos más importantes de datos son: material de construcción del canal, rugosidad, tramo, gasto, plantilla, talud, tirante, bordo libre, pendiente.
- Ríos dentro del Distrito de Riego.
- Estructuras hidráulicas tomas granja, puentes vehiculares, de aforo, tomas frontales, sifones, desfogues, etc. De los datos más importantes que contiene esta capa son el estado físico y cadenamamiento en que se encuentra dentro del canal
- Pozos dentro del Distrito de Riego
- Poblados y carreteras.
- Presas de almacenamiento y derivadoras, entre los datos más relevantes se encuentran: niveles al NAMO y al NAME, altura de cortina, tipo de material de construcción.

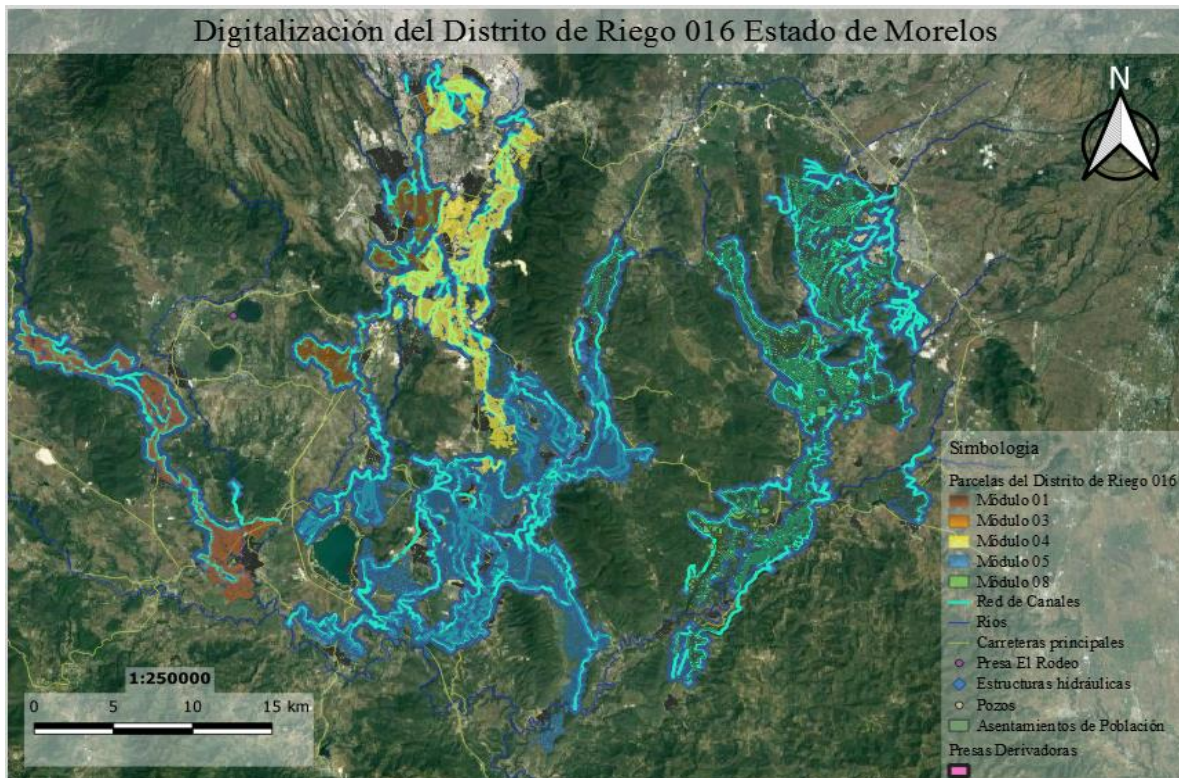


Ilustración 16 Datos Digitales del Distrito de Riego 016 Estado de Morelos



### 5.2.3 Condiciones actuales del Distrito de Riego 016 “Estado de Morelos”, Módulo 8 General Eufemio Zapata Salazar, A.C.

El área específica del presente estudio es el módulo de riego número 8 General Eufemio Zapata Salazar, A.C. El cual comprende 30 ejidos y 12 propiedades rurales, con una superficie de física de 10, 354.90 hectáreas, 10,293.66 hectáreas de riego y da servicio a 5,223 usuarios, es el 2do módulos más importantes dentro del Distrito de Riego 016, con un volumen anual concesionado de 247.53 millones de metros cúbicos, los volúmenes concesionados a las 5 Asociaciones Civiles de usuarios del Distrito de Riego 016 “Estado De Morelos” se observa en la Tabla 8.

Tabla 8 Títulos de agua nacionales otorgados a los módulos del Distrito de Riego 016, Recuperado <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

Titular	Título	Uso	Autoridad que emite el acto	Fecha de registro	Volumen de extracción de aguas nacionales (m3)
USUARIOS DE RIEGO DEL RÍO CHALMA, REVOLUCIÓN DEL SUR, A.C.	04MOR401601/18ATGC00	AGRICOLA	GERENCIA DE SERVICIOS A USUARIOS	04/05/2000	49,940,000.00
ASOCIACIÓN DE USUARIOS DEL ALTO APATLACO, A.C.	04MOR401603/18ATGC00	AGRICOLA	GERENCIA DE SERVICIOS A USUARIOS	04/05/2000	38,590,000.00
UNIÓN DE USUARIOS CUENCA DE LAS FUENTES, A.C.	04MOR401604/18ATGC00	AGRICOLA	GERENCIA DE SERVICIOS A USUARIOS	04/05/2000	66,790,000.00
ORGANIZACIÓN DE USUARIOS AGROSIGLO XXI, A.C.	04MOR401605/18ATGC00	AGRICOLA	GERENCIA DE SERVICIOS A USUARIOS	04/05/2000	294,440,000.00
<b>GENERAL EUFEMIO ZAPATA SALAZAR, A.C.</b>	<b>04MOR401608/18ATGC00</b>	<b>AGRICOLA</b>	<b>GERENCIA DE SERVICIOS A USUARIOS</b>	<b>04/05/2000</b>	<b>247,530,000.00</b>

Las principales fuentes de abastecimiento de agua en el módulo de riego General Eufemio Zapata Salazar, A.C. son:

**Ríos**

- Río Cuautla: con 7 presas derivadoras: Barcenas, El Zapote, El Socavón, San Esteban, Las Tortugas, Las Iguanas Y El Mirador



- Río Ayala: con 4 presas derivadoras: El Embocadero, Campo Nuevo, El Molino Y Los Tomases
- Río Yautepec: con 1 presa derivadora: 8ª Toma Del Río Yautepec

### **Barrancas**

- Barranca La Viuda; con 1 presa derivadora: Ticumán Libre
- Barranca La Cuera: con 1 presa derivadora: Adolfo Ruiz Cortinez
- Barranca La Soledad: con 1 presa de almacenamiento: el gigante (captación de aguas de retorno “achololes”)

### **Manantiales**

- La Mora, Agua Dulce, Santa Rosa, San Cristóbal, La Huancha, Casasano (Las Tazas), Santa Inés, El Almeal (Xochitengo), Axocoche.

El módulo de riego General Eufemio Zapata Salazar, A.C cuenta con una longitud total de canales de 303.7 km, de los cuales 177.2 km corresponden a la red primaria de canales, y 126.5 km a la red secundaria de canales. El distrito de riego también cuenta con 14 presas derivadoras, 1 presa de almacenamiento y 1 planta de bombeo.

A pesar de grandes inversiones y actividades que se desarrollan en el distrito de riego aún hay mucho trabajo por hacer, como el mejorar las infraestructuras existentes que en muchos casos sería habilitarlas, y apoyarse de nuevas tecnologías para establecer con precisión la cantidad de agua que requiere el cultivo, mejorar los métodos de riego, instalar equipos de medición y totalización de caudales para controlar adecuadamente las cantidades de agua aplicadas a los cultivos, verificar que los cultivos sean los adecuados conforme a su entorno físico y cantidad de agua disponible, etc.

### **Problemáticas generales**

- El 47% de los canales se encuentran en tierra, lo cual conlleva a mayores pérdidas por infiltración, mayores problemas de azolvamientos, baja oportunidad de riego por los tirantes y velocidades.
- Infraestructura hidroagrícola en malas condiciones, el 60% de los canales revestidos se encuentran en condiciones de regular a mala lo que refleja importantes pérdidas de agua.
- Contaminación por descargas de aguas residuales en los canales, además de basura que los propios vecinos vierten en los canales.
- Problemas de vegetación en las márgenes del río, canales y manantiales, además de azolves que pueden obstruir el flujo del agua.
- Poca tecnificación parcelaria.
- Problemas sociales de extracción de agua de los canales sin pagarla.
- Sembradíos de verdolagas, berro, sobre los canales entre otras plantas.
- Las acciones de modernización se han emprendido de forma aislada, atendiendo necesidades muy particulares.



Un diagnóstico elaborado por la Comisión Estatal del Agua (CEAGUA), a la infraestructura hidroagrícola en 2019, menciona que la eficiencia global a raíz de toda la problemática planteada anteriormente se encuentra en un 32% como se observa en la Tabla 9, dato calculado a partir de la eficiencia de conducción por la eficiencia de distribución por la eficiencia de aplicación, de igual forma indica que la eficiencia de riego puede aumentar a un 71% con el revestimiento de canales principales, secundarios y la tecnificación parcelaria.

Tabla 9 Diagnóstico de eficiencias de riego (CEAGUA. 2019)

Situación	Eficiencia de conducción	Eficiencia de distribución	Eficiencia de aplicación	Eficiencia Global
Actual	75%	70%	60%	32%

La disponibilidad de información es un problema en el módulo de riego General Eufemio Zapata Salazar, A.C, teniendo grandes deficiencias de datos al no contar con lo siguiente:

- No hay sensores que midan las diferentes variables dentro de las parcelas.
- Poca información del volumen de agua de los acuíferos utilizados para regar los cultivos.
- Falta de registros de sobreexplotación de acuíferos y usos de suelo comprometidos por su explotación.
- Falta de instrumentación sobre manantiales y ríos del sistema ASURCO. (Fuentes de abastecimiento y puntos de entrega)
- Falta de información del manejo integrado de plagas y enfermedades, no existen registros.
- Los análisis de suelo y agua se realizan en laboratorios privados, lo cual genera contratiempos y baja eficiencia.
- No cuenta con información actualizada de aforos de ríos, manantiales, ni cuenta con registros históricos de aforos en los ríos.

Lomelí (2020), menciona en su ponencia de problemática y retos de los distritos de riego en México que de los retos que deben ejecutarse para mejorar estos, es realizar un diagnóstico de los recursos humanos, materiales y financieros que se tienen y los que requieren en los distritos de riego, que permitan al gobierno federal ejercer la rectoría como autoridad del agua, y asignar los recursos necesarios para que esto se pueda alcanzar, implementando tecnologías de percepción remota para la supervisión y generación de la información estadística e hidrométrica, además de instrumentar por parte del gobierno federal, programas con recursos suficientes que permitan proporcionar apoyo con tecnología de punta a usuarios y asociaciones de usuarios.



## **5.3 Etapa 3: Propuesta de tecnologías aplicables para obtención y análisis de datos**

### **5.3.1 Tecnologías utilizadas**

Tras la revisión realizada a la base de datos de las tecnologías derivadas de la Industria 4.0, partiendo desde tecnologías de la información y comunicación hasta los 3 pilares fundamentales de la industria 4.0, se presenta en este subcapítulo el uso de tecnologías que permitirán siguiendo un orden lógico y ordenado los procesos de actualización, digitalización y análisis a partir de las tecnologías de percepción remota, sistemas de información geográfica, internet y aplicaciones, presentando como aporte para esta tesis el contar con manuales de aplicación de las tecnologías utilizadas y los provechos que se obtiene al aplicarlas, que ejemplifique la adopción de tecnologías de uso libre y fácil acceso para actualizar y analizar los distritos de riego.

El análisis y digitalización mediante el uso de imágenes satelitales permite tener un panorama general de las características del campo, abarcando todo un territorio a la vez, el sistema de información geográfica cuenta con programas de uso libre, que permite la operación de las imágenes sin necesidad de una licencia, además los datos satelitales quedan almacenados en archivos, los cuales pueden ser consultados en un momento determinado con el fin de analizar fácilmente tendencias en la región y aplicar inteligencia artificial para determinar.

La percepción remota en conjunto con internet, aplicaciones y sistemas de información geográfica son clave para evaluar cómo se desarrollan los cultivos, permitiendo geo localizar en que parte de la finca se tiene más cultivo, se tenga bien definida la poligonal de la superficie con derecho de riego y los que están fuera de derecho y están haciendo uso del agua, que parte está gastando más agua o requiere de mayor atención, lo que facilita el proyectar diferentes tecnologías que solventen estas circunstancias y que los productores pueden tomar las medidas conducentes a corregir errores en el manejo de sus cultivos y coadyuvar a una agricultura sustentable.

### **5.3.2 Percepción Remota (PR)**

Es notable el constante desarrollo de esta tecnología, ofreciendo más y mejores imágenes satelitales que se obtienen de los diferentes satélites equipados con diferentes sensores, lo cual genera que se pueda obtener más información, de alta calidad y resolución, hoy en día hay una variedad impresionante de satélites que ofrecen diferentes tipos de información y con un potencial considerable para la agricultura de precisión.

A continuación, se presenta la Tabla 10, que resume la mayor parte de los satélites de alta resolución, sensores con resoluciones espaciales de 5-10 metros en bandas multispectrales. Los tres sensores SPOT también contienen una banda pancromática.



Tabla 10 Sensores satelitales de alta resolución con resoluciones espaciales de 5-10 m en bandas multiespectrales (Yang, 2018).

Nombre del sensor	Año de lanzamiento	Número de bandas multiespectrales <sup>a</sup>	Tamaño de píxel multiespectral <sup>b</sup> / m	Pancromático o tamaño de píxel <sup>b</sup> / m	Resolución radiométrica / bit	Tiempo de visita / d
SPOT 5	2002 <sup>c</sup>	4 <sup>d</sup>	10	2.5	8	2-3
RapidEye	2008	5 <sup>e</sup>	6.5	N/A	12	1-5.5
SPOT 6	2012	4	6	1.5	12	1
SPOT 7	2014	4	6	1.5	12	1
Sentinel-2A	2015	13 <sup>f</sup>	10	N/A	12	5
Sentinel-2B	2017	13 <sup>f</sup>	10	N/A	12	5

Nota: <sup>a</sup> Todos los sensores, excepto los que tienen un superíndice, tienen cuatro bandas espectrales estándar (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano); <sup>b</sup> en el nadir; <sup>c</sup> se retiró en 2015; <sup>d</sup> tres bandas estándar espectrales (verde, rojo e infrarrojo cercano) a 10 m y una banda infrarroja de onda corta a 20 m; <sup>e</sup> cuatro bandas espectrales estándar y una banda de borde rojo; <sup>f</sup> cuatro bandas estándar espectrales a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m.

Para este trabajo se utilizaron las imágenes de los satélites Sentinel 2A Y 2B. La misión Sentinel-2 comprende dos órbitas polares satélites en la misma órbita, en fase a 180 ° entre sí. Los satélites gemelos, Sentinel-2A y -2B, se lanzaron el 23 de junio de 2015 y 7 de marzo de 2017, respectivamente. Son los dos primeros satélites ópticos de observación de la Tierra en el Programa Europeo Copérnico que se desarrollaron y construido bajo el liderazgo industrial de Airbus Defence and Space para la Agencia Espacial Europea. Sentinel-2A y-2B cada uno ofrece 13 bandas espectrales en el rango de 443-2190 nm con cuatro bandas estándar (es decir, azul, verde, rojo y NIR) en una resolución espacial de 10 m, cuatro bandas de borde rojo y dos Bandas SWIR a 20 m, y tres correcciones atmosféricas bandas a 60 m. El ancho de la franja orbital es de 290 km. Volver a visitar el tiempo es de 5 días en el ecuador y de 2-3 días en latitudes medias con los satélites gemelos. (Yang, 2018).

Las 13 bandas espectrales con las que cuenta las imágenes obtenidas mediante satelitales de Sentinel se presentan en la Ilustración 17, que abarcan desde el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo de onda corta, con longitudes de onda que van de 443 nanómetros (nm), hasta 2190 nm, y con cuatro bandas espectrales de 10 m de resolución espacial, seis bandas de 20 m y tres bandas de 60 m, el número de bandas y resolución depende del satélite utilizado.



Sentinel-2 Bands	Central Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Ilustración 17 Bandas, radiometría y resolución de las imágenes Sentinel 2

En cuanto a la resolución espectral el sensor con el que cuenta el satélite Sentinel es el MSI el cual cuenta con cuatro bandas en el visible y nueve en el infrarrojo cercano y medio, en la Ilustración 18 se puede observar los espectros electromagnéticos, que ilustra el espectro visible por el ojo humano (luz).

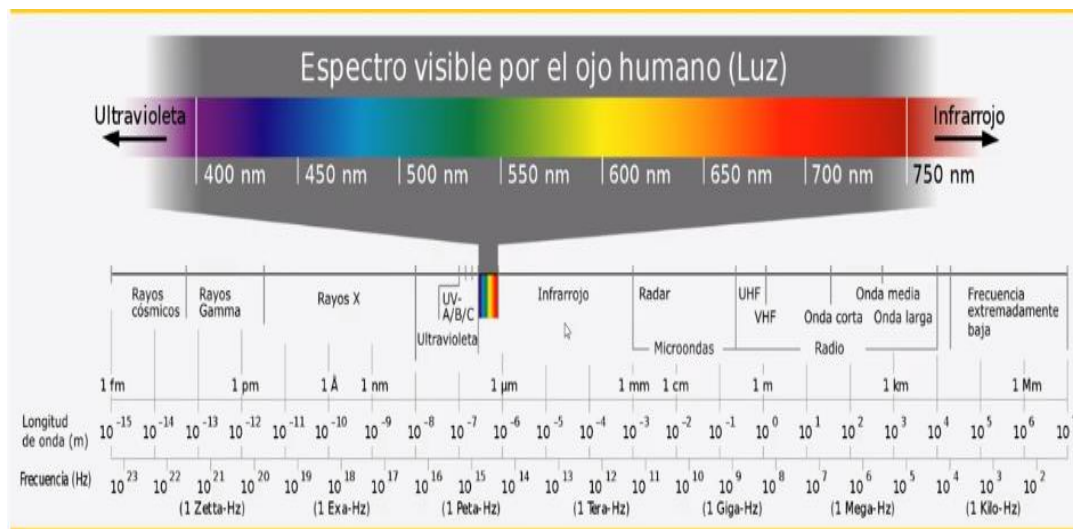


Ilustración 18 Espectros visibles, fuente: Internet

Díaz García-Cervigón (2015), menciona que, las imágenes en el espectro infrarrojo, junto con las del espectro visible, son particularmente útiles en agricultura dado que visualizan las concentraciones de clorofila en las hojas o tasas de actividad fotosintética, detectando procesos en los cultivos tales como el stress en la vegetación producido por la presencia de





plagas y enfermedades, falta de agua, problemas de suelos o baja de nutrientes (stress nutricional).

Cada banda está conformada por celdas, las cuales indican el valor medio de un área establecida y están representadas por el tamaño de pixel, que va de 10 a 60 metros en caso de imágenes Sentinel, cada pixel tiene un conjunto de valores propios que dependen de las condiciones del área, pues está directamente relacionado con la energía absorbida por el lugar, la transmitida y la energía reflejada captada por los sensores, así los valores de intensidad dependen de los objetos a los que se representa. Pixeles oscuros reflejan menos luz y los claros más luz, pixeles claros tienen valores más altos y pixeles oscuros tienen valores menores (Ilustración 19).

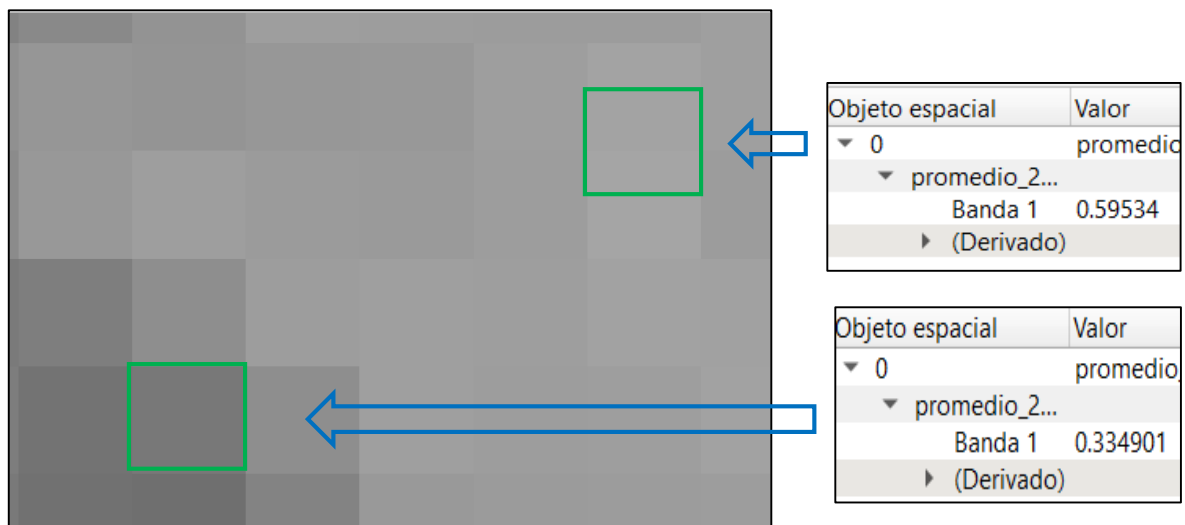


Ilustración 19 Comparación de valores de pixeles claros y oscuros

### 5.3.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Se requiere de un sistema que permita trabajar la información de los resultados del pre procesamiento que se realizó a las imágenes satelitales SENTINEL, recopilar toda la información obtenida por diferentes medios a fin de poder organizarlos, analizarlos y obtener una interpretación que permita analizar y digitalizar el sector agrícola a fin de ayudar en la toma de decisiones. Es aquí en donde entran los SIG, el cual permite integrar con precisión y eficiencia los diferentes datos, además de poder almacenarlos en diferentes capas, cada una de las cuales tiene una característica topográfica particular. Es decir, habrá una capa para los ríos, otra para vegetación, para asentamientos humanos, facilitando el acceso a datos concretos que permiten trabajar en forma integrada y organizada los datos geográficos (imágenes satelitales, planos) y numéricos (padrones de usuarios, estadísticas agrícolas, estudios diversos y caracterización genérica) con la finalidad de facilitar su almacenamiento, actualización, manipulación, análisis y su presentación en forma gráfica.

El sistema de información geográfica con el que vamos a realizar el trabajo es el software QGIS versión 3.10.4, el cual es un Sistema de Información Geográfica de código abierto. El



proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año. Se ha trabajado duro para hacer que el software SIG (tradicionalmente software propietario caro) esté al alcance de cualquiera con acceso básico a un ordenador personal. QGIS actualmente funciona en la mayoría de plataformas Unix, Windows y Mac. QGIS se desarrolla usando el kit de herramientas Qt (<https://www.qt.io>) y C++. Esto significa que es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar. Actualmente QGIS se encuentra disponible en la siguiente liga <https://www.qgis.org/es/site/>, en la que se tiene acceso a todas las versiones, complementos e información del software Ilustración 20. El sistema está disponible a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio (Qgis, 2018).



Ilustración 20 Pagina de descarga del software QGIS

Un SIG se compone básicamente de cinco elementos (Ilustración 21), que son:

- **Equipo Hardware:** Se refiere a la estructura de cómputo sobre la cual opera el SIG. Son los elementos tangibles en el cual opera el SIG.
- **Programas Software:** Son las herramientas lógicas que almacenan y procesan la información geográfica. Una de las características de estos programas es su desarrollo, el cual permite un manejo óptimo y a la vez sencillo para el usuario final.
- **Base de Datos:** Una base de datos geográfica o espacial es una base de datos con extensiones que dan soporte de objetos geográficos permitiendo el almacenamiento, ordenamiento, consulta y manipulación de información geográfica y datos espaciales.
- **Recurso Humano:** La tecnología de los SIG está limitada si no se cuenta con el personal que opera, desarrolla y administra el sistema; y que establece planes para aplicarlo en problemas del mundo real.
- **Métodos o Procedimientos de operación del sistema:** Un SIG operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del procedimiento, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización.



Ilustración 21 Componentes de un SIG (Santamaria, 2012).

QGIS opera por medio de capas temáticas de información igual que cualquier SIG (Ilustración 22), que al sobreponer una sobre otras permite hacer el análisis de temas e integrar todas estas capas en un espacio en común para poder hacer consultas y determinar áreas de influencia, de un modo organizado y que nos permita analizar todo el conjunto de datos obtenidos.

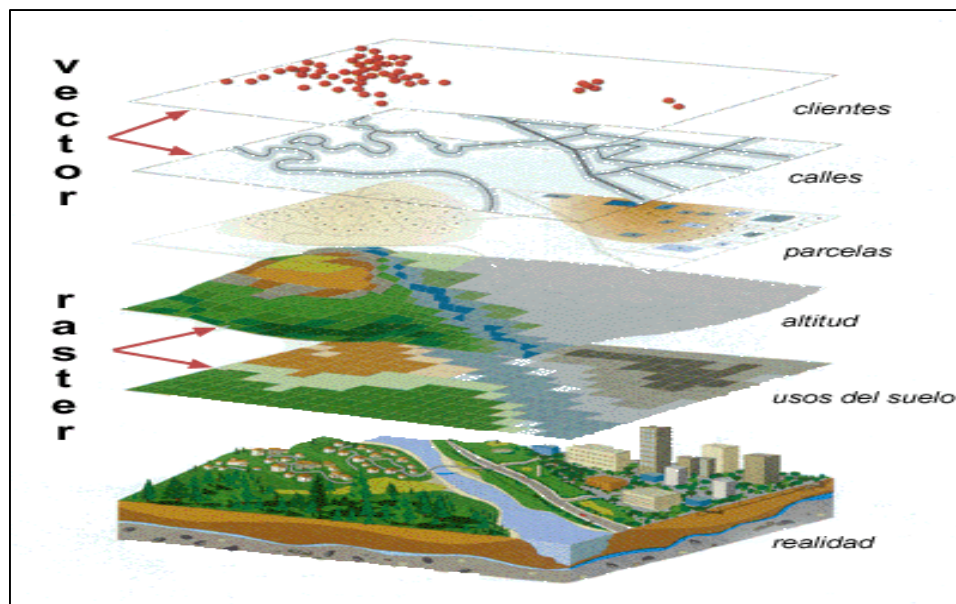


Ilustración 22 El concepto de capas (Escobar, 2000).

Existen 2 formas generales para representar el mundo real en los SIG que son los siguientes formatos:

- Información vectorial, es la información digital formado por objetos (líneas, arcos, puntos, polígonos), con atributos cartográficos, presentada en formato shp. y gpk.
- Información raster, es la información digital representada en mallas que divide la superficie terrestre en celdas regulares donde cada una de ellas representa un valor único.



Para poder compartir información y poder interponer toda la información se debe tener conocimiento de los parámetros cartográficos para este trabajo la proyección utilizada es UTM, zona 13, con Datum WGS 84, por lo que toda la información obtenida y descargada como lo son imágenes satelitales, cartografía de SINA, CONABIO, INEGI, SIAP y demás insumos fueron re proyectadas a este sistema de coordenadas, que refieren a la zona en que se encuentra el Estado de Morelos.

De aquí la importancia de conocer los siguientes conceptos:

**Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM):** este sistema, desarrollado por el ejército de los Estados Unidos, no es simplemente una proyección, sino que se trata de un sistema completo para cartografiar la totalidad de la Tierra. Para ello, esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas. Aunque en la actualidad se emplea un único elipsoide (WGS-84), originalmente este no era único para todas las zonas.

Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontremos, para mayor referencia ver Ilustración 23. La cuadrícula UTM tiene un total de 60 husos numerados entre 1 y 60, cada uno de los cuales abarca una amplitud de 6° de longitud. El huso 1 se sitúa entre los 180° y 174° O, y la numeración avanza hacia el Este. En latitud, cada huso se divide en 20 zonas, que van desde los 80° S hasta los 84° N. Estas se codifican con letras desde la C a la X, no utilizándose las letras I y O por su similitud con los dígitos 1 y 0. Cada zona abarca 8 grados de longitud, excepto la X que se prolonga unos 4 grados adicionales.

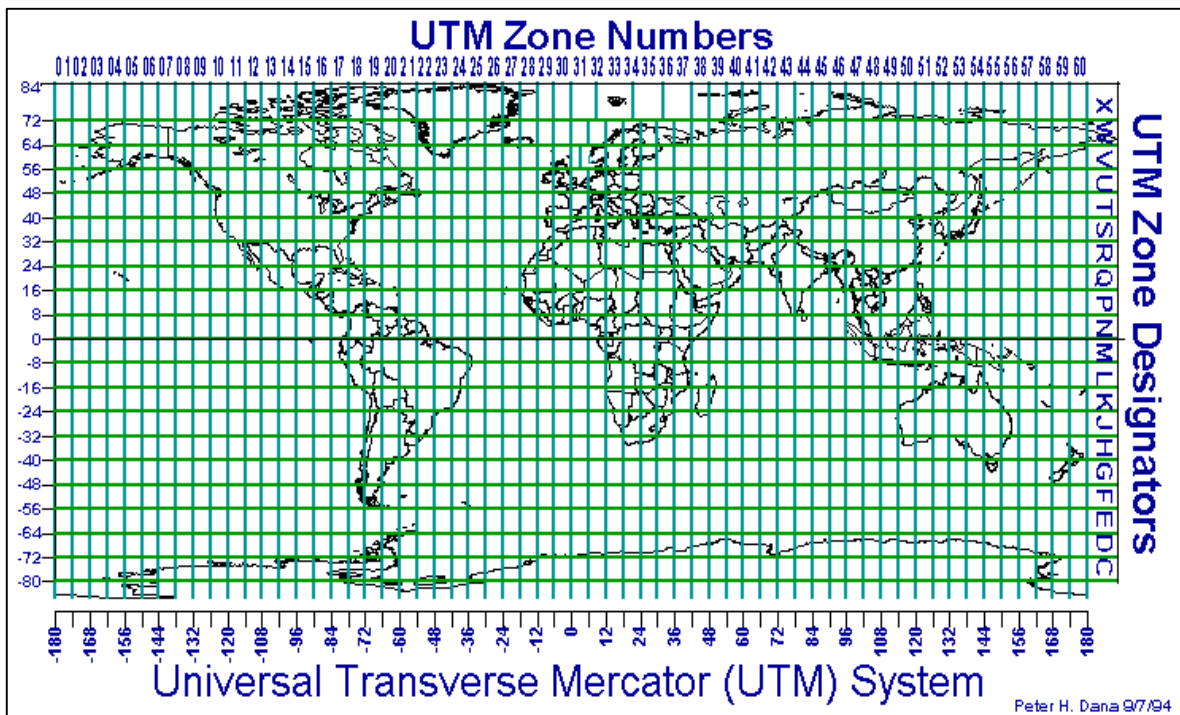


Ilustración 23 Zonas UTM, realizado por Peter H. Dana, de la universidad de Texas en 1997.



**Datum WGS 84**, significa Sistema Geodésico Mundial por sus siglas en inglés (World Geodetic System 1984), es el sistema de coordenadas cartográficas mundial que permite localizar cualquier punto en la Tierra es por eso que los GPS manejan esta configuración, el elipsoide WGS84 que tiene un cierto radio definido en el ecuador y un aplanamiento en la parte superior representa a la Tierra por medio de un geode Ilustración 24, se estima un error de cálculo menor a 2cm.



*Ilustración 24 Datum geodésico WGS 84, (Squartecchis, 2019)*

De igual forma se empleó el plugin denominado Semi Automatic Classification (SCP) versión 6.4.2, siendo una herramienta útil para la clasificación supervisada de imágenes de teledetección, proporcionando herramientas para la descarga, el pre-procesamiento y el post-procesamiento de las imágenes.

#### **5.3.4 Antecedentes de aplicaciones tecnológicas percepción remota, sistemas de información geográfica, internet y aplicaciones**

En muchos y diferentes artículos exponen que el proceso de adopción tecnológica y de toma decisiones en el sector agrícola debe crecer mediante una cultura de caracterizar y digitalizar el área de aplicación mediante la combinación de sistemas de información geográfica, percepción remota y sensores en campo.

El proceso de adopción de decisiones en el ámbito de la agricultura debe crecer mediante la combinación de la vigilancia actual del medio ambiente local y de la agricultura en el SIG (Sistema de Información Geográfica) y en las WSNS (redes de sensores inalámbricos) (Kumar & J, 2017).

El desarrollo de un SIG para un DR y los módulos que lo integran puede permitir, de una manera rápida y confiable: a) disponer, procesar y analizar la información geográfico-estadística generada durante el desarrollo de las actividades que hacen posible el funcionamiento del distrito de riego; b) actualizar el padrón de usuarios; c) actualizar el inventario de infraestructura hidroagrícola; d) integrar el SIG generado, con el sistema de recaudación del DR; y, e) integrar el SIG con la información climática y de operación para la toma de decisiones en tiempo real (Mejía-Saenz et al., 2003).

D'Urso et al., (2010), mencionan que los sistemas basados en el espacio proporcionan agricultura intensiva con la capacidad de monitorear el estado del cultivo, predecir el



rendimiento del cultivo, detectar enfermedades e infestaciones de insectos y apoyar la gestión de insumos y tareas agrícolas, además confirmaron la idoneidad de la estimación del coeficiente de cultivo del NDVI como un medio especial para estimar los requerimientos de agua del cultivo.

Haq et al., (2012), presentan en su artículo que a partir de técnicas de teledetección y GIS el monitoreo de inundaciones y la evaluación de daños en la provincia de Sindh, Pakistán, concluyendo que “el monitoreo de inundaciones utilizando datos satelitales demostró ser un método eficaz para obtener una visión general rápida y precisa de las áreas inundadas. En el estudio, se llevó a cabo un análisis oportuno y detallado utilizando Sensores Remotos y GIS para localizar e identificar las áreas afectadas por las inundaciones junto con las características del uso del suelo / cobertura del suelo. Se encontró que este método requería imágenes de satélite procesadas que luego se superpusieron con datos de densidad de población y mapas de uso de la tierra / cobertura de la tierra para estimar los daños.

En Cuba se ha utilizado herramientas de SIG y Teledetección para valorar las diferentes variables que intervienen en el proceso paulatino de degradación del suelo. Para ello se han valorado las diferentes variables medioambientales que participan en el proceso y mediante decisiones multicriterios, se han integrado las posibles soluciones en un solo mapa que muestra las áreas de terreno que son más susceptibles a procesos de desertificación (Ponvert, et al., 2013).

El monitoreo de rubros agrícolas a través de los SIG y la Teledetección genera información oportuna y veraz de superficies cultivadas, permitiendo conocer su localización, distribución espacial, comportamiento y evolución en distintos períodos de tiempo, elementos valiosos para la planificación y toma de decisiones. Esta información al ser gestionada mediante una infraestructura adecuada puede suministrar datos, información y las evaluaciones derivadas de estos pueden llegar de manera eficiente a todos los actores productivos e institucionales vinculados al sector agroalimentario del Estado. Con estas herramientas se podrá hacer seguimiento y control a los planes de desarrollo agrícola, programas de financiamiento de la banca pública, proyectos y procesos productivos que se desarrollan en el sector (Guillén-García et al., 2019).

Ezcaray et al., (2012) indica que las fotos aéreas, satelitales y digitalizadas, les permitirán observar los cultivos durante el desarrollo del mismo, pudiendo identificar y ubicar aquellos ambientes o sectores con problemas que requieren una rápida atención.

En los últimos años se han realizado múltiples trabajos que han capitalizado el uso de SIG y Teledetección en la agricultura, generando un servicio que permite visualizar y obtener los índices multispectrales de las parcelas y dando estrategias de desarrollo de cultivos en tiempo real, mediante plataformas que permiten observar y poder obtener características fundamentales de los cultivos, por ejemplo:

Programas de paga como Orcelis Fitocontrol (Ilustración 25), es un sistema en la nube de gestión de cultivos, que ofrece herramientas de agricultura de precisión contando con funcionalidades como obtención de índice NDVI, información básica del cultivo como tipo, variedad, número de plantas, marco de plantación, sistema de riego, registra diversas medidas climáticas, compatibilidad con sensores, tratamientos fitosanitarios.



Ilustración 25 Programa Orcelis, recuperado: <https://orcelis.com/precios/>

Programas gratuitos como el Sistema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), que es una aplicación web que tiene como objetivo la visualización de los datos *Ilustración 26*, formado por imágenes aéreas o también llamadas ortofotos que se toman con avionetas o satélites, pone a disposición de la administración y los agricultores un visor online, que permite la visualización y consulta de los datos que forman en el SIGPAC, así como otras utilidades como medir parcelas o consultar los códigos de un recinto. También incluye un buscador que, indicando el código, permite ubicar cualquier recinto dentro del territorio español, de manera gratuita.



Ilustración 26 Visor de identificación de parcelas agrícolas SIGPAC, recuperado: <https://sigpac.asturias.es/VisorSigPacHTML5/>

De igual forma la Unión Europea ha apoyado un proyecto para asesoramiento en riego a productores agrícolas denominado DEMETER (Demonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services), que ha sido exitosamente utilizado en España en el programa denominado Servicio de Asistencia en Riego Asistido por Satélite (e-SARAS), que maneja el Grupo de Teledetección y SIG de la Universidad de Castilla-La Mancha (Espínosa et al., 2015).



En México se ha empezado a digitalizar desde hace algunos años a los DR, por diferentes instituciones que se dieron a la tarea de recopilar información, digitalizar las parcelas, infraestructura, padrón de usuarios, caminos de acceso, red de conducción y distribución y estructuras en los canales, etc. Ilustración 27. Los resultados obtenidos fueron un gran paso hacia la digitalización y el uso de tecnologías innovadoras, obteniendo herramientas que permiten optimizar los trabajos, analizar de manera más rápida, manejar más rápido la información y así poder evaluar y responder rápidamente a informes, llevar un mejor control en los avances del plan de riegos, programas de conservación, administrar y operar de manera oportuna y eficiente los DR.

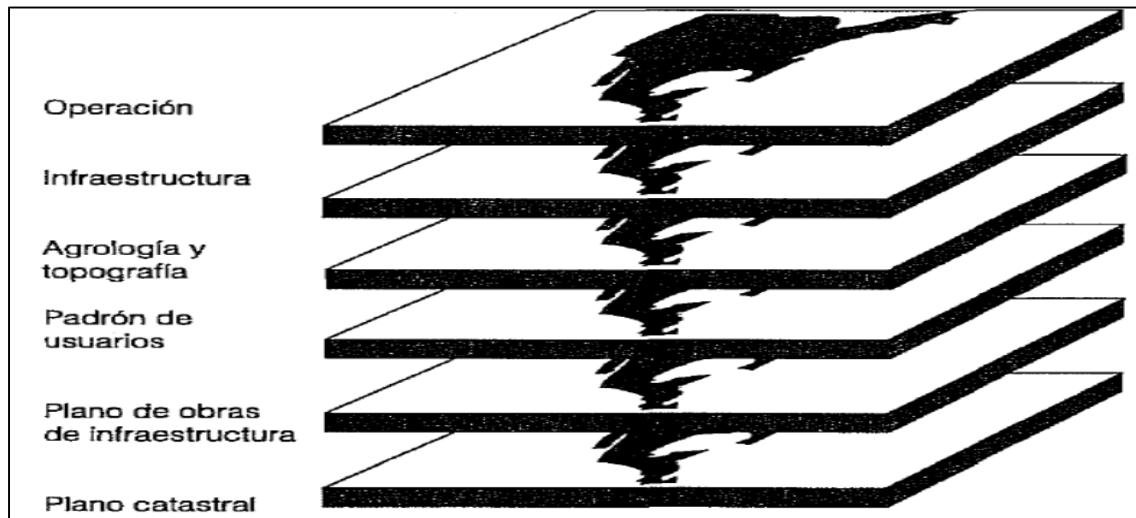


Ilustración 27 Representación gráfica del sistema de información geográfica para distritos de riego (Velasco et al., 1994)

Se considera que para muchos de los DR el trabajo de digitalización se abandonó y no se le dio el seguimiento requerido de actualización que requieren estas tecnologías, como indicó (Velasco et al., 1996), que la causa de que muchos de los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico queden sin rendir su máxima utilidad, se debe a la falta de una adecuada evaluación y seguimiento, por lo que la potencialidad que se espera con estas herramientas tecnológicas se pierde, ya que se requiere de trabajos periódicos de actualización, migrar las bases de datos a software de código abierto y capacitar al personal para utilizar todas estas técnicas de digitalización y puedan actualizar los datos con las visitas de campo, e integrar y recopilar toda la información que se pueda recabar de internet y de imágenes satelitales y vuelos de drones, y como consecuencia se tendrá una base de datos firme para poder tomar mejores decisiones ayudando a mejorar el uso del agua y aumentar el rendimiento de los cultivos.

Las tecnologías de observación de los cultivos mediante sensores son herramientas que de igual forma se han empezado a utilizar en los DR, un ejemplo de ello es la aplicación de monitoreo satelital realizado en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, el cual se encuentra en Sonora en el cual Espinosa et al. (2015), indican que el apoyo a la agricultura en general y a la de riego en particular, mediante el uso de imágenes satelitales combinadas con Sistemas de Información Geográfica y las Tecnologías de la Información, son herramientas de mucho valor que ayudarán a los usuarios del agua a mejorar su utilización y aumentar el rendimiento de sus cultivos.





Concluyendo que, mediante estos métodos, es posible evaluar cómo se desarrollan los cultivos y en su caso los productores pueden tomar las medidas conducentes a corregir errores en el manejo de sus cultivos.

Montoya et al. (2017), advierte que el problema para un agricultor que aún no ha implementado en sus cultivos algunas de las técnicas de predicción y herramientas de agricultura de precisión, es el alto costo y la complejidad en interpretar la información obtenida al utilizar sistemas de posicionamiento global GPS o imágenes satelitales e incluso la utilización de drones. Por lo anterior, existe una gran demanda y necesidad de integrar un conjunto de componentes adecuados y de bajo costo organizados en una propuesta arquitectónica, dada la gran cantidad de tecnologías que vienen surgiendo.

**Yang (2018), indica que los desafíos en el análisis de imágenes satelitales son los siguientes:**

- Los cultivadores no tienen claro qué tipo de imágenes seleccionar y cómo pedir imágenes nuevas o archivadas para sus aplicaciones particulares.
- Adquisición y entrega oportuna de imágenes ordenadas por tarea, aunque muchos sensores de satélites tienen un tiempo de revisión de 1 a 5 días, el tiempo real de adquisición de imágenes puede variar enormemente, dependiendo de las condiciones meteorológicas locales y de la competencia con otros clientes de la misma zona geográfica.
- Procesamiento y conversión de imágenes en mapas o información útil, el software utilizado para el procesamiento y análisis de imágenes viene en diferentes capacidades, complejidades, precios y los cultivadores y otros usuarios pueden tener dificultades para seleccionar el software apropiado para procesamiento de imágenes.

Por consiguiente, es necesario que los investigadores y los especialistas en divulgación elaboren guías prácticas para los cultivadores y otros usuarios finales, de modo que puedan utilizar las técnicas y los programas informáticos disponibles para convertir las imágenes en mapas adecuados para las aplicaciones de la agricultura de precisión.

## **5.4 Etapa 4: Análisis del sector**

### **5.4.1 Actividades a desarrollar**

Para realizar el análisis del sector mediante percepción remota con el uso de imágenes satelitales y la construcción del modelo basado en Sistemas de Información Geográfica, en complemento con aplicaciones e internet se realizó el siguiente flujo de trabajo, con el fin de establecer un manual de aplicación, con prácticas de muestreo y análisis de imágenes satelitales sencillas y fáciles de aplicar y de forma que los tomadores de decisiones en este sector se concienticen de la importancia de recoger más y mejores datos para resolver problemáticas existentes y mejorar el sistema.

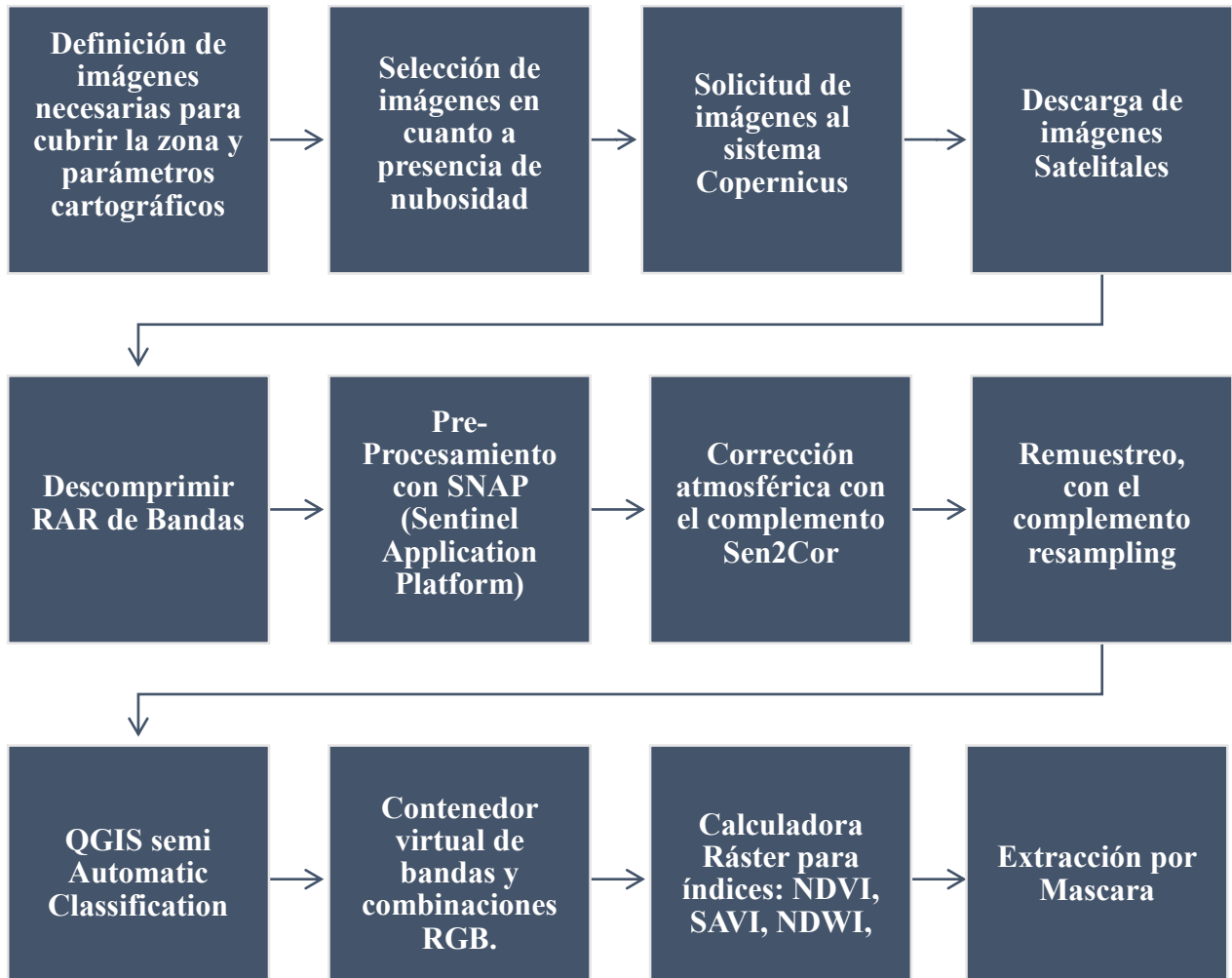
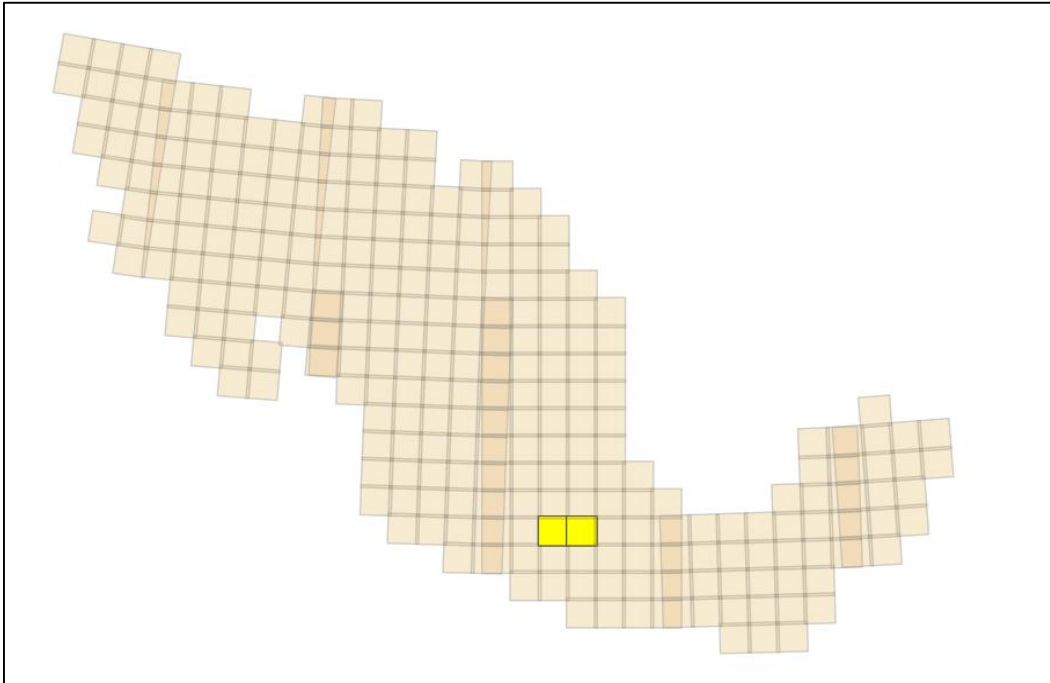


Ilustración 28 Flujo de Trabajo procesamiento de Imágenes Satelitales en Modelo SIG

A continuación, se explican cada una de las actividades desarrolladas para el análisis del sector.

#### 5.4.2 Definición de imágenes necesarias para cubrir la zona y parámetros cartográficos

Para la delimitación de la zona de trabajo se utilizó un shape del Distrito de Riego que está disponible en SINA y un shape que muestra una malla de la superficie cubierta por una imagen, así al sobreponerlos se obtuvo el número de imágenes necesarias para cubrir toda el área de trabajo y su identificación para descargarlas en la página. Para cubrir el área se requieren de 2 imágenes satelitales 14QMF Y 14QNF, (Ilustración 29).



*Ilustración 29 Malla de Imágenes Sentinel de México*

#### **5.4.3 Selección de imágenes en cuanto a presencia de nubosidad**

Para poder desarrollar un análisis correcto debemos buscar imágenes que tengan la menor presencia de nubes ya que esto dificulta el análisis de imágenes al no obtener información de las áreas cubiertas por nubes, la mayoría de las páginas en donde se descargan las imágenes permite observar las imágenes a descargar y de esta forma puedes escoger la que tenga menor presencia de nubes y que no interfieran con la zona en que se va a trabajar, de igual forma tienen filtros de porcentaje de cobertura de nubes, algunas páginas en que se pueden descargar las imágenes son las siguientes:

- <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

#### **5.4.4 Solicitud de imágenes al sistema Copernicus**

La solicitud en este caso se hizo al servidor de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) ver Ilustración 30, requiriendo las imágenes multiespectrales, 2 por mes del año 2018 y 2019, con una presencia de nubosidad mínima y un nivel de procesamiento 1C, las correcciones básicas radiométrica, geométrica, remuestreo, etc. En valores de reflectancia en el tope de la atmosfera (TOA).

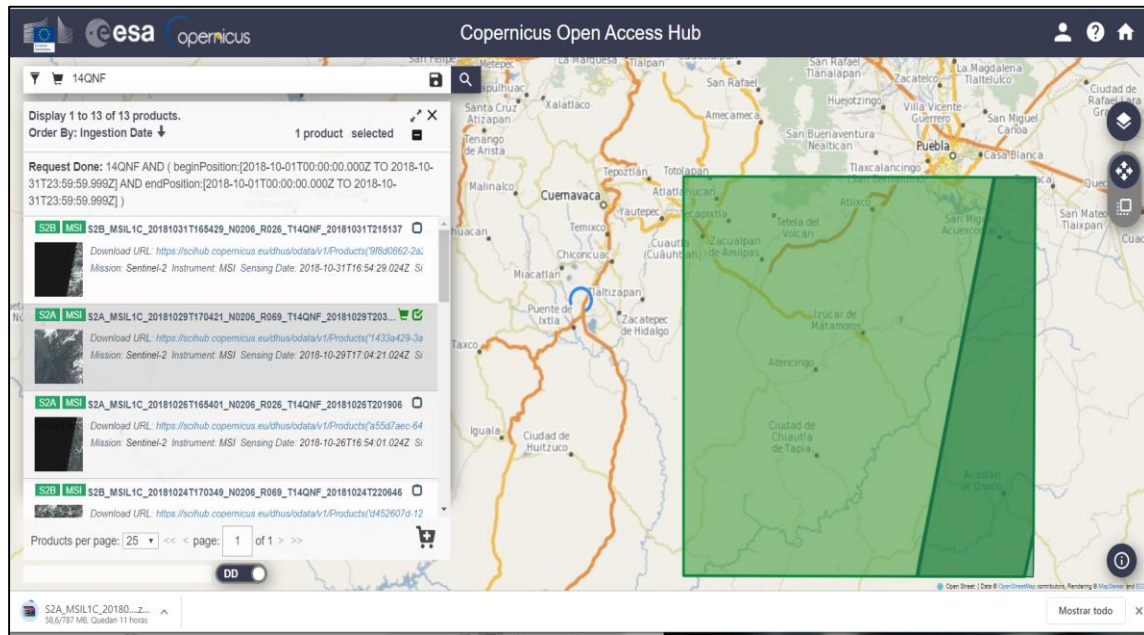


Ilustración 30 Acceso al servidor de la ESA, recuperado: <http://scihub.copernicus.eu/dhus>

El Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus proporciona información geográfica diversa (ocupación del suelo y sus cambios, uso del suelo, estado de la vegetación, ciclo del agua y variables de la energía superficial de la tierra) a una amplia gama de usuarios europeos y de todo el mundo en el campo de las aplicaciones medioambientales terrestres.

### 5.4.5 Descarga de Imágenes Satelitales

Con base a los parámetros anteriores se obtuvieron resultado de 48 imágenes multispectrales con una resolución espacial de 10, 20 y 60 m; con 13 bandas espectrales que van desde las longitudes de ondas cortas para la detección de aerosoles, pasando por el visible y el infrarrojo; 26 corresponden a la misión S2A y 22 a la misión S2B (Tabla 11).

Tabla 11 Relación de Imágenes SENTINEL

Misión	Nivel	Año/Día/MES	Zona
S2A	MSIL1C	20180107	T14QMF
S2B	MSIL1C	20180226	T14QMF
S2A	MSIL1C	20180303	T14QMF
S2A	MSIL1C	20180422	T14QMF
S2A	MSIL1C	20180502	T14QMF
S2A	MSIL1C	20180601	T14QMF
S2A	MSIL1C	20180721	T14QMF
S2B	MSIL1C	20180825	T14QMF
S2A	MSIL1C	20180929	T14QMF
S2A	MSIL1C	20181019	T14QMF
S2B	MSIL1C	20181123	T14QMF
S2B	MSIL1C	20181223	T14QMF



Misión	Nivel	Año/Día/MES	Zona
S2B	MSIL1C	20180107	T14QNF
S2B	MSIL1C	20180216	T14QNF
S2B	MSIL1C	20180328	T14QNF
S2B	MSIL1C	20180417	T14QNF
S2A	MSIL1C	20180522	T14QNF
S2A	MSIL1C	20180601	T14QNF
S2B	MSIL1C	20180716	T14QNF
S2B	MSIL1C	20180805	T14QNF
S2A	MSIL1C	20180919	T14QNF
S2A	MSIL1C	20181029	T14QNF
S2A	MSIL1C	20181118	T14QNF
S2B	MSIL1C	20181223	T14QNF
S2A	MSIL1C	20190107	T14QMF
S2A	MSIL1C	20190216	T14QMF
S2B	MSIL1C	20190313	T14QMF
S2A	MSIL1C	20190417	T14QMF
S2B	MSIL1C	20190522	T14QMF
S2B	MSIL1C	20190611	T14QMF
S2A	MSIL1C	20190706	T14QMF
S2B	MSIL1C	20190830	T14QMF
S2A	MSIL1C	20190914	T14QMF
S2A	MSIL1C	20191014	T14QMF
S2B	MSIL1C	20191108	T14QMF
S2A	MSIL1C	20191213	T14QMF
S2B	MSIL1C	20190122	T14QNF
S2B	MSIL1C	20190211	T14QNF
S2B	MSIL1C	20190313	T14QNF
S2A	MSIL1C	20190417	T14QNF
S2A	MSIL1C	20190527	T14QNF
S2B	MSIL1C	20190611	T14QNF
S2A	MSIL1C	20190716	T14QNF
S2A	MSIL1C	20190815	T14QNF
S2B	MSIL1C	20190909	T14QNF
S2A	MSIL1C	20191014	T14QNF
S2B	MSIL1C	20191108	T14QNF
S2A	MSIL1C	20191203	T14QNF

#### 5.4.6 Descomprimir RAR de Bandas

Todas las imágenes que se descargaron son completas, conformadas por varios gránulos que poseen un tamaño de archivo bastante grande, por lo que dependiendo de los recursos computacionales el tiempo de descarga varía, una vez terminada la descarga se debe descomprimir el archivo descargándolo dentro del directorio en el que se va a trabajar.

Es importante tener en cuenta, que en ocasiones Windows presenta una limitación en el número de caracteres (256) posibles de una ruta de archivo a ser leídos al momento de abrirlo.



Para resolver esto, al descargar la imagen Sentinel 2, se recomienda copiar y pegar la carpeta descomprimida directamente en el directorio “C:\” o “D:\”, según sea el caso. Además, Casella et al. (2018) recomiendan editar el nombre de la carpeta dejando la nomenclatura correspondiente al ID de la misión, nivel del producto, fecha de adquisición, gránulo y la extensión, a continuación, se da un ejemplo del arreglo de las carpetas y el nombre de las carpetas:

comprimidas	10/12/2019 02:14 p. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20190107T170701_T14QMF.SAFE	07/01/2019 09:45 p. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20190216T170401_T14QMF.SAFE	16/02/2019 09:10 p. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20190417T165901_T14QMF.SAFE	18/04/2019 01:04 a. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20190706T165901_T14QMF.SAFE	07/07/2019 01:31 a. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20190914T165921_T14QMF.SAFE	15/09/2019 03:33 a. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20191014T170251_T14QMF.SAFE	14/10/2019 10:28 p. m.	Carpeta de archivos
S2A_MSIL1C_20191213T170711_T14QMF.SAFE	13/12/2019 10:31 p. m.	Carpeta de archivos
S2B_MSIL1C_20190313T170059_T14QMF.SAFE	14/03/2019 01:07 a. m.	Carpeta de archivos
S2B_MSIL1C_20190522T165859_T14QMF.SAFE	22/05/2019 10:19 p. m.	Carpeta de archivos
S2B_MSIL1C_20190611T165859_T14QMF.SAFE	11/06/2019 10:48 p. m.	Carpeta de archivos
S2B_MSIL1C_20190830T165849_T14QMF.SAFE	30/08/2019 10:37 p. m.	Carpeta de archivos
S2B_MSIL1C_20191108T170519_T14QMF.SAFE	08/11/2019 09:33 p. m.	Carpeta de archivos

*Ilustración 31 Arreglo de carpetas con nomenclatura sugerida*

#### 5.4.7 Pre-procesamiento con SNAP (Sentinel Application Platform)

Las imágenes en nivel 1C se les tiene que hacer una corrección atmosférica, la cual fue realiza con un programa que se ha desarrollado especialmente para las imágenes SENTINEL, el **SNAP** (*Sentinel Application Platform*) y que es de descarga y uso gratuito.

Para este trabajo se utilizó la versión actual de SNAP, la cual es la 7.0.0 y se encuentra disponible en la página <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>, descargar según el sistema operativo y de igual forma se puede acceder para descargar versiones anteriores, en la siguiente ilustración se aprecia la ventana de internet de donde se descarga el programa.

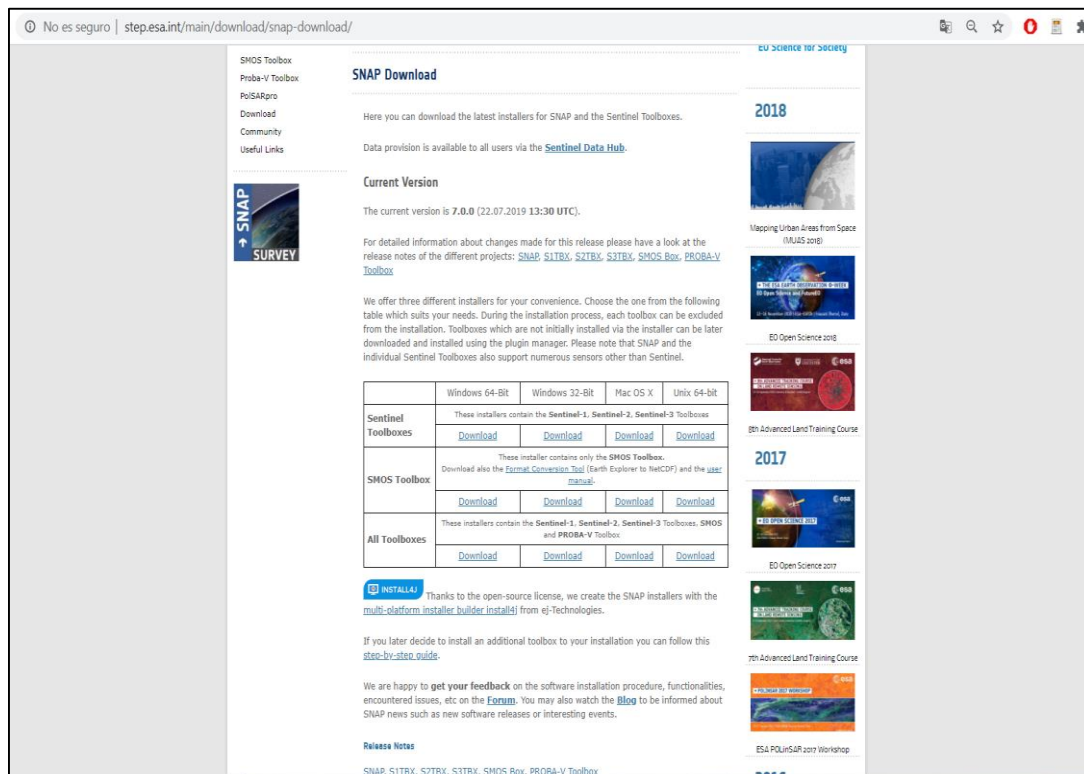


Ilustración 32 Ventana de la página de descarga.

Por otro lado, el proyecto SNAP ha diseñado el componente Sen2Cor como herramienta que ofrece excelentes resultados en la corrección atmosférica y geométrica de los datos de los satélites Sentinel. Esto es necesario cuando se debe trabajar con imágenes liberadas de alteraciones atmosféricas o presencia de nubes, proceso necesario en algunos estudios como los análisis multitemporales o la comparación de índices de vegetación (Casella et al., 2018).

#### 5.4.8 Corrección atmosférica con el complemento Sen2Cor

Sen2Cor de SNAP elimina la neblina, cirros y sombras de nubes, no nubes densas, permitiendo obtener imágenes satelitales con un nivel de proceso 2A, suele ser referida igualmente como Reflectancia en la Superficie (SR o Surface Reflectance), las cuales son utilizadas para la obtención de Índices Normalizados (NDVI, NDWI, etc.).

Un resultado interesante para Copernicus es que la reflectancia oficial de Sentinel-2, la obtenida con Sen2Cor tiene una exactitud aceptable para la imagen en estudio (error < 3% respecto a las reflectancias tomadas como referencia), cumpliendo la misión de requisitos de precisión radiométrica (Padró et al., 2018).

El proceso para realizar la corrección atmosférica mediante la componente Sen2Cor es sencillo, inicia cargando la imagen en el programa, una vez abierta la imagen ir al menú y seleccionar **Optica / Thematic Land Processing / Sen2Cor** y en la pestaña **Processing Parameters** indicar que a todas las imágenes 10, 20 y 60 metros y por último **Run** (Ilustración 33).

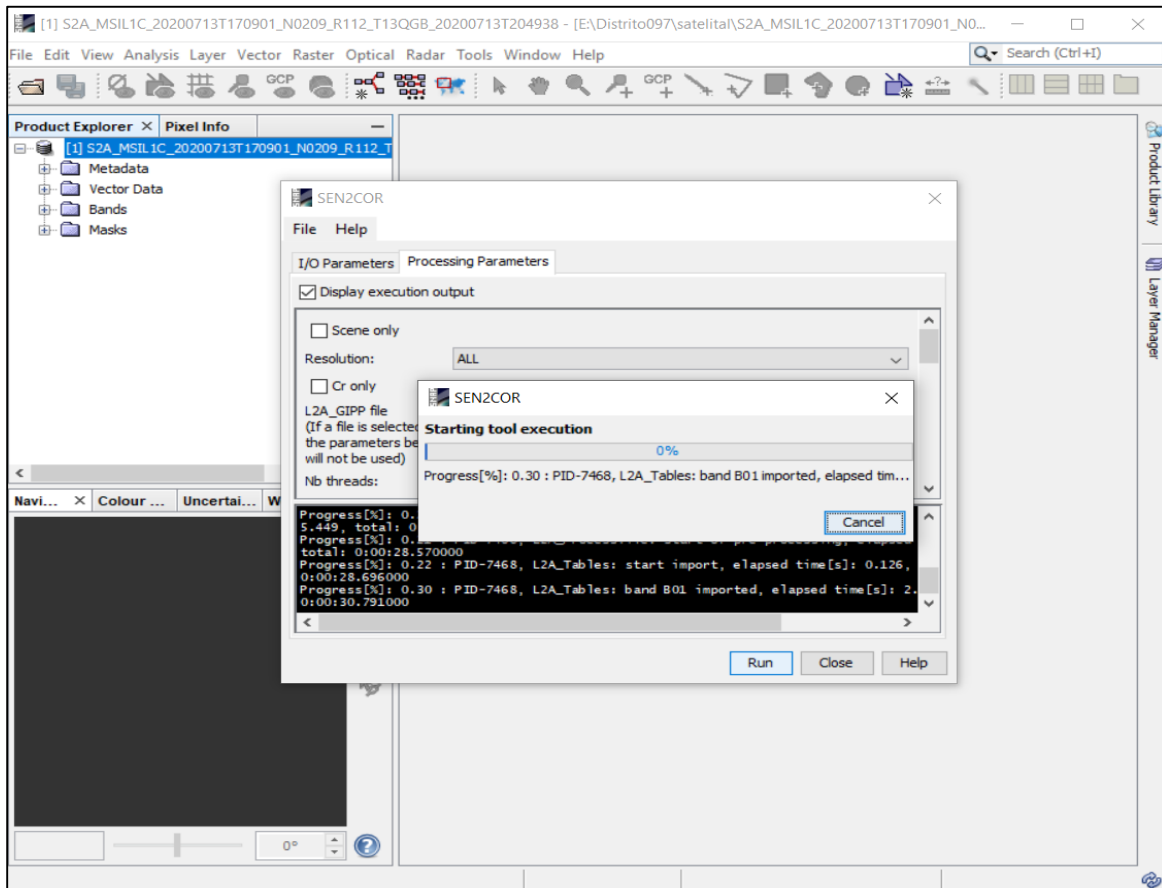


Ilustración 33 Proceso de corrección atmosférica con Sen2Cor.

#### 5.4.9 Remuestreo con el complemento resampling

Una vez realizada la corrección atmosférica se obtiene una carpeta de nivel 2A, que contiene las bandas corregidas en diferentes carpetas dependiendo su resolución de 10, 20 y 60 m, para poder realizar operaciones entre las bandas, cálculos de variables físicas, extracción de valores de píxeles, obtener índices, aplicación de máscaras, análisis de cultivos es necesario aplicar un remuestreo para que todas las bandas posean la misma resolución espacial y se pueda trabajar mejor con ellas.

SNAP ofrece el complemento para realizar el remuestreo de diferentes opciones, puede ser definida en referencia a una banda, definir el tamaño de la imagen en píxeles x píxeles, por la resolución del píxel, en este caso, se optó por seleccionar el de referencia a una banda, escogiendo la banda 2 que tiene una resolución espacial de 10 m que es una de las bandas con menor resolución espacial, ver Ilustración 17.

Una vez cargada las imágenes corregidas ir al menú y seleccionar **Raster / Geometric operations / Resampling in I/O Parameters** elegir en donde se guardarán los archivos y en **Resampling Parameters** elegir la banda 2 como referencia por tener una resolución de 10 m y por último **Run**, ver Ilustración 34.



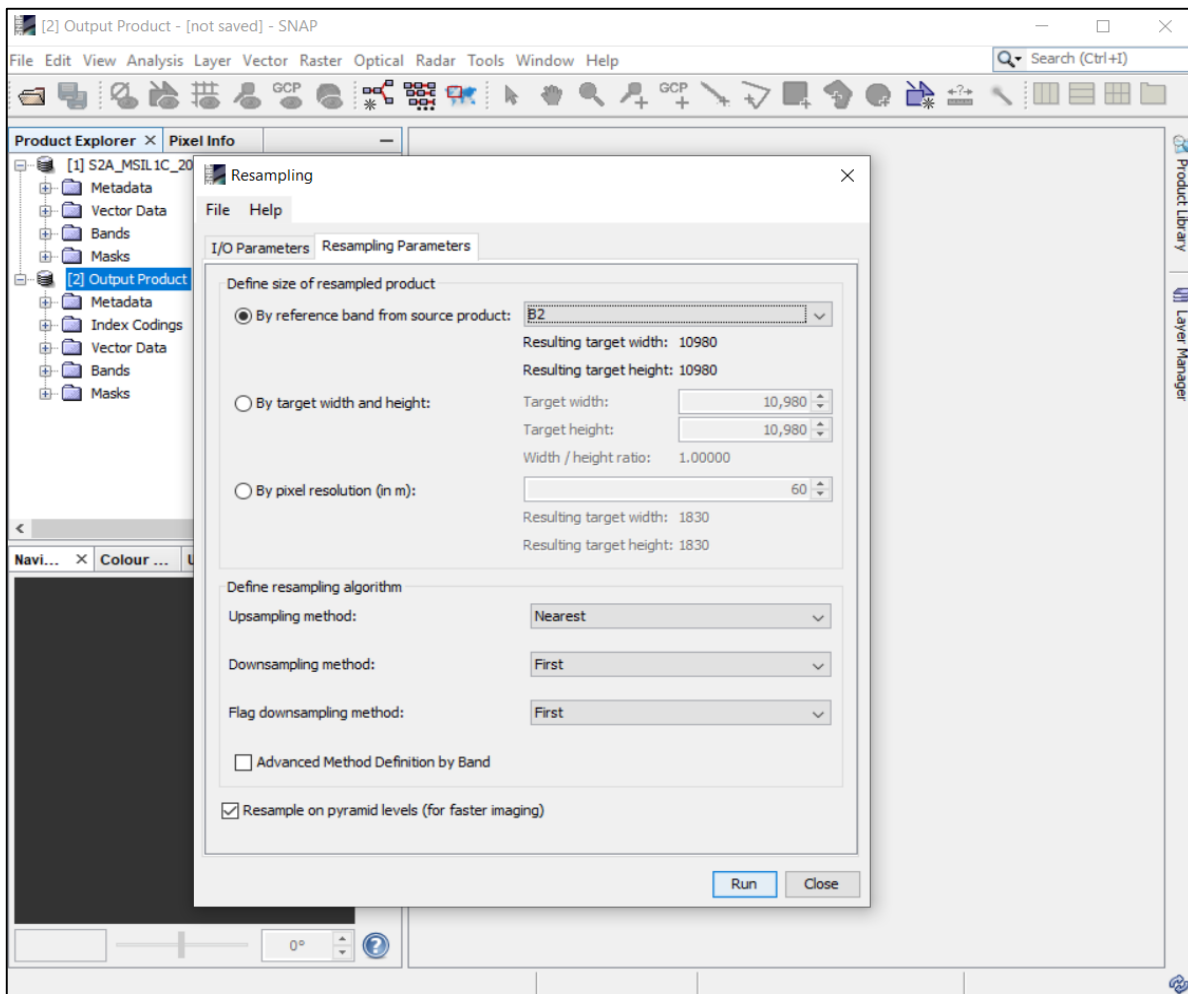



Ilustración 34 Proceso de remuestreo con el complemento Resampling

#### 5.4.10 QGIS Semi Automatic Classification

Se empleó el plugín del software QGIS versión 3.10.4 denominado Semi - Automatic Classification (SCP) versión 6.4.2, es un repositorio de código abierto y libre acceso para QGIS, siendo una herramienta útil para la clasificación supervisada de imágenes de teledetección, proporcionando herramientas para la descarga, el pre-procesamiento y el post-procesamiento de las imágenes, y calculadora ráster, entre otras.

SCP ofrece entre muchas de sus herramientas, la de cortar múltiples ráster y obtener únicamente la zona de trabajo, permitiendo cortar varios ráster a la vez lo primero que se debe hacer es cargar las imágenes en juego de bandas pulsa sobre el botón  de **Multiban image list**, para seleccionar los archivos de las imágenes procesadas. Una vez seleccionadas, en **Definición del juego de bandas** se establece como **Band set 1**, las imágenes se muestran en el mapa y las bandas se cargan en el conjunto de bandas ver Ilustración 35.

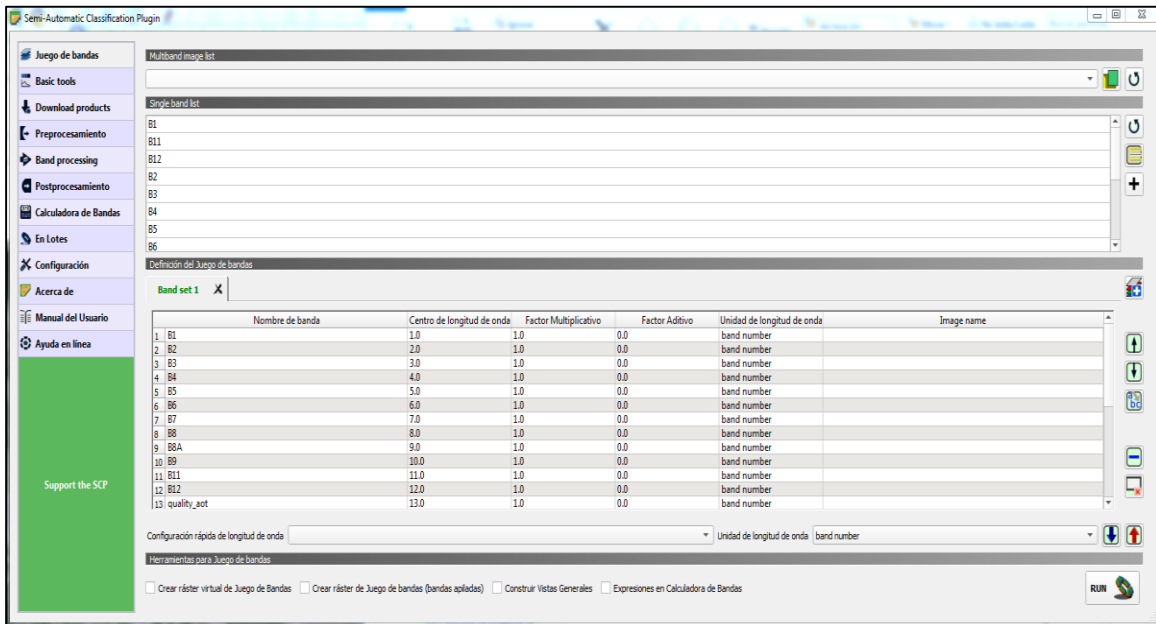


Ilustración 35 Ventana para cargar imágenes procesadas en el repositorio de SCP

Después de cargar las imágenes en el SCP diálogo hacer clic en la pestaña **Preprocesamiento**, seleccionar la opción **Recortar múltiples ráster**, en la casilla de **Select input band set** elegir la 1 que es la dirección de las bandas cargadas, poner con que subfijo queremos guardar las imágenes recortadas que en este caso se dejara el que trae que es clip, en **Coordenadas de Corte** hay varias formas de establecer el área de trabajo establecer sobre el mapa la superficie a cortar o haciendo uso de un vector para realizar el corte, para este trabajó ya se tenía la superficie de corte establecida en un shape y solo se debe de cargar, (Ilustración 36), por ultimo **RUN**.

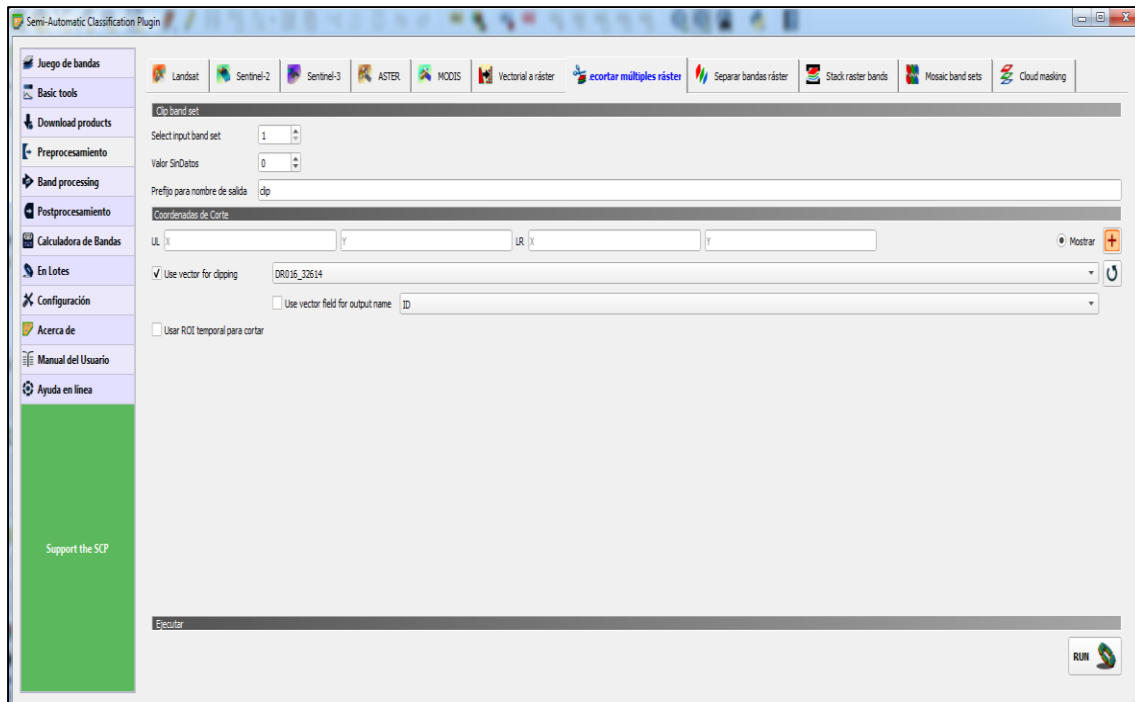


Ilustración 36 Ventana para recortar múltiples ráster en el repositorio de SCP.



Es importante mencionar que con esta herramienta se pueden realizar todas las tareas, desde descarga de imágenes satelitales, hasta el pre y post procesamiento con el fin de hacer un flujo de trabajo automático.

#### 5.4.11 Contenedor virtual de bandas y combinaciones RGB

Para poder manejar de manera más rápida y reducir el volumen de datos se generó un conjunto de datos virtual (VRT), los cuales a partir de algoritmo fusiona varios archivos ráster en un mosaico, considerando que un solo archivo VRT es un dataset ráster.

Para crear el archivo virtual que contiene todas las bandas ráster, es dar clic sobre el menú **Ráster/ Miscelánea/ Construir Ráster Virtual**, para después en la ventana de entrada, en **Input layers (entrada múltiple: rásteres)** seleccionar las bandas ráster, que en este caso son 13 bandas, después se debe indicar la resolución de salida del mosaico indicando el más alto **Highest**, las demás opciones se quedan por default, indicar la salida del archivo ráster y por último **Ejecutar** (Ilustración 37).

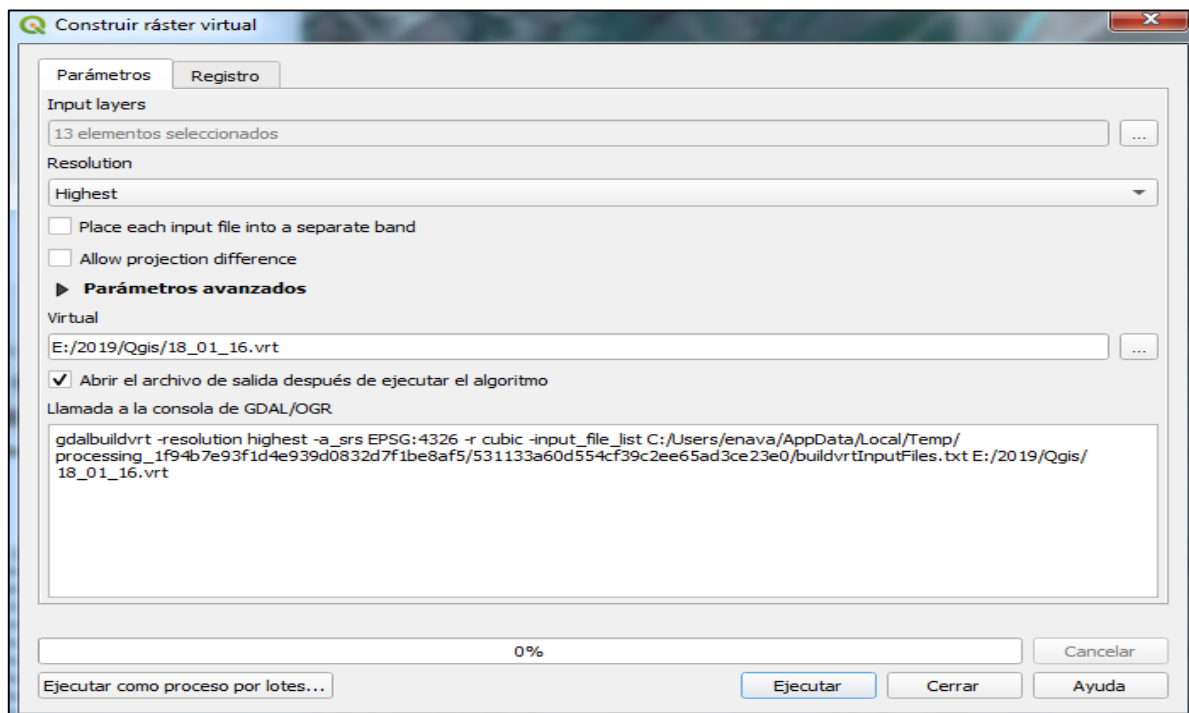
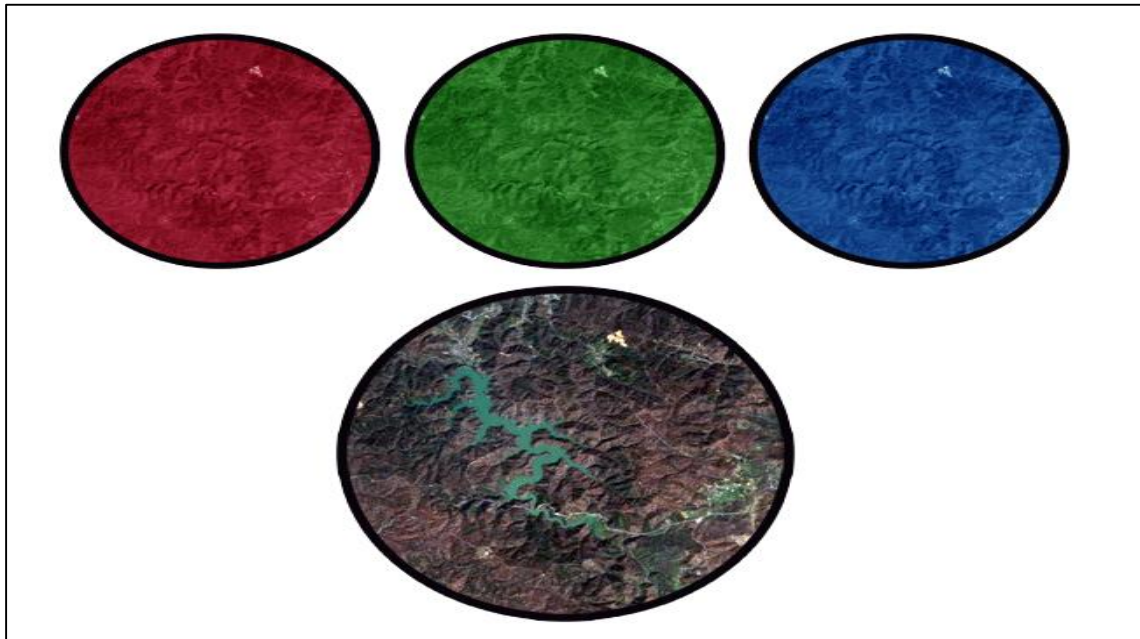


Ilustración 37 Ventana de construcción de ráster virtual

La combinación de imágenes satélites nos permite analizar elementos específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión. Gracias a las distintas bandas multispectrales de operación de los satélites podemos interpretar aspectos como la vegetación, los usos del suelo o las masas de agua (gisadminbeers, 2017). Las composiciones Red, Green, Blue, (RGB) son de las técnicas de teledetección para realizar composiciones, este entregable es una combinación de verdadero color que ayuda a localizar zonas que carecen de vegetación, y observar la evolución de la siembra.



*Ilustración 38 La creación de estas imágenes parte del paso de bandas a través de tres canales: rojo, verde y azul (gisadminbeers, 2017)*

Puesto que el archivo virtual contiene todas las bandas que ofrece Sentinel, podemos generar todas las combinaciones posibles en función del estudio deseado, basta con conocer el rango de trabajo en el que operan las bandas que se puede observar en la Ilustración 17, y el comportamiento de absorción y reflexión de los elementos ya que a partir de estos valores es que se podrán teñir de colores cada banda, obteniendo con la mezcla de 3 diferentes bandas pasadas por los filtros rojo, verde y azul las imágenes, en función del estudio deseado.

Lo fundamental para interpretar las bandas multispectrales es entender que los objetos muestran unos niveles de reflectancia mayor o menor en función de la banda de operación. Las diferentes longitudes de onda del espectro serán reflejadas o absorbidas por el territorio pudiendo advertir, a través del degradado de píxeles, las zonas de mayor o menor absorción/reflexión. Esto es lo que delatará a los objetos a nivel de comportamiento para posteriormente poder teñirlos de colores. Por norma general, buscamos los elementos objeto de análisis sólo en aquellas bandas donde **“llaman la atención”**. En otras palabras, cuando reflejan energía en exceso mostrando manchas claras, aunque también pueden llamar la atención por absorber energía en exceso mostrando manchas oscuras. Así, por ejemplo, la vegetación refleja en el NIR, las masas de agua helada reflejan energía en el visible, el agua absorbe en el SWIR, los objetos a elevada temperatura como la lava volcánica reflejan en el SWIR o las infraestructuras urbanas tienden a reflejar en el visible (gisadminbeers, 2018).

Para generar estas composiciones de imágenes se debe abrir la propiedad del archivo virtual y se debe elegir la banda que se desea pasar por cada uno de los canales rojo, verde y azul, y así filtrar cada banda por su correspondiente canal para generar las diferentes composiciones RGB, ver (Ilustración 39).

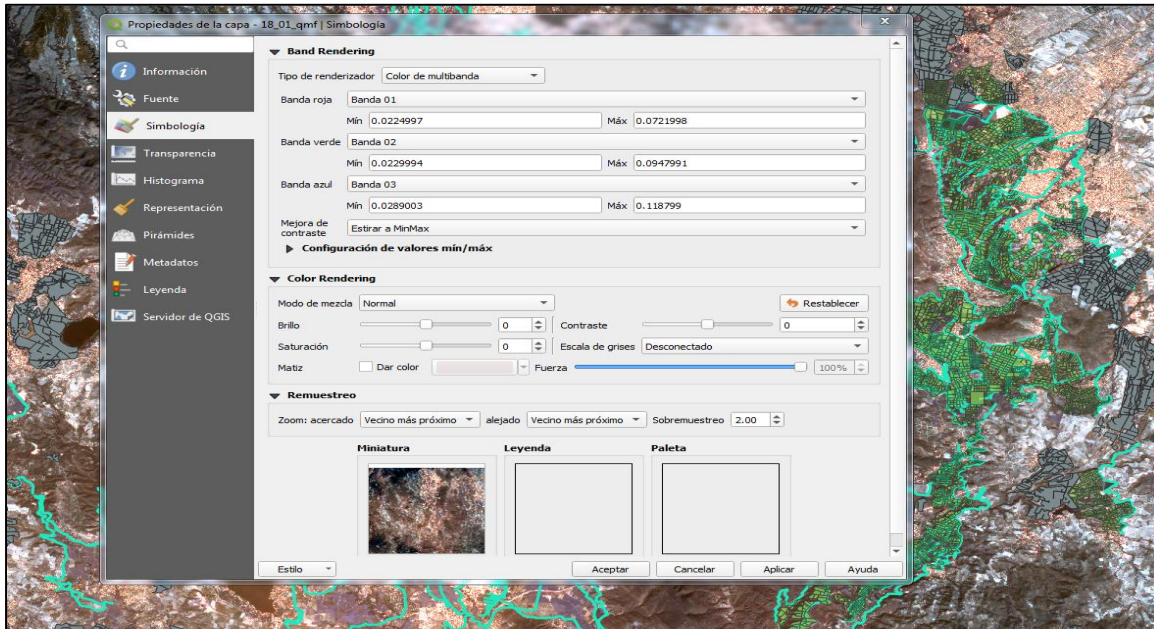


Ilustración 39 Propiedades de la capa para composiciones NIR.

A fin de poder realizar un análisis más completo, se realizaron varias combinaciones de bandas, para complementar con estudios más específicos que se analizaron mediante análisis multispectrales permitiendo diferenciar entre las plantas sanas y enfermas que el ojo humano no ve, a continuación, se muestra algunas composiciones de imágenes realizadas en este trabajo:

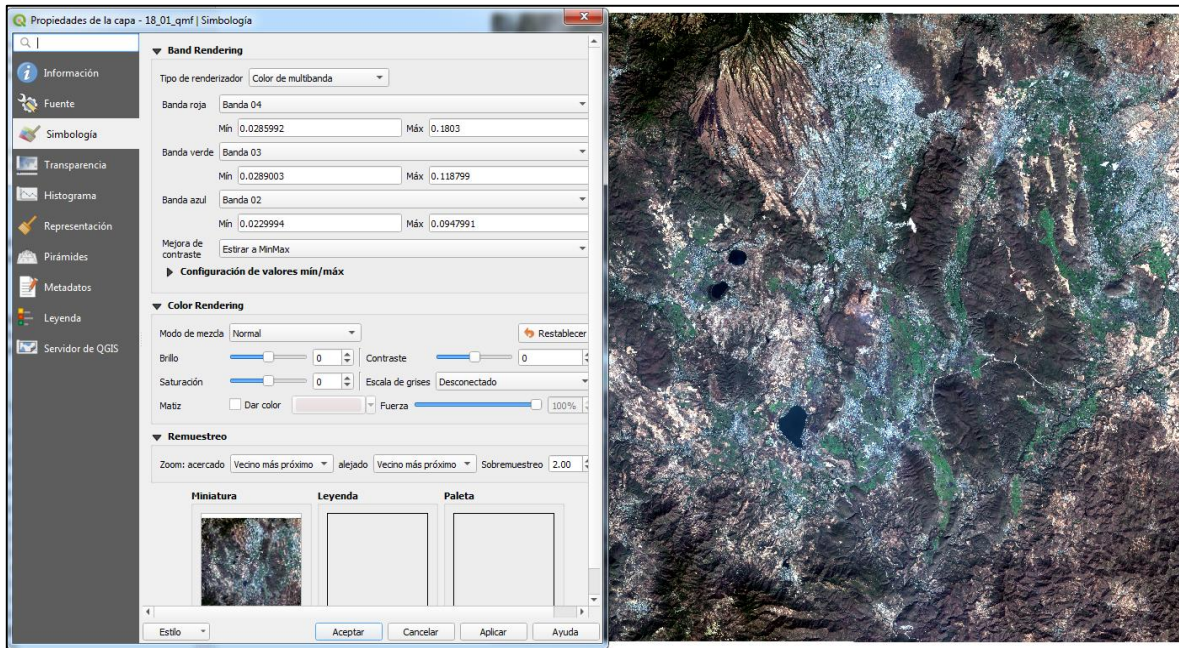
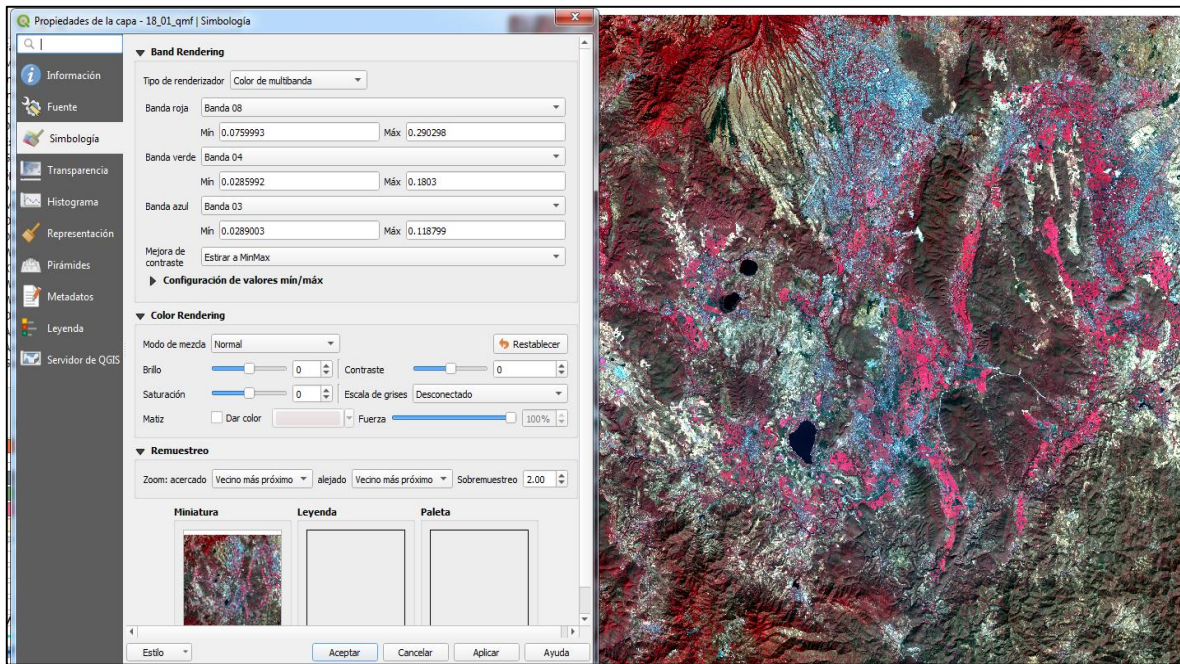


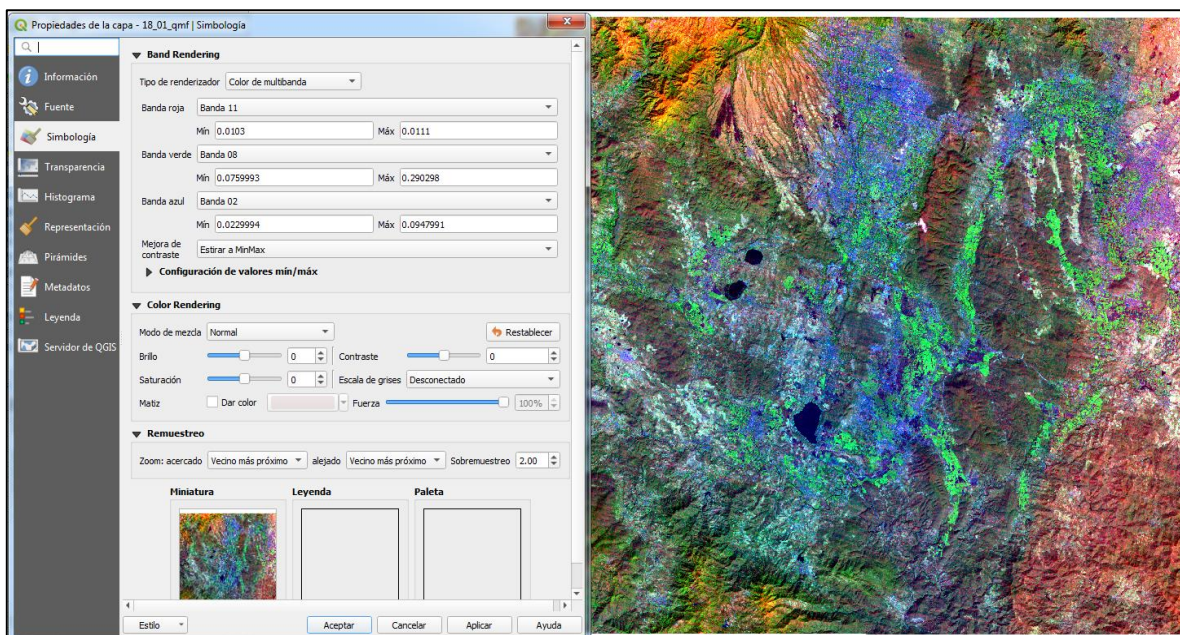
Ilustración 40 Color natural, combinación de bandas (4, 3, 2).

Color natural, en esta combinación de color natural o color verdadero se ilustra la representación de la imagen como se ve a simple vista a ojos humanos utilizando las bandas de luz visible roja (B04), verde (B03) y azul (B02) en sus respectivos canales de color rojo, verde y azul.



*Ilustración 41 Infrarrojo (para vegetación es la combinación de bandas (8, 4, 3).*

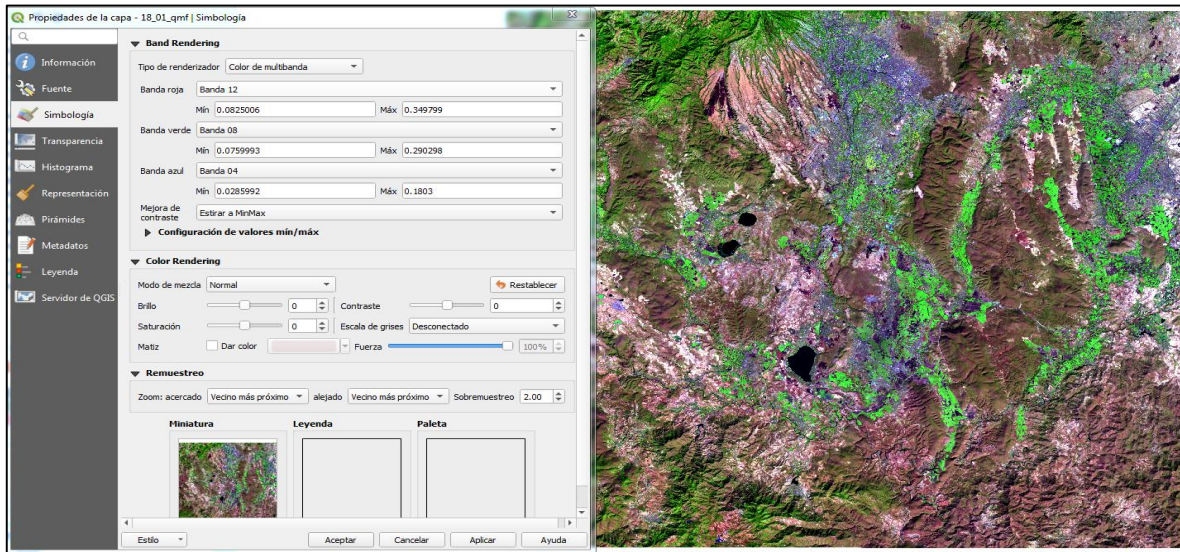
Infrarrojo, en esta combinación de bandas la vegetación se aprecia en color rojo, siendo la banda 8 (NIR) la del infrarrojo cercano la banda multiespectral que hace distinguir la vegetación, en conjunto con la banda roja (B04) y verde (B03). Se utiliza más comúnmente para evaluar la densidad y la salud de las plantas, ya que las plantas reflejan la luz verde e infrarroja cercana, mientras absorben la roja. Dado que reflejan más el infrarrojo cercano que el verde, la tierra cubierta de plantas tiene un color rojo intenso. El crecimiento de plantas más denso es de color rojo más oscuro. Las ciudades y el suelo expuesto son grises o tostados, y el agua parece azul o negra (Sinergise, s. f.-b).



*Ilustración 42 Agricultura es la combinación de bandas (11, 8, 2).*



Agricultura, este compuesto, a menudo llamado compuesto agricultura RGB, utiliza bandas SWIR-1 (B11), infrarrojo cercano (B08) y azul (B02). Se usa principalmente para monitorear la salud de los cultivos, ya que las bandas de onda corta e infrarroja cercana son particularmente buenas para resaltar la vegetación densa, que aparece de color verde oscuro en el compuesto. Las mediciones SWIR pueden ayudar a los científicos a estimar la cantidad de agua presente en las plantas y el suelo, ya que el agua refleja la luz SWIR. Las bandas infrarrojas de onda corta también son útiles para distinguir entre nieve y hielo, todos los cuales aparecen blancos en la luz visible. La tierra recién quemada se refleja fuertemente en las bandas SWIR, lo que las hace valiosas para mapear los daños por incendios, (Sinergise, s. f.-b).



*Ilustración 43 Cuerpos de agua SWIR es la combinación de bandas (12, 8, 4)*

Cuerpos de agua, las bandas de infrarrojos de onda corta (SWIR) 11 y 12 pueden ayudar a los científicos a estimar la cantidad de agua presente en las plantas y el suelo, ya que el agua refleja las longitudes de onda de SWIR. Las bandas de infrarrojos de onda corta también son útiles para distinguir entre tipos de nubes (nubes de agua versus nubes de hielo), nieve y hielo, todos los cuales aparecen blancos en la luz visible. La tierra recién quemada se refleja fuertemente en las bandas SWIR, lo que las hace valiosas para mapear los daños por incendios. Cada tipo de roca refleja la luz infrarroja de onda corta de manera diferente, lo que hace posible trazar un mapa de la geología comparando la luz SWIR reflejada. En este compuesto, B8A se refleja en la vegetación y se muestra en el canal verde, mientras que la banda roja reflejada, que resalta el suelo desnudo y las áreas edificadas, se muestra en el canal azul, (Sinergise, s. f.-b).

#### **5.4.12 Calculadora ráster para índices: NDVI, SAVI, GNDVI y NDWI**

Existe un gran número de índices espectrales que pueden analizar diversos aspectos como la vegetación, los recursos hídricos, la nieve, el suelo, el fuego, entre otros. Los satélites más conocidos como Landsat y Sentinel ofrecen la oportunidad de realizar diversas operaciones con sus bandas, el resultado puede ser convertido en un índice espectral (franzpc, 2019).



El análisis de índices multispectrales se trata principalmente de la combinación de reflectancias de varias bandas, siendo el producto de la suma, multiplicación y división entre las bandas y se basa principalmente en lo que refleja la firma espectral de cada banda por lo que permiten observar y analizar la cubierta dependiendo el estudio que se requiera hacer.

Cada tipo de cobertura presenta una firma espectral típica, directamente relacionada con sus características de composición, geometría, etc., de esta forma, la proporción de luz incidente que es reflejada, absorbida o transmitida depende de las características de la cobertura del suelo y de la longitud de onda analizada.

La firma espectral de la vegetación es condicionada por la presencia de pigmentos, la estructura de la hoja y su contenido en agua, que variará en función de la especie, su estado fenológico y otros factores. En el espectro visible (400-700 nm), los pigmentos fotosintéticos son los que condicionan la respuesta espectral de la vegetación, mientras que en la región del infrarrojo cercano (700-1.350 nm), es la estructura interna de la hoja el factor condicionante, (Díaz García-Cervigón, 2015).

Para el cálculo de índices espectrales se requiere de programas de procesamiento ráster, SIG o cualquier gestor de imágenes ráster o multispectrales, para este trabajo se utilizó una calculadora ráster que se encuentra dentro del programa QGIS y con la cual se pueden realizar diferentes funciones matemáticas, para hacer uso de esta herramienta se debe dar clic sobre el menú **Ráster/ Calculadora ráster**, (Ilustración 44).

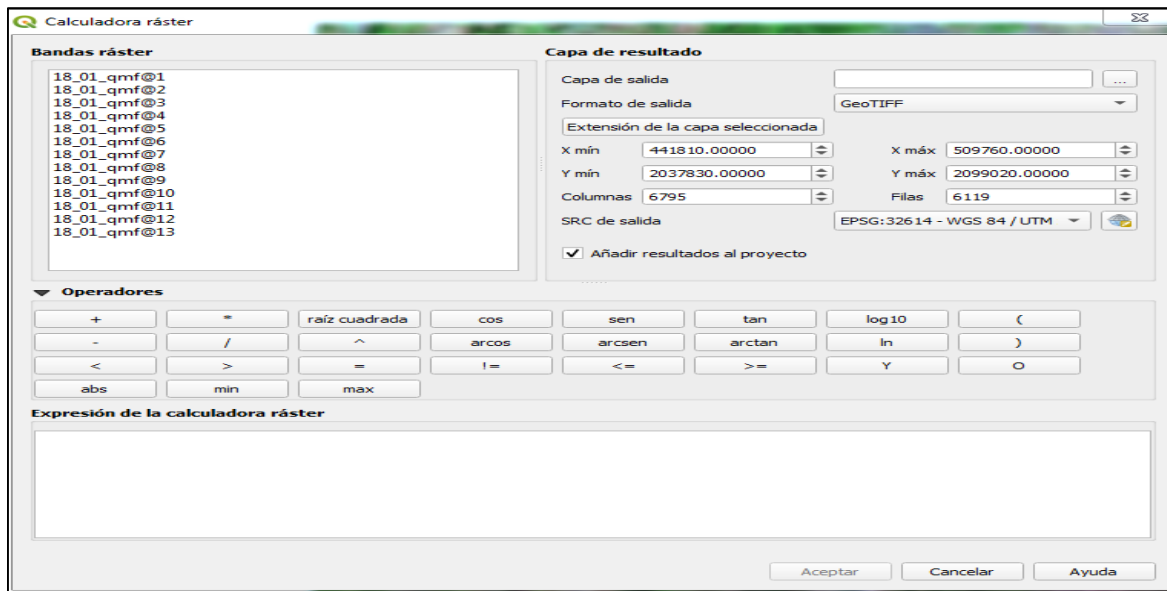


Ilustración 44 Calculadora ráster de QGIS

Los índices utilizados en el presente estudio fueron los siguientes:

### Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta





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

Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica (Ilustración 45). Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas (Díaz García-Cervigón, 2015).

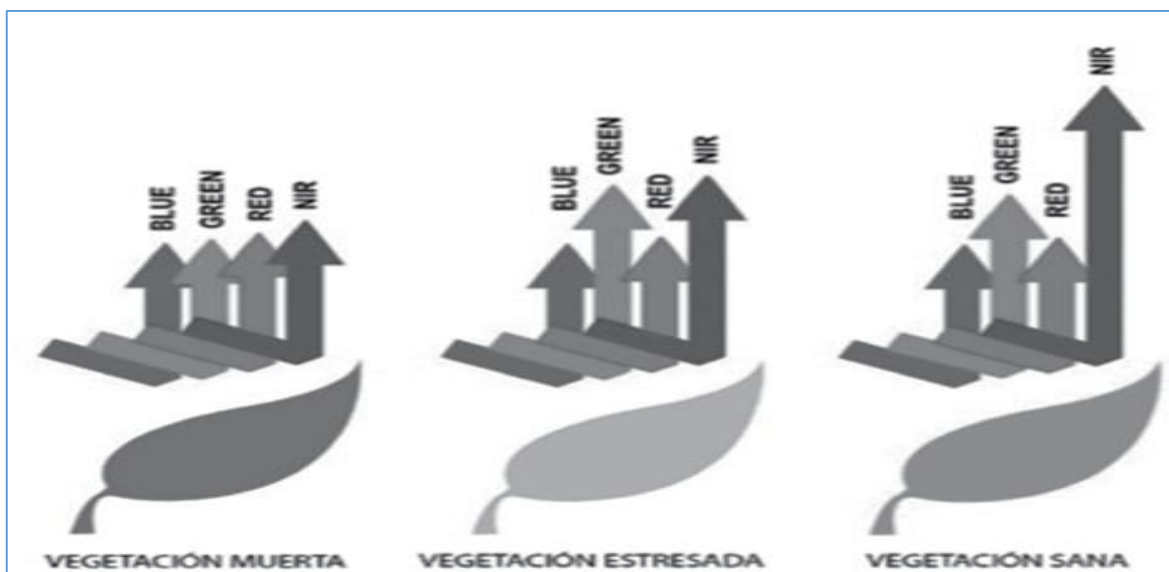


Ilustración 45 Reflectancia de las bandas según la vegetación (González et al., 2016).

Debido a los pigmentos de las hojas, la reflexión de la vegetación es muy baja en el espectro visible, particularmente en la banda roja (0.6–0.7  $\mu\text{m}$ ), mientras que aumenta bruscamente en la banda del infrarrojo cercano (0.7–0.9  $\mu\text{m}$ ). Dado que los suelos desnudos tienen un pequeño espacio de reflectancia entre rojo e infrarrojo cercano, la distinción entre suelo desnudo y cubierto generalmente no es un problema.

Agüera et al., (2013), indica que este índice se encuentra relacionado con la cantidad de Nitrógeno del cultivo, por lo que proporciona una información de gran utilidad a nivel parcela para conocer el estado del cultivo y establecer la aplicación variable apropiada, además de un bajo coste superficial.

La fórmula para su cálculo en el caso de imágenes SENTINEL 2 es:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} = \frac{(B08 - B04)}{(B08 + B04)}$$



La expresión del cálculo del índice NDVI utilizada en la calculadora ráster queda de la siguiente forma:

$$("18\_01\_qmf@8" - "18\_01\_qmf@4" ) / ( "18\_01\_qmf@8" + "18\_01\_qmf@4" )$$

El resultado de la operación algebraica en la calculadora ráster nos dará una nueva imagen (Ilustración 46) en la que podremos analizar los valores del índice obtenido.

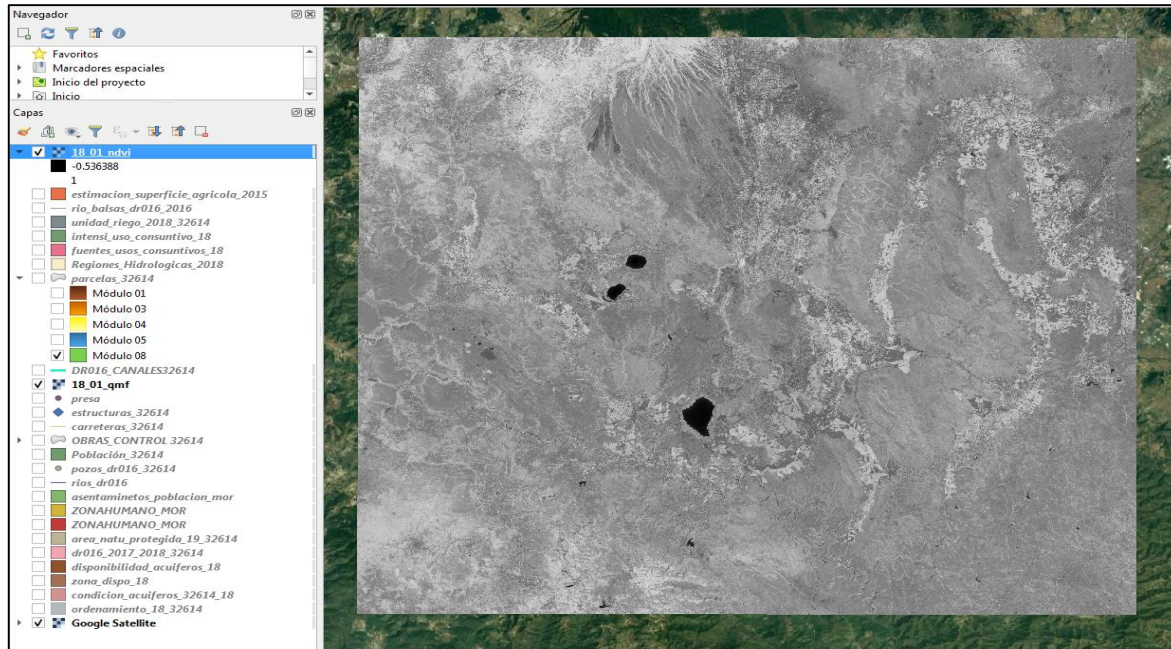


Ilustración 46 Resultado de cálculo de Índice NDVI

El valor del índice varía de -1 a 1, y el programa asigna colores para cada píxel en función de los valores calculados con las reflectancias, generando un mapa de las áreas con la respectiva representatividad de la salud de las plantas. En pocas palabras, una vegetación saludable tendrá un NDVI cercano a 1 y un suelo completamente descubierto o cualquier área sin la presencia de material vegetal tendrá un NDVI de -1 (Berrenchea, 2020), para mayor referencia ver Ilustración 47.

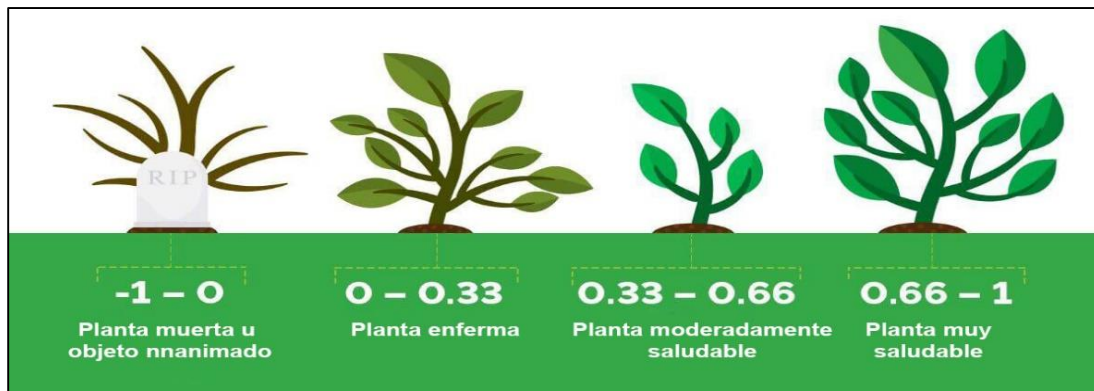


Ilustración 47 El valor del índice varía de -1 a 1, y el programa asigna colores para cada píxel en función de los valores calculados con las reflectancias, (Berrenchea, 2020).



Ya calculado el índice en la calculadora ráster se debe presentar como un mapa de colores, donde cada color debe representar un rango de valores para poder distinguir la cobertura y en este caso la salud de las plantas, para el presente estudio a todas las imágenes satelitales se les dio la misma paleta de colores que es rojo y verde, colocando el color verde para vegetación sana y el color rojo para vegetación muerta, lo que significa que los contrastes generados entre ambos colores se distribuyen entre color naranja y amarillo para vegetación enferma y los tonos de verde para vegetación moderadamente saludable como se puede observar en la Ilustración 48.

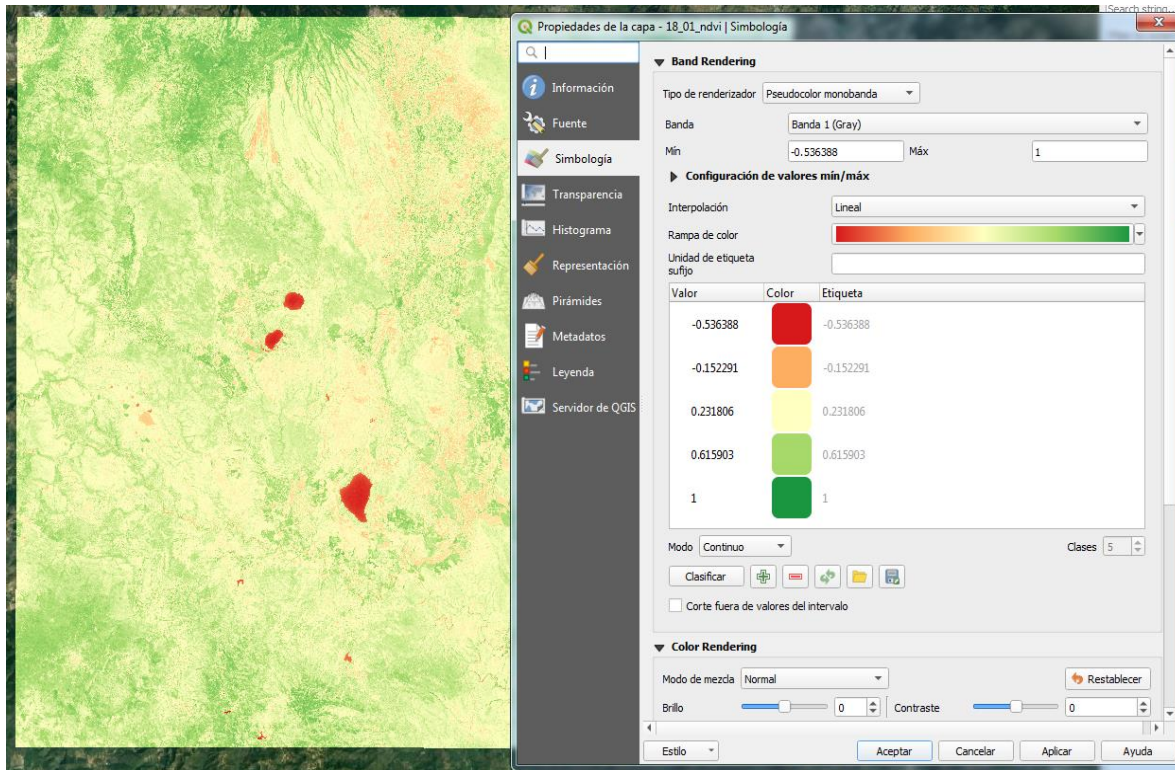


Ilustración 48 Presentación en mapa de colores para análisis de NDVI

Algunos autores indican que el NDVI cuenta con algunas limitaciones, presentando en algunos casos el índice es influenciado por factores ajenos a la vegetación y que llegan a interferir en un buen análisis metiendo cierto ruido en los valores obtenidos, algunas circunstancias que pueden interferir en la interpretación de los resultados son: cultivos que se encuentren inundados a la hora de tomar la imagen el satélite, cierto tipos de plantas, cuando la vegetación se encuentra en crecimiento u no hay vegetación continua, (gisadminbeers, 2020) menciona por ejemplo que un rojo y tupido campo de amapolas presenta buena cobertura vegetal pero tu NDVI lo reconocerá como suelo desnudo o con escaso crecimiento vegetal debido a la presencia de la floración. Campos de tulipanes o cultivos de almendros y cerezos son algunos ejemplos de malos amigos del NDVI.

### Índice de Vegetación Ajustada del Suelo (SAVI)

El índice SAVI muestra una ligera variante respecto a la fórmula tradicional del NDVI para evitarte distorsiones en los valores de análisis cuando la vegetación se encuentra sobre suelos expuestos. Condiciones como la temperatura o la humedad pueden ejercer influencia en las



bandas de trabajo analizadas y, por tanto, en los resultados ofrecidos por el indicador. En este caso, el índice de vegetación SAVI tratará de evitar esta influencia del suelo sobre los resultados añadiendo un factor adicional (L) en la ecuación del NDVI que permitirá trabajar en escenarios donde el desarrollo vegetal sea incipiente (gisadminbeers, 2019).

La fórmula para su cálculo en el caso de imágenes SENTINEL 2 es:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} \times (1 + L) = \frac{(B08 - B04)}{(B08 + B04 + L)} \times (1 + L)$$

En este caso, el factor L es encargado de amortiguar la presencia del suelo a través de valores comprendidos entre 0 (para zonas con gran densidad vegetal) y 1 (para zonas con escasa densidad vegetal). De esta forma, ante suelos con presencia de desarrollo vegetativo, el factor L pasa a valor 0, inalterando la ecuación y haciéndola equivalente a la ecuación del NDVI. Cuando exista vegetación en desarrollo con influencia de exposición del suelo, el factor L pasa a valor 1, amortiguando el índice inicial NDVI. Suelos medianamente expuestos adoptarán un valor de factor L igual a 0,5 por defecto (gisadminbeers, 2019).

Huete (1988), encontró que el factor de ajuste de  $L = 0.5$  reduce sustancialmente los problemas de ruido del suelo para una amplia gama de valores, sin embargo, de igual forma detalla en el estudio realizado que el factor de ajuste ideal no permanece constante porque la naturaleza de las interacciones suelo-vegetación varía con el cierre de la cubierta. A bajas densidades, hay poca interacción entre el suelo y la vegetación, ya que la penetración del rojo y del infrarrojo cercano a través del dosel es casi igual, y la mayor parte del flujo que llega a la superficie del suelo procede de la irradiación directa del sol y del cielo. El suelo y la vegetación se comportan como componentes aditivos que hacen que los índices ortogonales, con isolíneas paralelas, sean los mejores predictores del comportamiento del suelo y la vegetación.

La expresión del cálculo del índice SAVI utilizada en la calculadora ráster queda de la siguiente forma:

$$("18\_01\_qmf@8" - "18\_01\_qmf@4") / ("18\_01\_qmf@8" + "18\_01\_qmf@4" + 0.5) * (1.5)$$

El resultado de la operación algebraica en la calculadora ráster nos dará una nueva imagen (Ilustración 49) en la que podremos analizar los valores del índice obtenido presentados en un mapa de colores, utilizando la Pseudocolor monobanda, en una rampa de colores rojo y verde, indicando el rojo para los valores más bajos y el verde para los valores más altos.

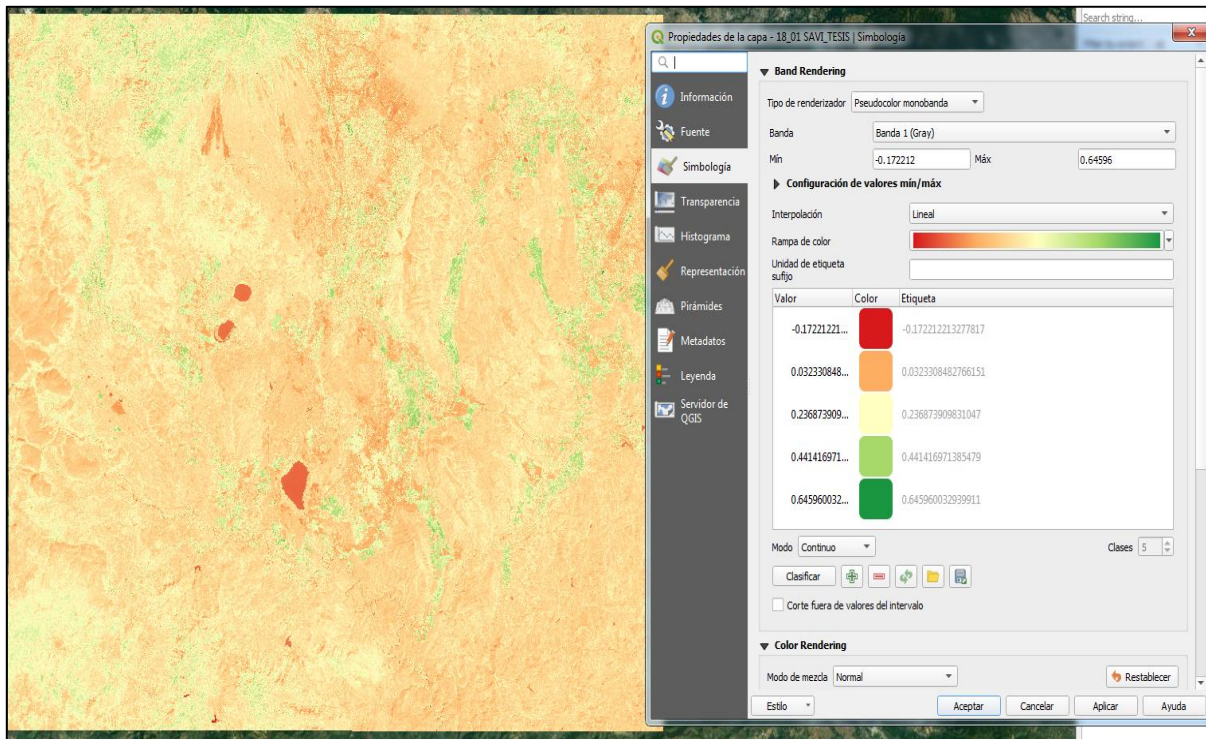


Ilustración 49 Presentación en mapa de colores para análisis de SAVI

Vani et al. (2017), indica en los resultados de su estudio al comparar los índices NDVI y SAVI que el factor de suelo de 0.2, 0.5 y 0.9 era comparable al resultado del NDVI cuando el 0.5 se adapta mejor a la vegetación y el 0.9 es el factor de suelo más adecuado para la tierra donde la influencia del suelo es mayor. El SAVI es el índice de vegetación más adecuado en las zonas semiáridas.

### Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

A través del cálculo del índice NDWI podemos identificar masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad por medio del análisis de imágenes satélite. De esta forma podemos emplear el índice como unidad de medida para determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses (Roberto, 2017).

Existen diferentes vertientes respecto al cálculo de este índice dependiendo del tipo de bandas a utilizar, entre los métodos más conocidos encontramos el Gao 1996, el cual utiliza las bandas NIR y SWIR, el método Xu 2006, el cual utiliza las bandas GREEN y SWIR, y el método utilizado para este trabajo McFeeters 1996 que utiliza las bandas GREEN y NIR para resaltar los cuerpos de agua.

Diferentes fuentes como (Sinergise, s. f.-a), ( McFeeters, 1996 ), ( Huang et al., 2015) indican que este índice es sensible a la tierra edificada y puede resultar en una sobreestimación de las masas de agua en el caso de realizar el cálculo en zonas urbanas, sin embargo se obtuvieron buenos resultados en este trabajo, realizando comparaciones con lo diferentes índices aquí mencionados.



La fórmula para su cálculo en el caso de imágenes SENTINEL 2 es:

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} = \frac{(B03 - B08)}{(B03 + B08)}$$

La relación entre bandas permite maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de ondas en el verde, maximiza la reflectancia de la vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias al NIR (Roberto, 2017).

La expresión del cálculo del índice NDWI utilizada en la calculadora ráster es la siguiente:

$$("18\_01\_qmf@3" - "18\_01\_qmf@8") / ("18\_01\_qmf@3" + "18\_01\_qmf@8")$$

El resultado de la operación algebraica en la calculadora ráster nos dará una nueva imagen (Ilustración 50) en la que podremos analizar los valores del índice obtenido presentados en un mapa de colores, utilizando la Pseudocolor monobanda, en una rampa de colores rojo y verde, indicando el rojo para los valores más bajos y el verde para los valores más altos.

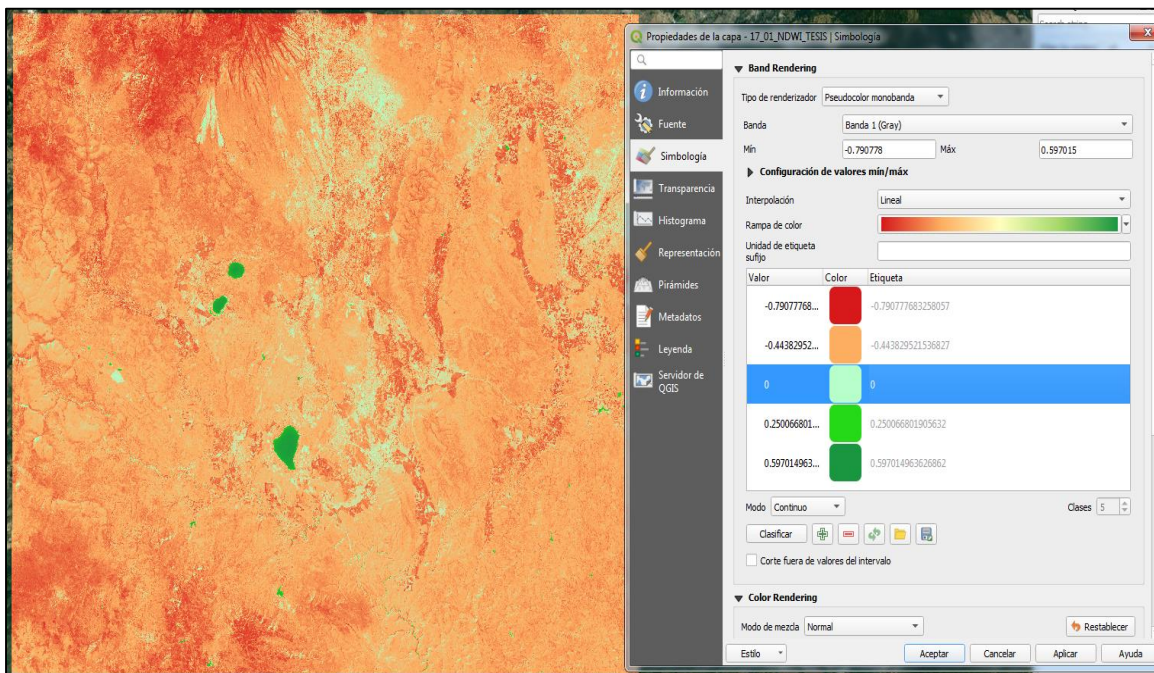


Ilustración 50 Presentación en mapa de colores para análisis de NDWI

Sánchez-Ruíz *et al.* (2014), agrega que el NDWI es un índice que se ha empleado en diversos estudios para determinar la humedad del suelo y de la vegetación; demostrando que la viabilidad de los índices con la banda SWIR para desglosar observaciones humedad del suelo y vegetación es debido a los efectos de absorción de agua en esta banda por estas coberturas

Feyisa *et al.* (2014), indica que un análisis de subpíxeles de errores en los bordes de cuerpos de agua reveló que el clasificador AWEI era relativamente más preciso en la clasificación de píxeles de borde en comparación con los métodos de clasificación MNDWI y ML. Además, se demostró que el umbral óptimo de AWEI era menos variable con imágenes de diferentes



ubicaciones y tiempos en comparación con el de MNDWI. Por lo tanto, AWEI se propone como un índice de agua alternativo y mejorado, especialmente en la extracción de información de agua de áreas donde se esperan resultados ruidosos debido a la presencia de sombras y superficies edificadas. Este nuevo método también sería adecuado para estudios de detección de cambios en el agua superficial, ya que clasifica los píxeles de borde con alta precisión y con un umbral estable.

### Índice de Vegetación de Diferencia Verde Normalizada (GNDVI):

El Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) es una versión modificada del NDVI para que sea más sensible a la variación del contenido de clorofila en el cultivo. “Los valores más altos de correlación con el contenido de la hoja N y DM se obtuvieron con el índice GNDVI en todos los períodos de adquisición de datos y en ambas fases experimentales. ... GNDVI fue más sensato que NDVI para identificar diferentes tasas de concentración de clorofila, que está altamente correlacionada con el nitrógeno, en dos especies de plantas” (Gitelson et al. 1996).

$$\text{GNDVI (Sentinel 2)} = (\text{B08} - \text{B03}) / (\text{B08} + \text{B03})$$

La expresión del cálculo del índice GNDVI utilizada en la calculadora ráster es la siguiente:

$$(\text{"clip\_B8@1"} - \text{"clip\_B3@1"}) / (\text{"clip\_B8@1"} + \text{"clip\_B3@1"})$$

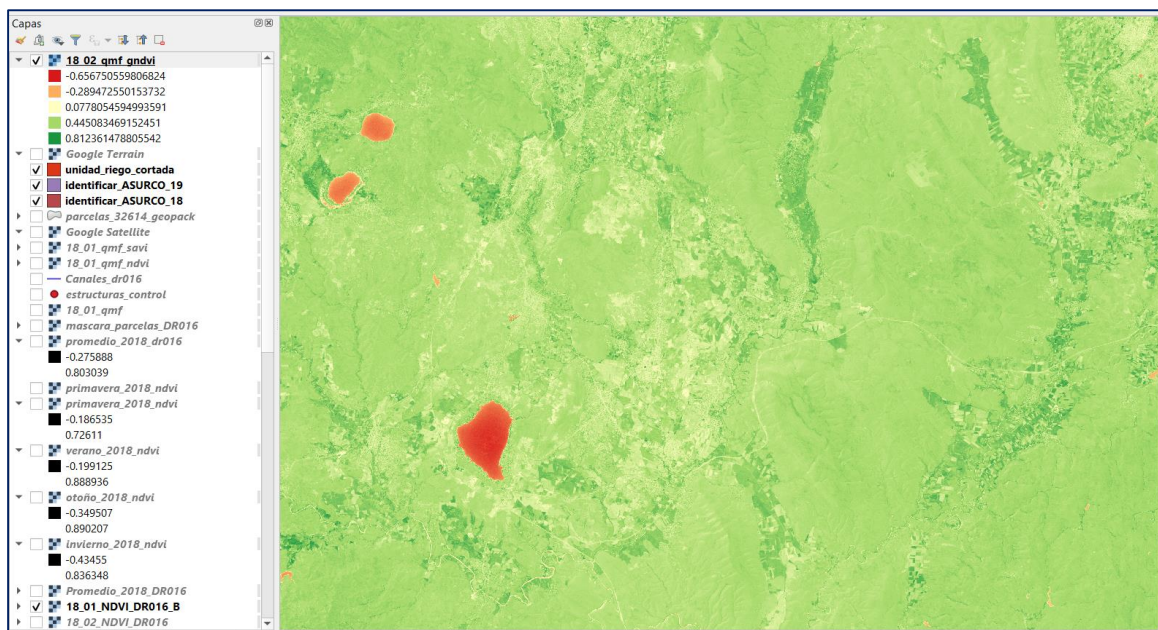


Ilustración 51 Presentación en mapa de colores para análisis de GNDVI

Con estos índices podemos estudiar lo siguiente:

- **Realizar inventariado de áreas cultivadas:** debido a que la observación aérea ha sido siempre una herramienta potente para la generación de inventario de cultivos
- **Determinar el estado de los cultivos:** determinar a partir del valor de los índices momentos críticos del ciclo fenológico de las plantas y proceder a la aplicación de medidas correctoras.



- **Informe de Vigor Vegetativo:** el vigor vegetativo, permite discernir las zonas que son más productivas y que constan de una elevada actividad fotosintética y de zonas que las condiciones están deteriorando y mermando el cultivo.
- **Estrés Hídrico e Informe de riego:** la capa estrés hídrico permite identificar zonas donde la planta haya podido sufrir debido a las necesidades hídricas bien por falta de riego, encharcamientos o tipo de suelo, así como la homogeneidad del riego.
- **Abonado de Fondo:** a través de la clorofila podemos conocer el contenido de nitrógeno foliar y comprobar la homogeneidad de la aplicación de abono identificando las distintas necesidades existentes en cada zona de la parcela.
- **Detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos:** a partir de imágenes multiespectrales, detectando así el stress en la vegetación producido por la presencia de plagas y enfermedades, generándose mapas diversos, que nos permiten detectar procesos en los cultivos en forma focalizada, así como dimensionar el problema y evaluarlo en forma puntual.
- **Controles en cultivos,** mediante **monitorización del estado de los cultivos** durante su ciclo fenológico, a partir de imágenes multiespectrales.
- **Chequeos de vegetación:** mediante la determinación de los principales índices de calidad de un cultivo, esto nos ayudara a la toma de decisiones respecto al uso de fertilizantes.
- **Evaluación de daños en los cultivos:** mediante la interpretación de los índices se puede ver el avance de daños debido a fenómenos atmosféricos o climatológicos. Daños por heladas, inundaciones, sequías, incendios, deforestación, etc.
- **Medir superficies de agua:** a partir de índices se puede medir las superficies con agua calcular la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo

Se establecieron puntos de control que nos permitiera visualizar el comportamiento con los diferentes índices calculados y analizar la correlación existente entre estos índices y las combinaciones de bandas RGB usadas, encontrando que el análisis de los resultados es muy similar, determinando así su confiabilidad ya que los datos obtenidos no fueron corroborados en campo.

#### 5.4.13 Extracción por Mascara

Para trabajar de una manera más objetiva, se extrajo la sección correspondiente del Distrito de Riego 016 manteniendo las propiedades de los índices calculados anteriormente, para realizar esta tarea primero debemos extraer la máscara del área delimitada por un shape, para lo cual haremos uso del shape distrito parcelas dr016.shp uniendo todas las capas y editando la tabla de atributos de la máscara, añadiendo un campo (parcelas 20) que contendrá el valor que deseamos modificar a las celdas del *MDT*, en este caso será 1, ya que vamos a multiplicar por 1 el valor de los índices para mantener los valores de los índices en el área del distrito de riego 016.

Como, no nos interesa modificar el valor del resto de las áreas que se encuentran fuera del distrito de riego 016 se otorga el valor '0' al polígono que representa los límites del *MDT*, de este modo al realizar la multiplicación estas áreas se quedarán sin valor y por lo tanto no afectarán las estadísticas de los índices que se tienen delimitados por el distrito **y se deberá transformar el shape a formato raster para así poder realizar la multiplicación.**



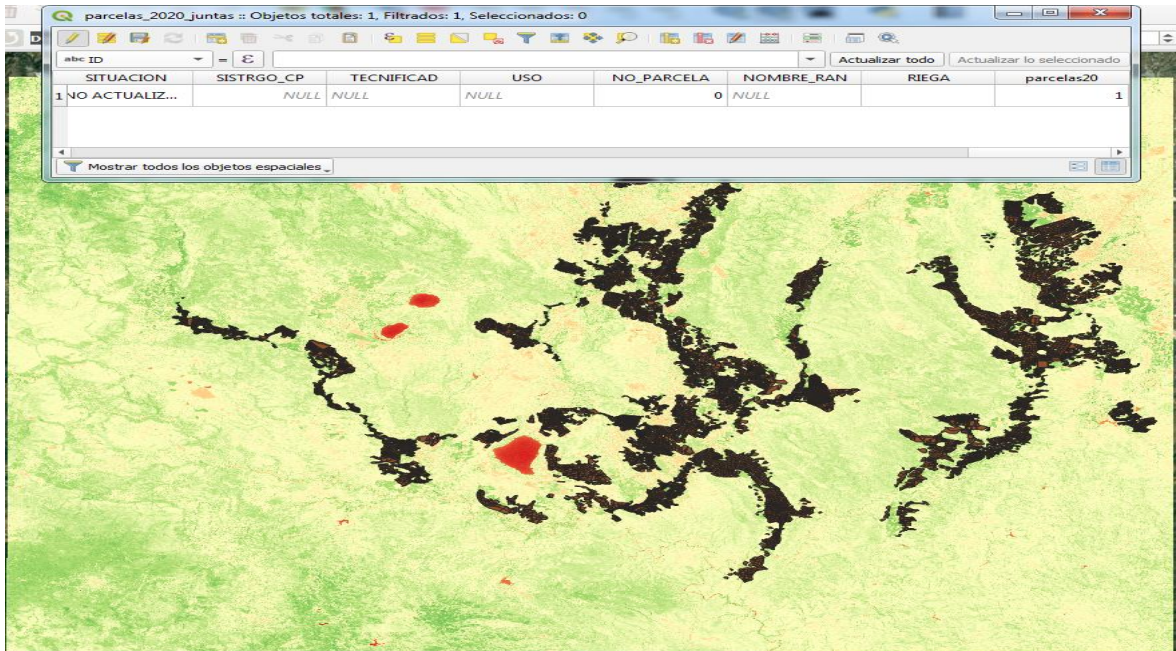


Ilustración 52 Unificación de capa y asignación de valores para extraer la capa a trabajar

El resultado de la aplicación de la máscara sería el siguiente, máscara del distrito de riego 016 (Ilustración 53):

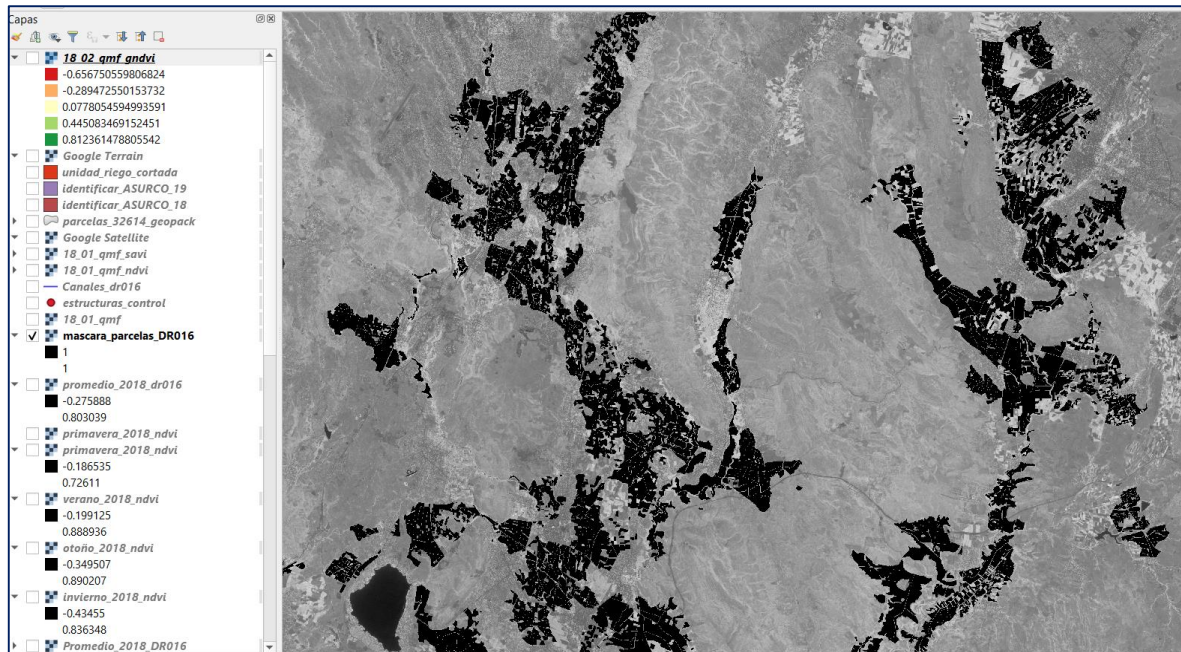


Ilustración 53 Resultado de la aplicación de la máscara de las parcelas

Una vez obtenida la máscara de las parcelas se utilizó para obtener únicamente los valores de los índices del módulo de riego ASURCO, y así poder tener un análisis más detallado, los resultados fueron transformados a formato vectorial en formato SHP. Para ello, los valores individuales de celda se agruparon en rangos representativos mediante el clasificador estadístico y así obtener los índices de cada parcela de manera individual y por cada mes.



## 5.5 Resultados de la obtención de datos y análisis digital

### 5.5.1 Análisis y caracterización con datos obtenidos por internet e instituciones

A partir de internet se obtuvo información digitalizada del módulo de riego General Eufemio Zapata Salazar, A.C, planos, estaciones, infraestructura (presas, canales, estructuras de control, etc.), parcelas, modelos, etc.

En México hay diversas instituciones que ofrecen diversa información digitalizada, a fin de poner a disposición datos históricos que pueden ser descargados, para este trabajo se descargó información contenida en las siguientes fuentes:

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

En la siguiente tabla, se desglosa toda la información recopilada de las diferentes fuentes antes mencionadas:

Tabla 12 Información digital referente al análisis de Distritos de Riego

Información Digital	Año	Fuente	Formato	Paginas
Uso de suelo	2017	INEGI	SHP- GEOPACK	<a href="https://www.inegi.org.mx/temas/uso_suelo/default.html#Descargas">https://www.inegi.org.mx/temas/uso_suelo/default.html#Descargas</a>
Cobertura del suelo de México a 30 metros, 2010	2010	CONA BIO	SHP GEOPACK	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>
Distritos de Riego 2017-2018	2017- 2018	SINA	SHP GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosriego&amp;ver=mapa&amp;o=1&amp;n=nacional">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosriego&amp;ver=mapa&amp;o=1&amp;n=nacional</a>
Unidad de riego 2018-2019	2017- 2019	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosriego&amp;ver=mapa&amp;o=1&amp;n=nacional">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosriego&amp;ver=mapa&amp;o=1&amp;n=nacional</a>
Estaciones_climatologicas_operando_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog</a>



Información Digital	Año	Fuente	Formato	Páginas
Estaciones_Climatologicas_2017	2017	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog</a>
Precipitacion_pluvial_anual_simplificado_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog</a>
Precipitacion_normal_light_1981-2010	1981-2010	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog</a>
Zonas_disponibilidad_acuifero_2018	2018	SINA	SHP - GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&amp;ver=mapa&amp;o=0&amp;n=nacional">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&amp;ver=mapa&amp;o=0&amp;n=nacional</a>
Condiciones de Acuíferos 2018	2018	SINA	SHP - GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&amp;ver=mapa&amp;o=0&amp;n=nacional">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&amp;ver=mapa&amp;o=0&amp;n=nacional</a>
Ordenamientos aguas subterráneas	2018	SINA	SHP - GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&amp;ver=mapa&amp;o=0&amp;n=nacional">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&amp;ver=mapa&amp;o=0&amp;n=nacional</a>
Cuencas_Disponibilidad_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa</a>
Ordenamientos_superficiales_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa</a>
Ordenamientos_superficiales_vedas_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa</a>
Zonas_pago_derecho_cuenca_2018	2019	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&amp;ver=mapa</a>
Presas_principales_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=presasPrincipales&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=presasPrincipales&amp;ver=mapa</a>
Regiones_Hidrologicas_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=divisionHidrologicaAdministrativa&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=divisionHidrologicaAdministrativa&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog</a>
Fuente_usos_consuntivos_estado_2018	2018	SINA	SHP-GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&amp;ver=mapa#&amp;ui-state=dialog</a>
Intensidad_usos_consuntivos_estado_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&amp;ver=mapa&amp;o=1&amp;n=nacional">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&amp;ver=mapa&amp;o=1&amp;n=nacional</a>



Información Digital	Año	Fuente	Formato	Paginas
Rios_principales_2016	2016	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=riosPrincipales&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=riosPrincipales&amp;ver=mapa</a>
Sequia_Enero_diciembre_2018	2018	SINA	GEOPACK	<a href="http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=sequias&amp;ver=mapa">http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=sequias&amp;ver=mapa</a>
Áreas Naturales Protegidas Federales de la República Mexicana.	08/10 /2018	CONA NP	SHP - GEOPACK	<a href="http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm">http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm</a>
Tasa de crecimiento anual de la producción de los cultivos perennes de riego por municipio.	2003 a 2013	CONA BIO	SHP - GEOPACK	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>
Tasa de crecimiento promedio anual de las cosechas perennes de riego por municipio.	2005 a 2013	CONA BIO	SHP - GEOPACK	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a>
Estimación de superficie agrícola de maíz, frijol, sorgo grano y trigo grano para el ciclo primavera - verano de Morelos	2015	SIAP	SHP - GEOPACK	<a href="https://datos.gob.mx/busca/dataset?organization=ran&amp;theme=Geoespacial">https://datos.gob.mx/busca/dataset?organization=ran&amp;theme=Geoespacial</a>

Una vez descargados los datos y re proyectados al sistema de información geográfica utilizado en el presente trabajo, se procedió a observar y analizar cada capa con ayuda del software QGIS, generando mapas que enriquecen la caracterización del módulo de riego estudiado, permitiendo obtener algunos criterios importantes que ayudan en la toma de decisiones, de los mapas más representativos de la zona de estudio con la información obtenida por internet se encuentran los siguientes:

**Cuencas disponibilidad 2018:** es una capa que proporciona un mapa de la disponibilidad de agua en las 757 cuencas hidrológicas en el año 2018. La información contenida en esta capa no presenta cambios en la disponibilidad de agua en cuencas a diciembre de 2017. El conjunto de datos vectoriales de la disponibilidad de cuencas 2018, representa digitalmente mediante polígonos la disponibilidad de cuencas hidrológicas en 2018, El módulo de riego 08 General Eufemio Zapata Salazar, A.C. Se encuentra en la Cuenca del Río Amacuzac (Ilustración 54), indicando una clasificación: sin disponibilidad, con un volumen disponible de -300.395 hm<sup>3</sup>, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de julio de 2016.

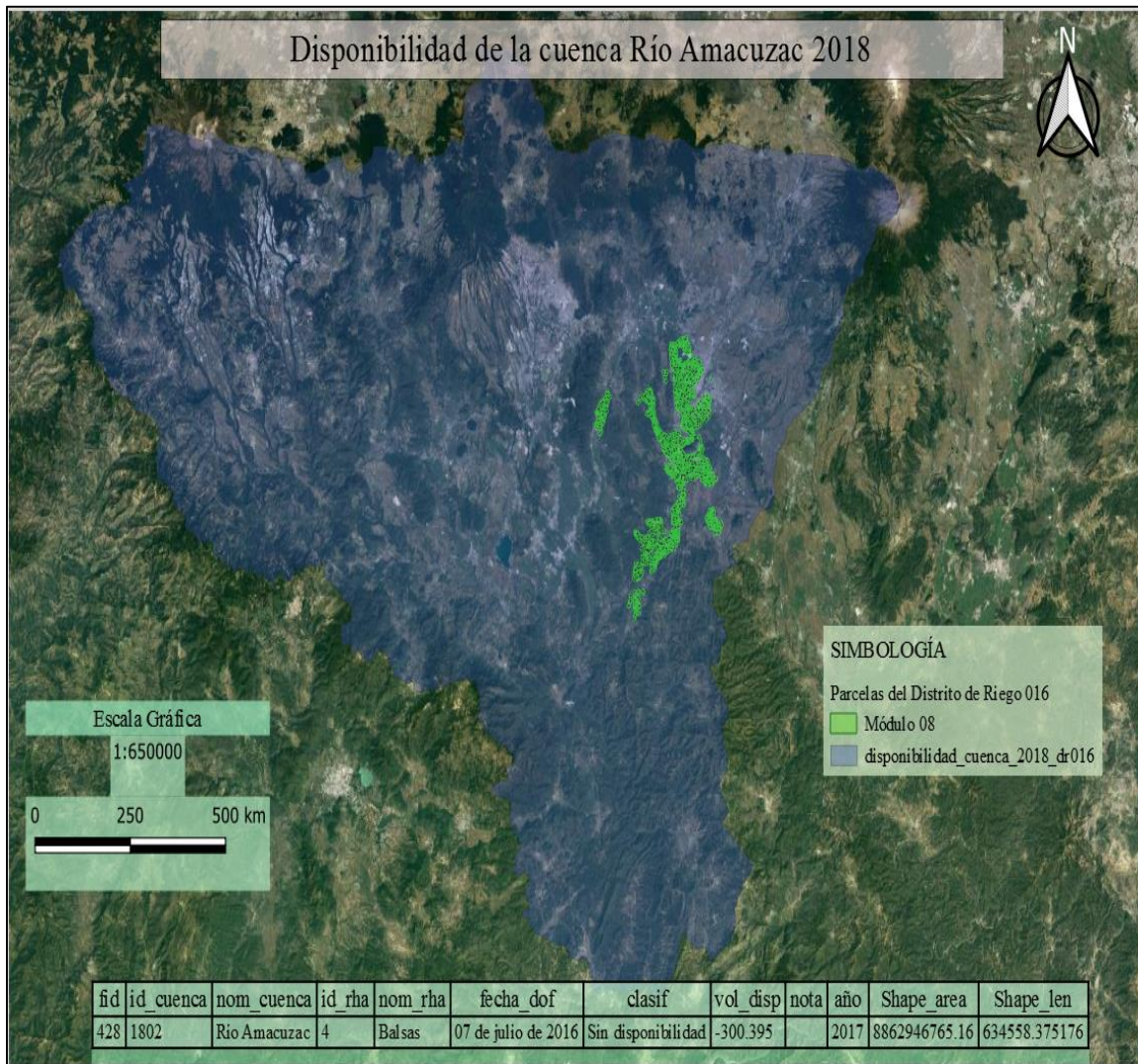


Ilustración 54 Disponibilidad de cuenca del río Amacuzac 2018

**Zonas de pago de derechos de agua superficial 2018** (Ilustración 55): es una capa que proporciona un mapa con las zonas de pago de derechos de agua superficial en las 757 cuencas de México, en el año 2018.

El conjunto de datos vectoriales de las Zonas de pago de derechos de agua superficial 2018 representa digitalmente mediante polígonos la delimitación de las zonas de disponibilidad para el cobro de derechos de aguas superficiales a la que corresponde cada cuenca en 2018, para el caso del agua para el uso agropecuario se pagará 18.37 centavos por cada m<sup>3</sup> que exceda del concesionado.

Además, se agregó la capa de **“Estaciones Climatológicas Operando a 2018”**, la cual representa digitalmente mediante puntos la ubicación de las estaciones climatológicas convencionales y observatorios climatológicos instalados a lo largo del territorio mexicano que estuvieron activos durante el año 2018.

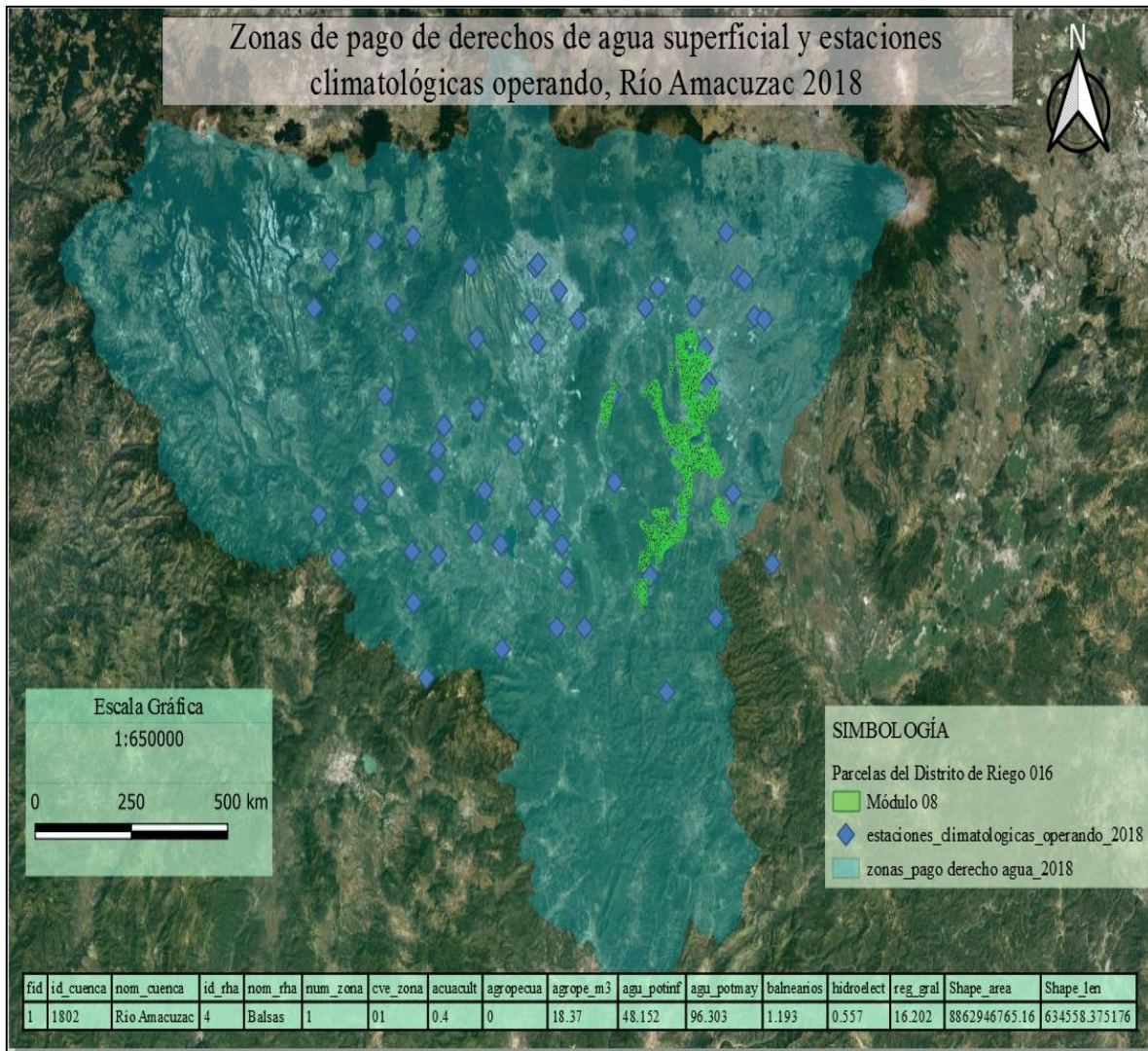
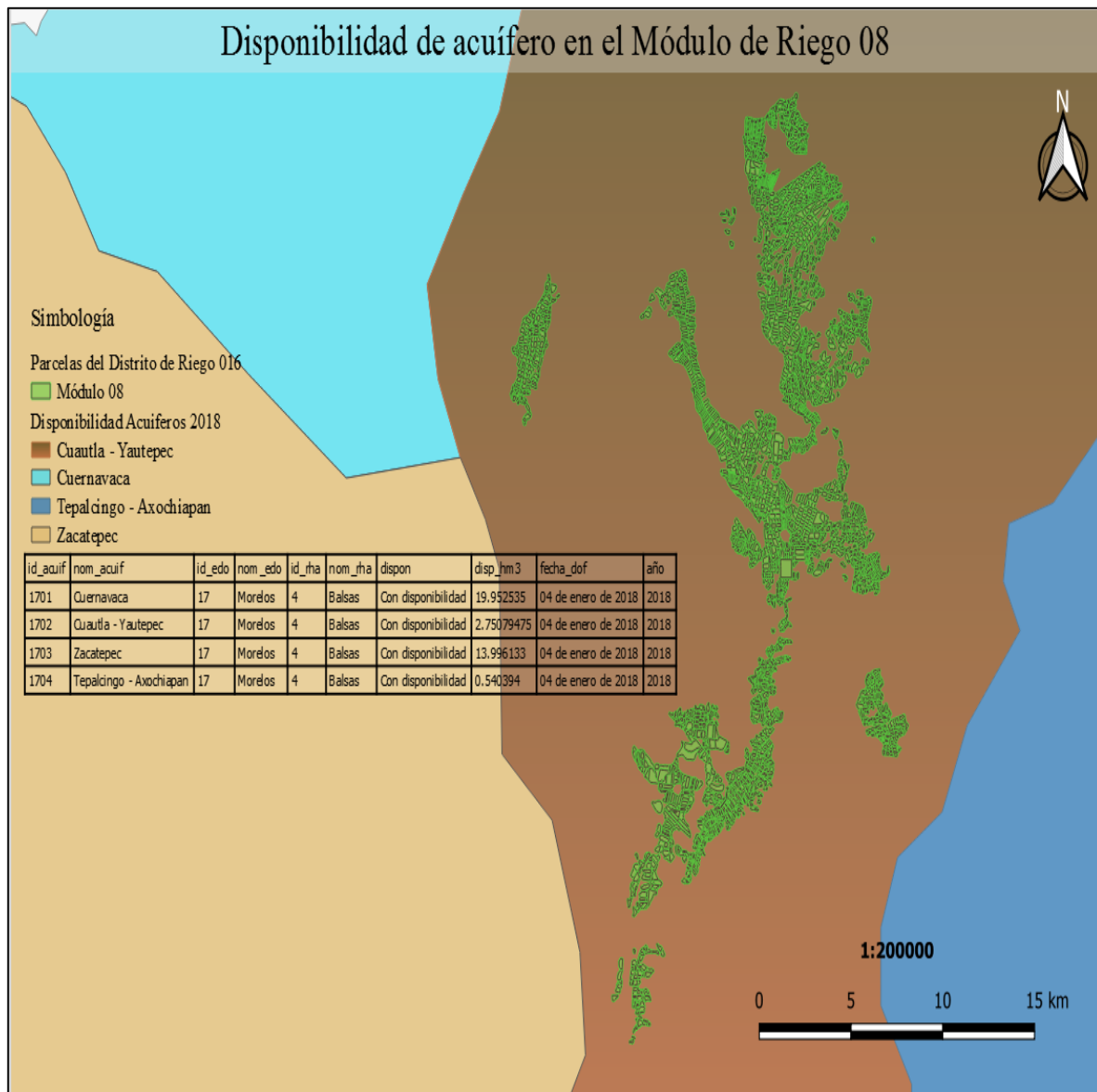


Ilustración 55 Zonas de pago de derechos de agua superficial y estaciones climatológicas operando 2018.

**Disponibilidad de acuíferos en el módulo de riego 08:** es una capa que proporciona un mapa con la disponibilidad de los 653 acuíferos en el año 2018.

El conjunto de datos vectoriales de la disponibilidad de acuíferos 2018, representa digitalmente mediante polígonos la disponibilidad de las aguas subterráneas, es decir de los acuíferos en el año 2018. El módulo de riego 08 General Eufemio Zapata Salazar, A.C. se encuentra en el acuífero número 1702, de nombré Cuautla - Yautepec (Ilustración 56), indicando una clasificación: con disponibilidad, con un volumen disponible de **2.7508 hm<sup>3</sup>**, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 4 de enero de 2018.



*Ilustración 56 Disponibilidad de acuíferos en el módulo de riego 08.*

**Ordenamiento de aguas subterráneas 2018:** es una capa que proporciona un mapa con los tipos de ordenamientos subterráneos vigentes en el año 2018.

El conjunto de datos vectoriales del ordenamiento de aguas subterráneas 2018, representa digitalmente mediante polígonos el tipo de ordenamiento de agua subterránea que posee cada acuífero en 2018. El módulo de riego 08 General Eufemio Zapata Salazar, A.C. se encuentra dentro del ordenamiento Distrito de Riego No. 16 Edo. De Morelos (Ilustración 57), el cual cuenta con un decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites del Distrito de Riego número 16, del Estado de Morelos.

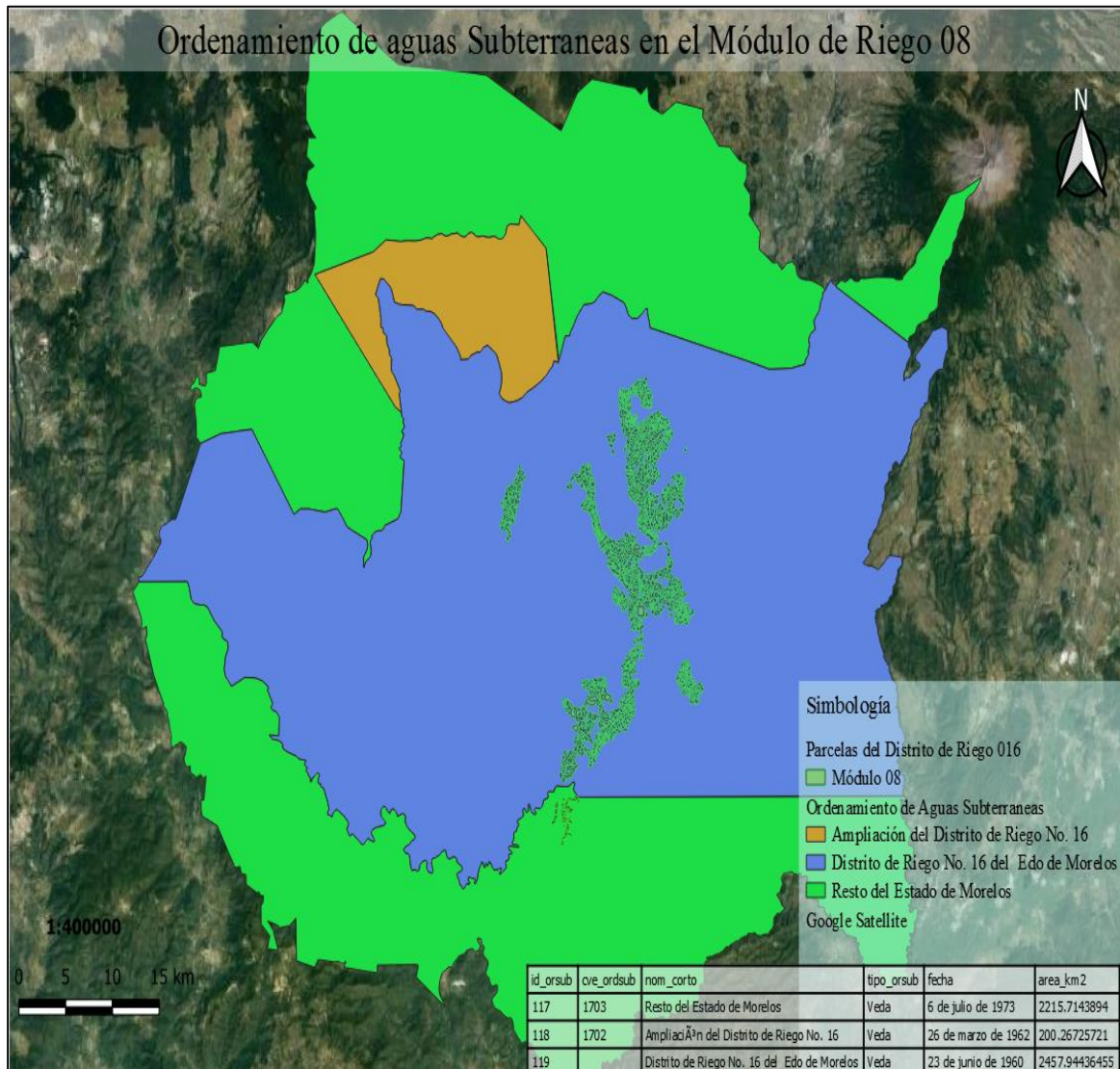
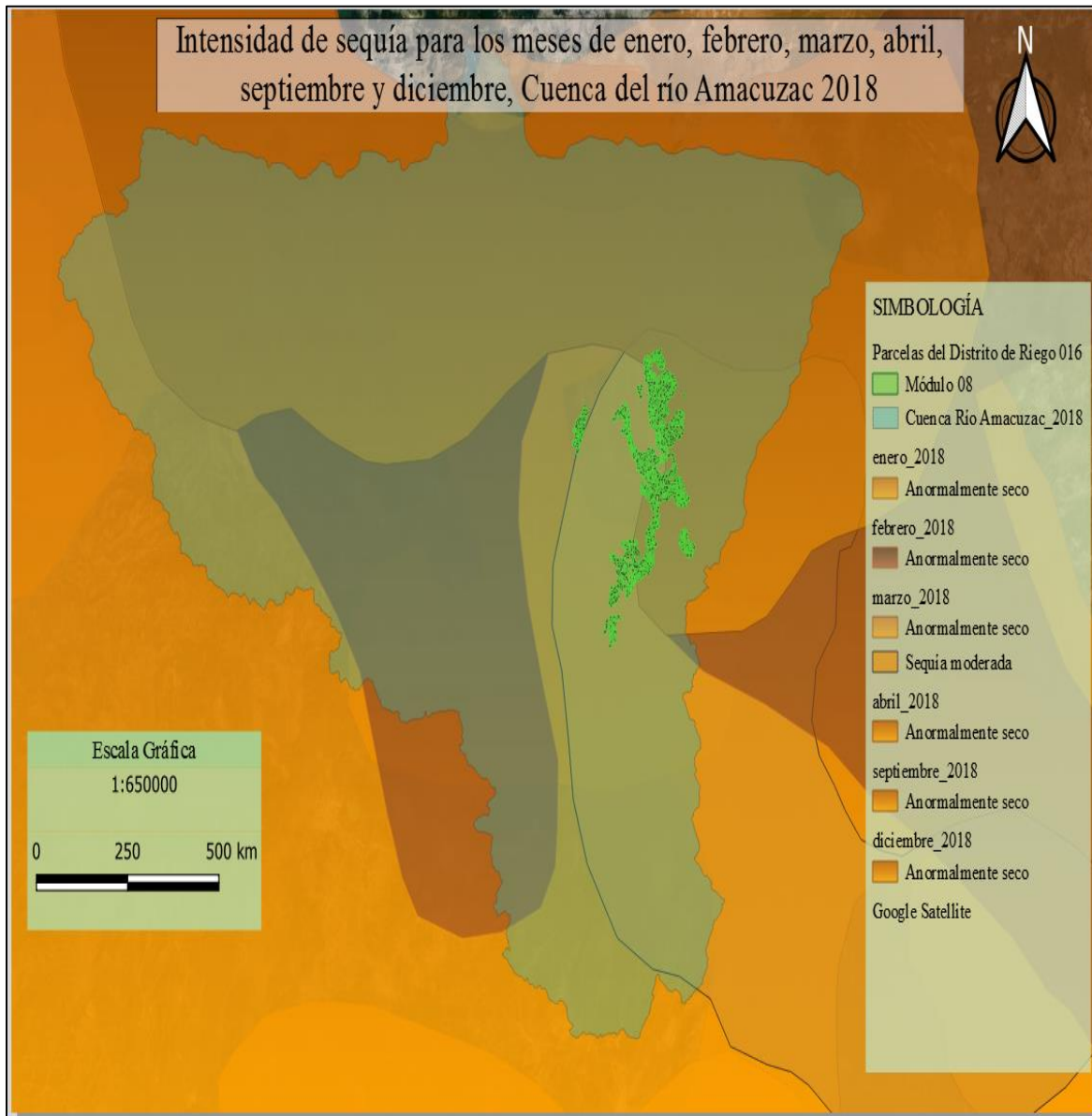


Ilustración 57 Ordenamiento de aguas subterráneas 2018

**Intensidad de sequía 2018:** es una capa que proporciona un mapa con las diferentes intensidades de sequía conforme al Monitor de Sequía para América del Norte (NADM por sus siglas en inglés), durante todos los meses del año 2018, sin embargo, en la capa sólo se presentan los meses que afecta el área del módulo de riego, los cuales son: enero, febrero, marzo, abril, septiembre y diciembre.

El conjunto de datos vectoriales de las zonas de intensidad de sequía 2018, representa digitalmente mediante polígonos la delimitación de las diferentes intensidades de sequía durante los diferentes meses presentados de 2018 de acuerdo con el “Monitor de Sequía para América del Norte”. La intensidad de la sequía que se presenta en la cuenca del río Amacuzac y sobre el módulo de riego 08, para los meses de enero, febrero, marzo, abril, septiembre y diciembre de 2018 es Anormalmente Seco (D0) en su mayoría y Sequía Moderada (D1).



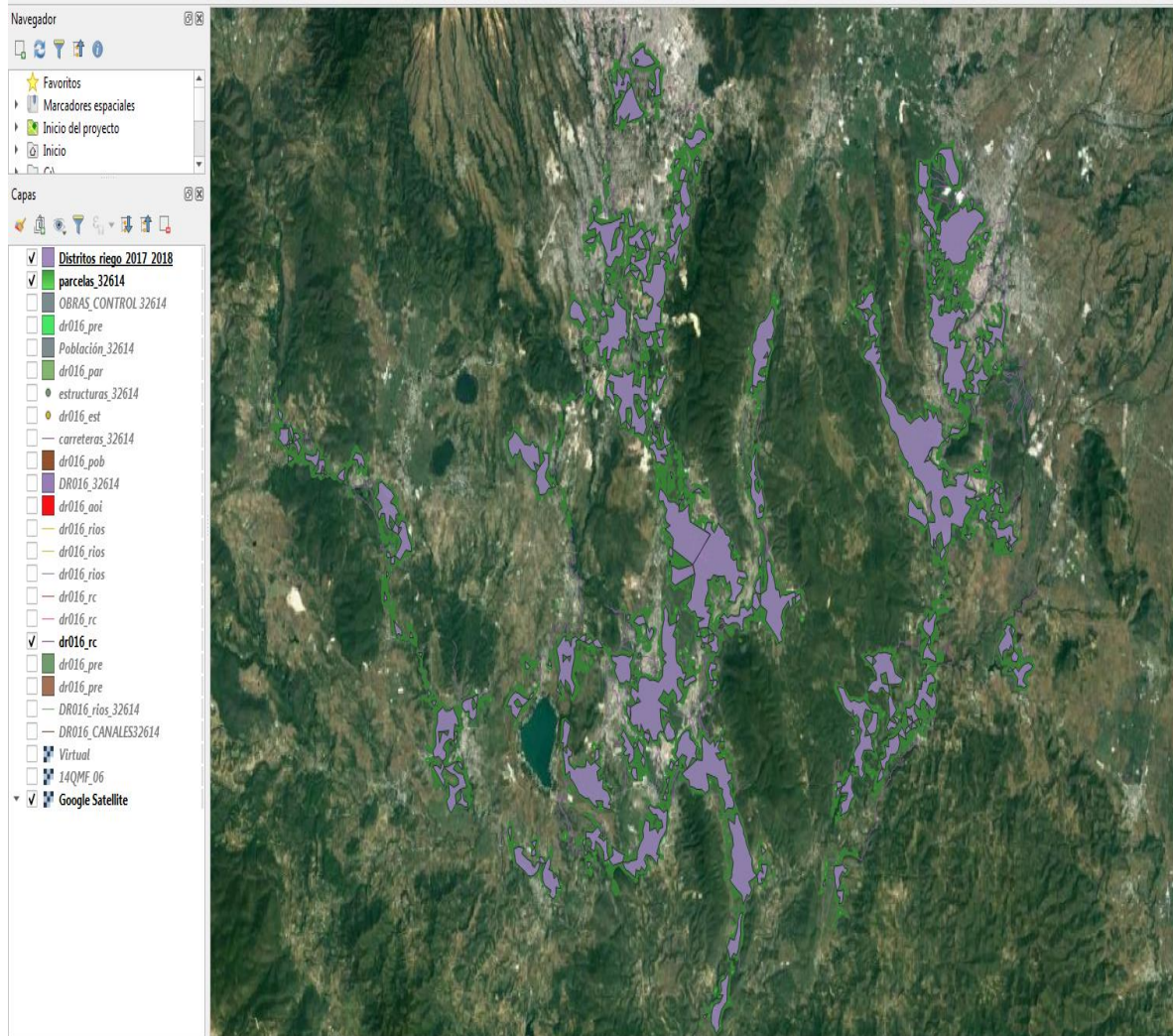


*Ilustración 58 Intensidad de la sequía que se presenta en la cuenca del río Amacuzac*

### **Fuentes usos consuntivos**

Veda vigente del 22 de marzo de 2011 que establece el decreto por el que se modifican los diversos por los que se constituyen reservas de aguas nacionales y se establece una veda en la región hidrológica número 18 Balsas. (Abroga la veda de 02 de febrero de 1966).

Comparación de datos obtenidos mediante plataformas de internet SINA y la delimitación que se tiene en el Distrito de Riego 016 (Ilustración 59).



*Ilustración 59 Delimitación de parcelas, comparación de lo registrado en SINA y lo reportado en el DR016*

**Shape distrito parcelas dr016.shp**, esta capa contiene entre los datos más importantes clave del módulo de riego, cuenta, nombre y apellidos de los propietarios de las parcelas, superficie calculada, cultivo, etc. Sin embargo, las capas de las parcelas del Distrito de Riego 016 indican que la situación actual de la delimitación de parcelas con SIG no está actualizada.

### 5.5.2 Digitalización de cuerpos de agua y parcelas no identificadas

Poder digitalizar todo el sector agrícola implica documentar y obtener la información de manera visible, convertir datos de un formato en papel a un formato digital, es la información que se podrá analizar y que nos ayudara a plantear la adaptación de las tecnologías de la industria 4.0, es por eso que se trabajó en analizar la información y digitalizar aquella que aún falte por procesar, por lo que se procedió a delimitar de manera manual todos los cuerpos de agua y parcelas que se identificaron con las imágenes satelitales y los índices calculados, obteniendo el área y promedio del índice con el que se identificó la parcela y cuerpo de agua.



Se trabajó en identificar y digitalizar los cuerpos de agua utilizando el Índice Diferencial de Agua Normalizado NDWI, que sirve para realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses, alternando el análisis con combinación de bandas infrarroja y SWIR, y así asegurar la identificación de los cuerpos de agua obteniendo los siguientes resultados:

Se identificaron 21 cuerpos de agua dentro del área de influencia del módulo de riego ASURCO, los cuales se digitalizaron por mes y se investigó en diferentes fuentes sus nombres logrando identificar sólo 5 de estos.

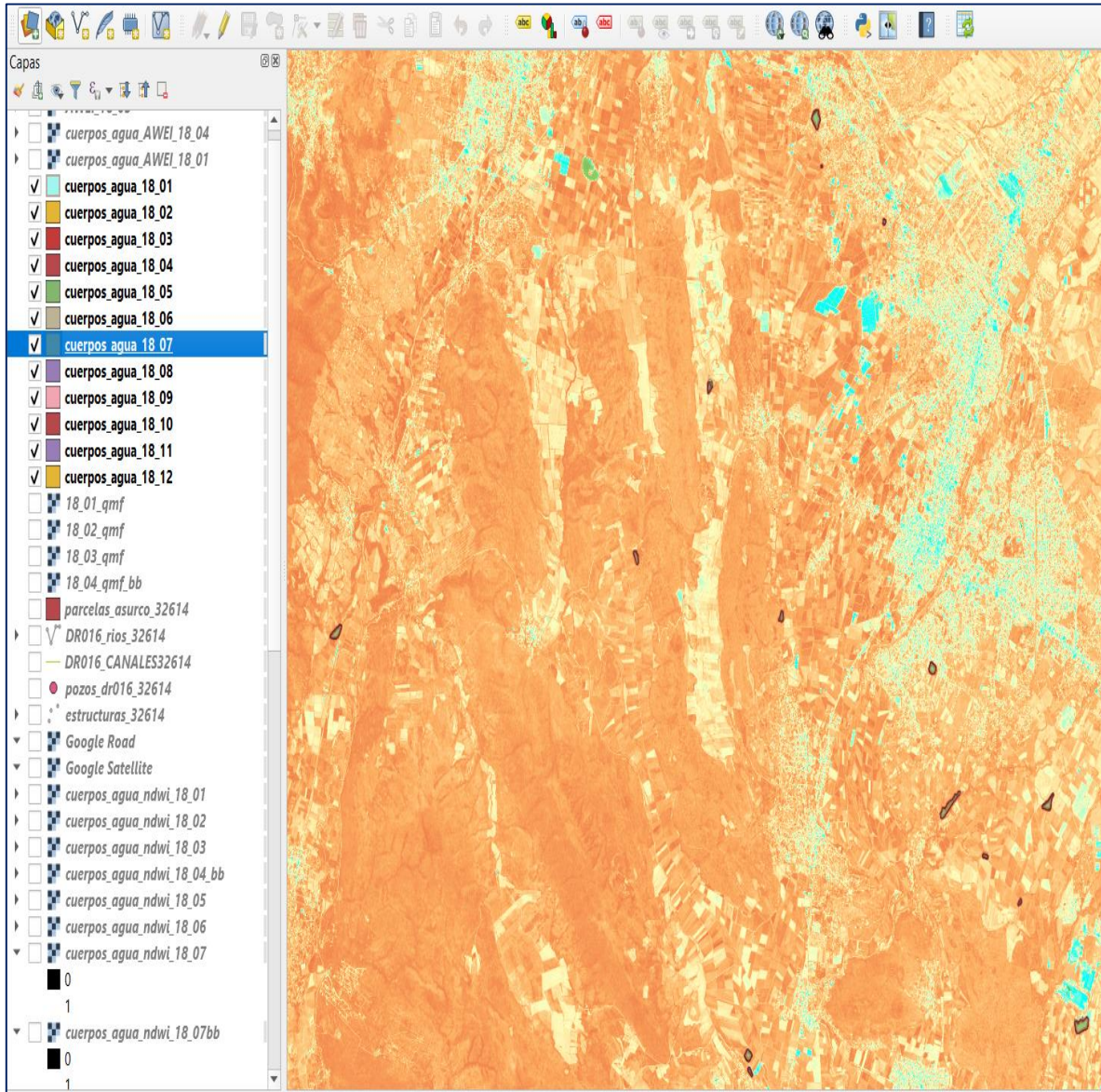


Ilustración 60 Identificación de cuerpos de agua mediante índice (NDWI) 2018.

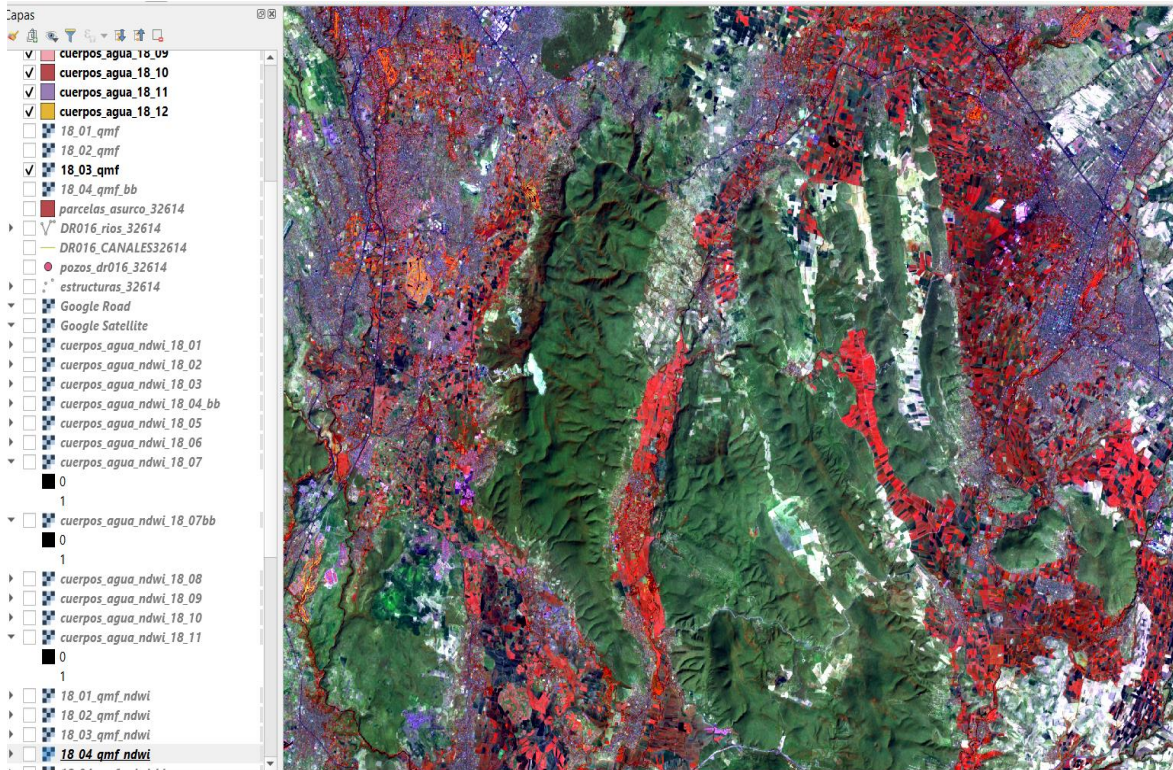


Ilustración 61 Identificación de cuerpos de agua mediante combinación de bandas falso color 2018.

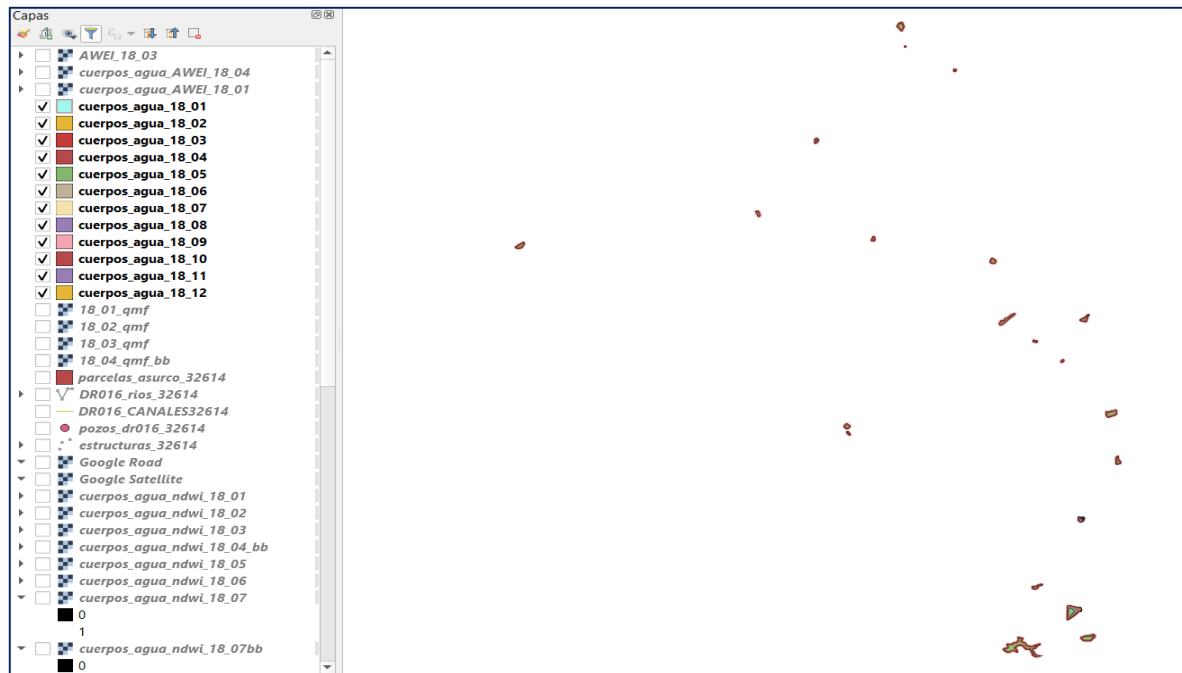


Ilustración 62 Digitalización de cuerpos de agua por mes 2018.

Al tenerlos digitalizados e identificados por mes se logró observar que en temporada de estiaje mucho de ellos se secan y van perdiendo volumen, lo que genera que disminuya su área, encontrándose en abril las áreas menores de los cuerpos de agua digitalizados, mientras



que 5 de los cuerpos de agua en temporada de lluvia se presentaron con problemas de sequía para el año 2018.

Tabla 13 Cuerpos de agua identificados por mes del año 2018

fid	nombre	Área 01	Área 02	Área 03	Área 04	Área 05	Área 06	Área 07	Área 08	Área 09	Área 10	Área 11	Área 12
1	El jagüey	4.43	4.06	3.92	4.25	3.69	4.20	4.45	3.14	3.96	3.88	4.27	4.39
2		0.40	0.42	0.38	0.33	0.41	0.38	0.42	0.37	0.39	0.43	0.41	0.37
3		1.14					0.73	2.19	0.93	1.02		1.83	1.16
4		1.69	1.58	0.71	0.78	1.88		0.44					
5		3.08	3.15	3.07		3.31	3.01	2.87	3.05	2.31	3.14	3.15	3.17
6		1.28	1.00	0.85	0.44		0.98	1.23	0.44	0.94	1.20	1.07	0.92
7	El jagüey II	2.32	2.48	2.08	2.01	2.51	2.19	2.24	2.16	2.04	2.36	2.16	2.33
8	Presa el gigante	4.95	4.93	3.84	3.02	1.72	3.98	4.70	2.85			2.00	3.66
9		2.66	2.55	2.13	2.24	2.89	2.71	3.06	2.18	2.27	2.92	2.71	2.77
10		0.62	0.49	0.41			0.56	0.68	0.31		0.55	0.59	0.67
11		0.58	0.22			0.35	0.32	0.55			0.54	0.02	0.31
12		6.09	6.29	4.96	4.31	3.97	3.83	6.32	5.66	5.30	5.54	5.53	5.60
13		1.97	2.35	2.29			0.56	2.25	1.50	1.73	2.13	2.38	2.50
14		0.63	0.50	0.35	0.47	0.60	0.56	0.68	0.55	0.65	0.69	0.28	0.67
15		2.66	2.60	2.35	2.25		2.55	2.90	2.81	2.07	2.72	2.64	2.68
16		0.58						1.32	2.86	3.64	2.79	2.91	2.94
17		1.99	1.93	1.78	1.73	1.99	1.71	1.98	1.48	1.17	1.74	1.98	1.89
18	Las teclas	11.73	4.84	1.58			0.52	16.20	16.27	15.26	16.64	16.46	16.72
19		7.56	5.64	4.98	0.37	2.86	4.90	7.63	7.31	6.85	7.71	7.34	7.61
20	Presa palo blanco	24.67	22.17	20.32	16.96	15.13	16.08	24.73	23.01	16.09	23.17	23.49	24.22
21	El jagüey III	0.12	0.08	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.07	0.10	0.09	0.09	0.08

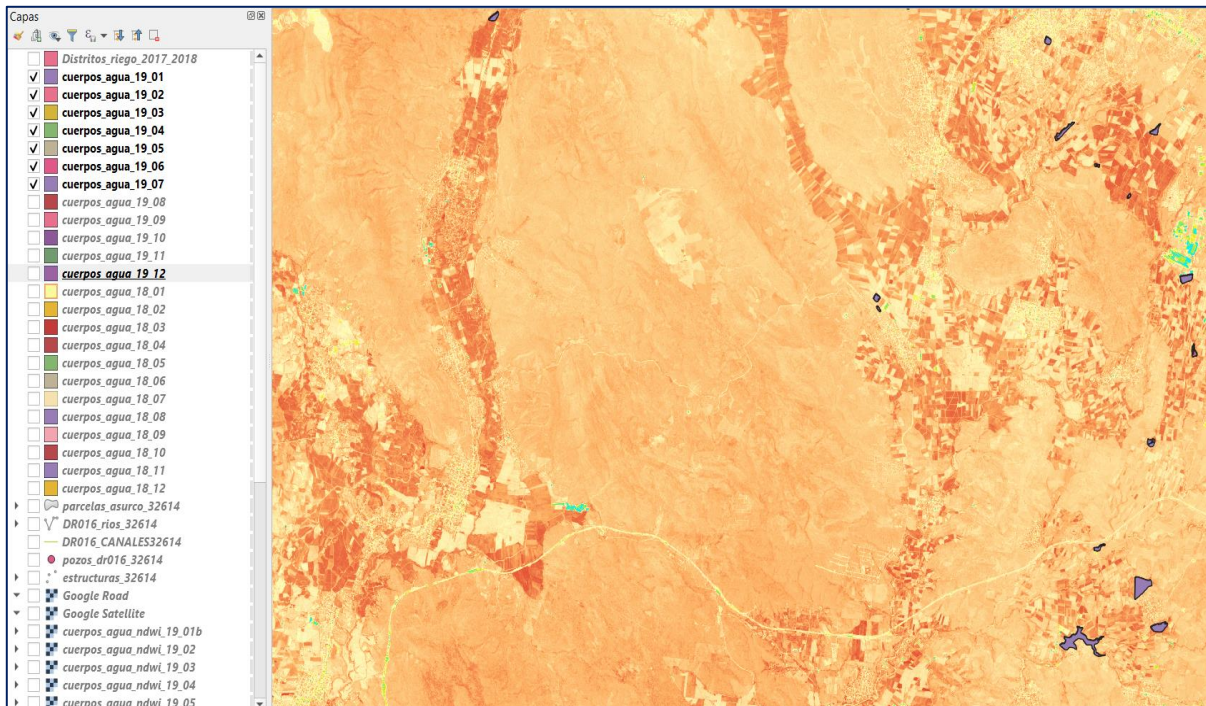


Ilustración 63 Identificación de cuerpos de agua mediante índice (NDWI) 2019.

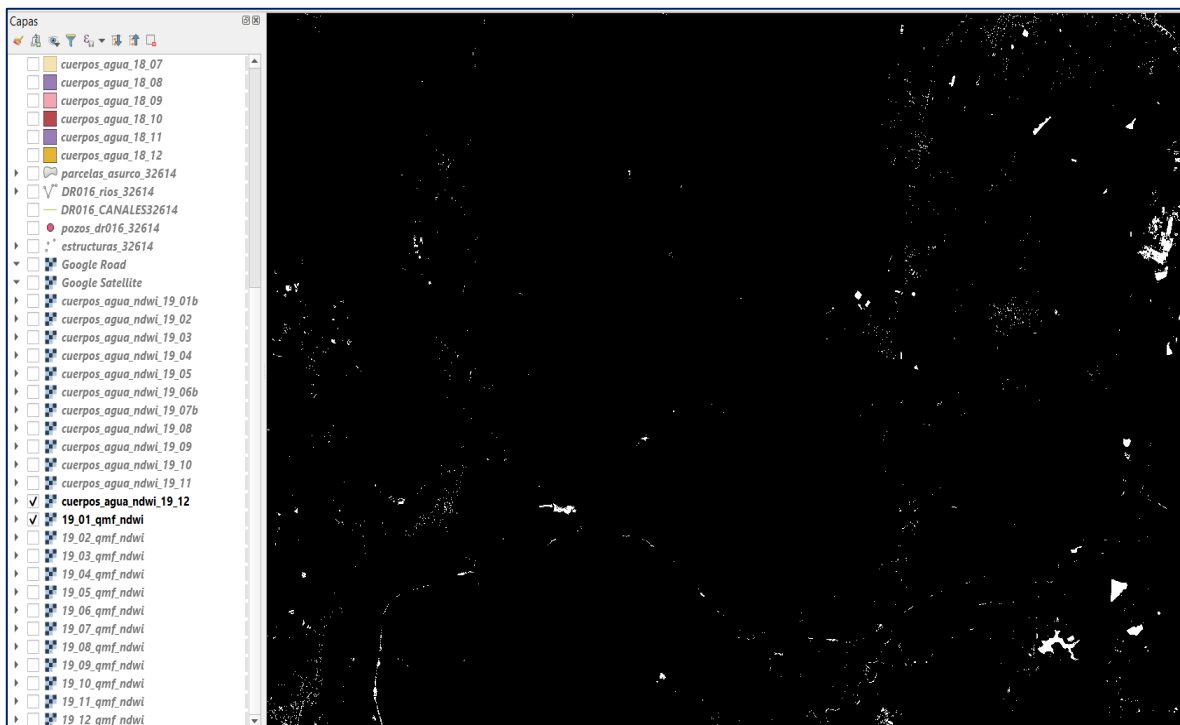


Ilustración 64 Identificación de cuerpos de agua mediante índice (NDWI) 2019, aplicando método predictivo.

Así también, se aplicó aprendizaje automatizado para la obtención de cuerpos de agua con el índice NDWI, método en el que se entrena al algoritmo para predecir los cuerpos de agua respecto al valor del índice NDWI, en un entrenamiento inicial en el que se explica que es cada cosa, respecto al valor que arroja cada uno de los índices, se toma un promedio para el



valor del agua y se generan polígonos de base de entrenamiento, para después la maquina arroje los resultados del entrenamiento, este método se aplicó para comparar cuerpos encontrados mediante algoritmo y las áreas delimitadas manualmente, encontrando algunas discrepancias ya que se debe calibrar al algoritmo para cada una de las imágenes analizadas.

Tabla 14 Cuerpos de Agua identificados por mes del año 2019

fid	nombre	Área 01	Área 02	Área 03	Área 04	Área 05	Área 06	Área 07	Área 08	Área 09	Área 10	Área 11	Área 12
1	El jagüey	4.37	4.51	4.47	4.58	4.58	4.47	4.59	4.48	4.73	4.67	4.58	4.75
2		0.41	0.43	0.43	0.49	0.45	0.44	0.42	0.37		0.04	0.41	0.46
3		0.47					0.13		0.36	0.11	0.39	0.45	0.43
4							1.87	1.48	1.57	1.01	1.61	1.53	1.72
5		2.93	3.13	3.27	3.30	3.16	2.62	3.04	3.09	3.07	2.94	3.19	3.22
6		0.91	0.80	0.72			0.42	0.92	0.88	0.08	0.70	0.77	1.43
7	El jagüey II	2.36	2.27	2.38	2.54	2.49	2.58	2.41	2.26	2.58	2.45	2.43	2.39
8	Presa el gigante	3.81	4.89	5.13	5.44	2.63	3.24	4.65	2.58	0.01	4.36	0.01	5.52
9		2.67	2.98	3.04	2.23	2.81	3.06	3.15	2.88	2.04	2.98	2.91	3.23
10		0.16	0.72	0.75	0.60	0.58	0.57	0.62	0.08	0.56	0.59	0.54	0.74
11			0.54	0.70	0.74	0.65	0.48	0.45	0.31		0.39	0.36	0.69
12		5.56	5.95	5.90	6.11	5.95	6.03	5.85	5.59	0.14	5.80	5.71	6.14
13		2.04	2.58	2.06		1.05	1.94	2.27	2.50	2.73	2.54	2.38	2.93
14			0.68	0.80	0.69	0.72	0.18	0.74	0.78	0.78	0.79	0.76	0.82
15		0.46	2.13	2.68	2.83	2.60	2.90	2.93	2.82		2.87	2.82	3.22
16		3.47	2.92	2.30	1.58	1.37	2.37	2.76	2.62		3.24	3.16	3.55
17		2.02	2.02	2.01	2.00	1.58	1.55	1.88	1.82		1.90	1.85	2.18
18	Las teclas	16.77	16.64	16.15	13.71	11.44	13.96	16.51	16.42		16.72	16.82	16.79
19		7.44	7.71	7.62	6.69	4.75	4.48	6.28	7.63	7.94	8.00	7.91	8.37
20	Presa palo blanco	24.01	25.41	24.51	22.34	19.76	18.66	22.57	20.53		23.33	22.26	25.36
21	El jagüey III	0.10	0.12	0.15	0.16	0.16	0.09	0.09	0.15	0.18			0.10

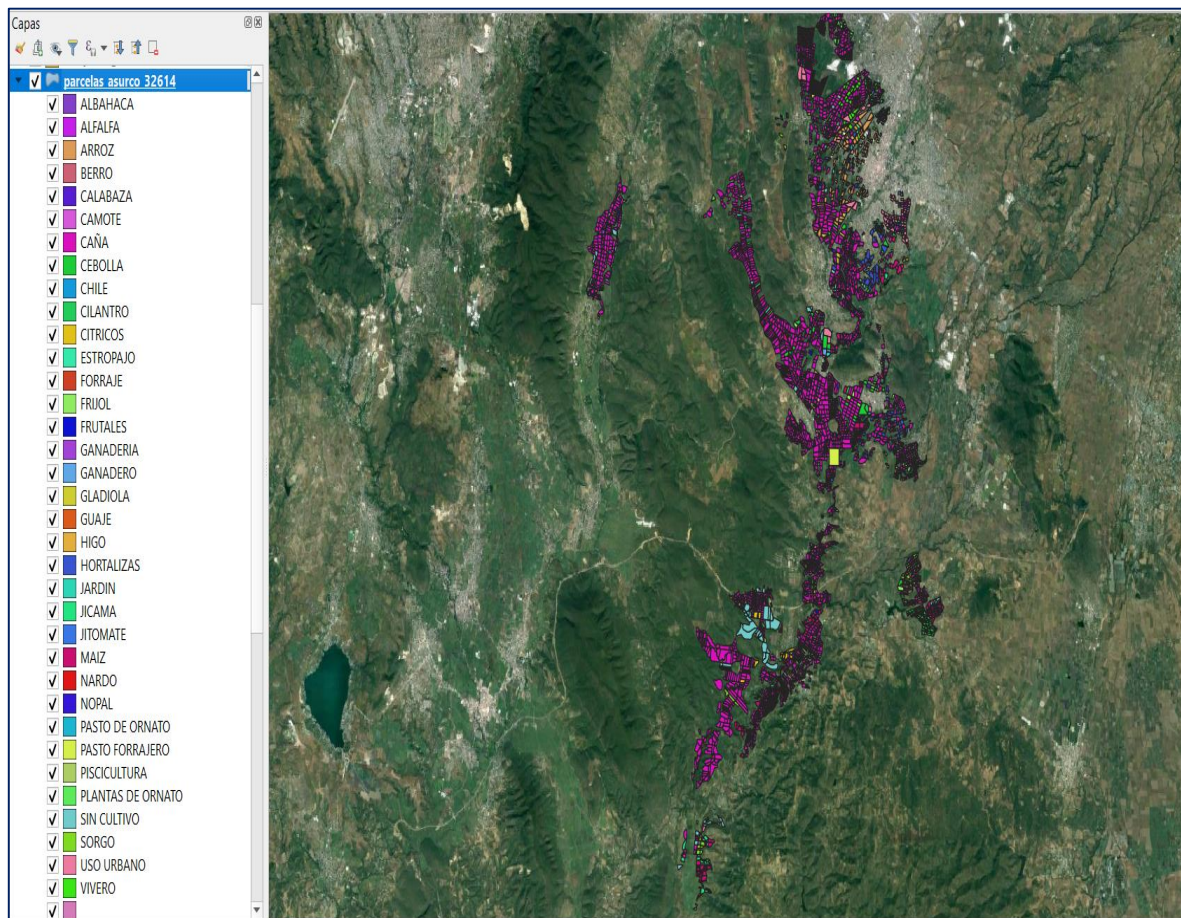
Estimar los cuerpos de agua en el módulo de riego nos ayuda a determinar la cantidad de agua con la que se cuenta por mes, se puede tener más control sobre los cuerpos de agua y generar predicciones respecto a un análisis exhaustivo de los registros que se tenga por años.

Tener identificadas y definidas la superficie con derecho de riego y los que están fuera de derecho y están haciendo uso del agua, esto ayudara a reducir conflictos, además es importante obtener herramientas que permitan una visualización más grafica sobre este



comportamiento y poder tener un mayor control sobre el uso de agua que se está ocupando en el sector agrícola.

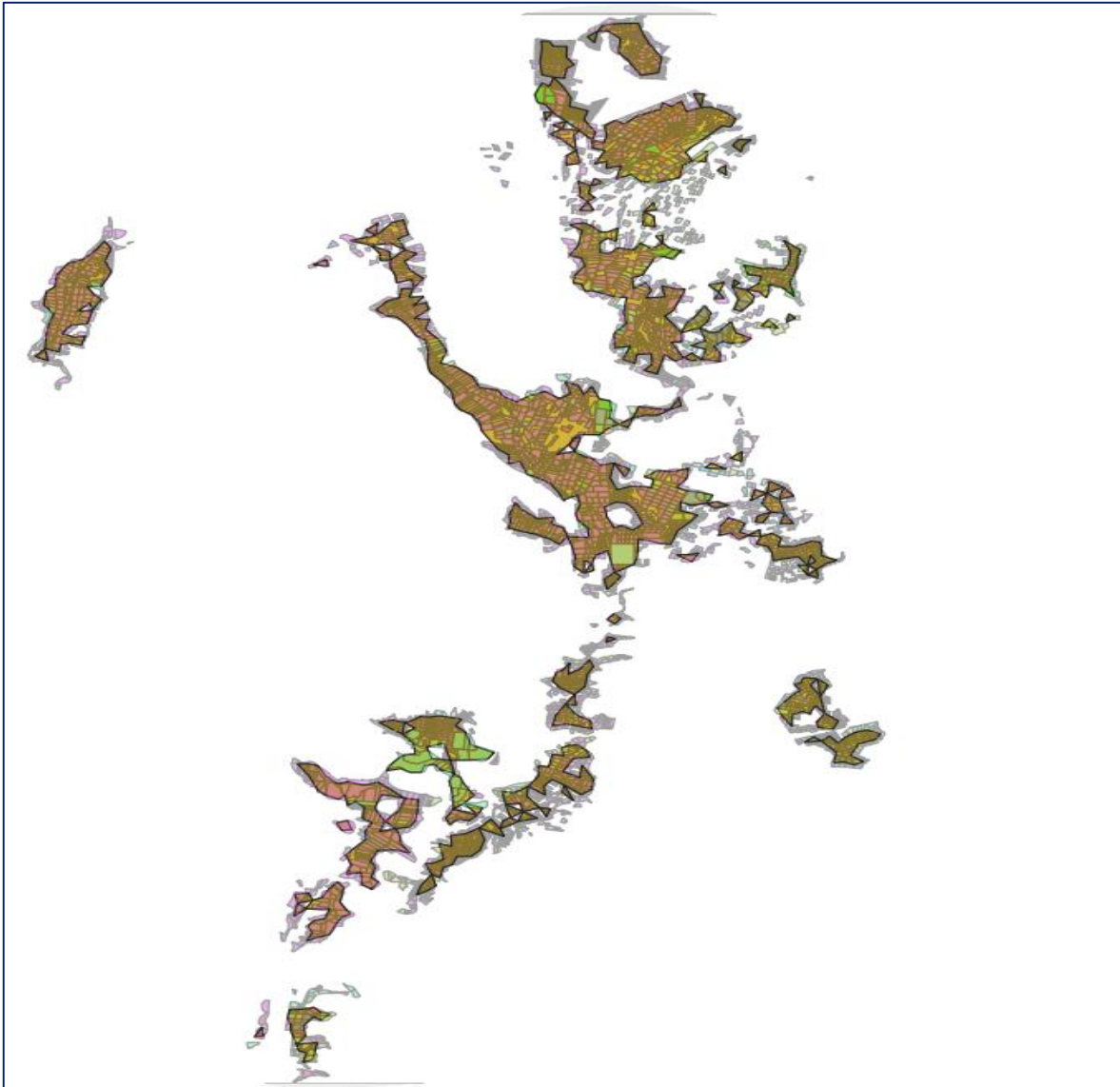
Con los índices y las imágenes en falso color se obtuvieron las zonas por mes en donde hay cultivos y que no entran dentro de las áreas del distrito de riego, ni de unidad de riego, para así determinar su impacto en el incremento del uso de agua en la zona de estudio, tomando como referencia el proceso de depuración e identificación, las superficies asociadas a las concesiones en distritos y unidades de riego, las cultivadas de acuerdo con los planes de riego, las identificadas como operativas y legales, las cultivadas con perenes y las cíclicas asociadas al riego, primeramente se obtuvo la información proporcionada del Distrito de Riego 016 respecto al Módulo de Riego ASURCO, teniendo la digitalización por parcela e identificada por tipo de cultivo como se muestra en la Ilustración 65.



*Ilustración 65 Parcelas reportadas por el Distrito de Riego 016, identificadas por tipo de cultivo*

De la información descargada en SINA y los registros de SIG entregados por el distrito de riego 016, se encontraron discrepancias en cuanto a la superficie de cultivo digitalizada, además que, esta información no se encuentra clasificada por módulos, ni usuario, ni superficie, ni tipo de cultivo, etc., por las razones antes mencionadas es que se utilizaron los 2 shapes (Ilustración 66), para un mayor control e identificación de parcelas no registradas.





*Ilustración 66 Parcelas del Módulo de Riego ASURCO, información presentada por el DR016 y SINA 2018*

Así también, se identificó que la información registrada en el SIG entregada por CONAGUA, no se tiene actualizada, existiendo diferencias entre los usuarios y superficie reportados y los usuarios y superficie que se encuentra digitalizados en el SIG. en la Ilustración 67 se presenta un resumen entregado por CONAGUA en 2018 y en la Tabla 15 un resumen de la información que se encuentra en el SIG entregado por el DR016, evidenciando la desactualización que se tiene a nivel Distrito de Riego de la digitalización de las parcelas y el padrón de usuarios.




 <b>COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA</b> ORGANISMO DE CUENCA BALSAS DISTRITO DE RIEGO 016 ESTADO DE MORELOS  RESUMEN  MODULO: 8 RIO CUAUTLA				
TIPO DE USUARIO	NUMERO DE DERECHOS	NUMERO DE USUARIOS	SUPERFICIE FISICA	SUPERFICIE DE RIEGO
EJIDATARIO	5,234	4,751	8,239.32	8,178.08
COLONO	0	1	2.00	2.00
PEQUEÑO PROPIETARIO	458	471	2,113.58	2,113.58
DOMESTICO	0	0	0.00	0.00
INDUSTRIAL	0	0	0.00	0.00
PUBLICO URBANO	0	0	0.00	0.00
EJIDATARIO FUERA DEL DISTRITO	0	0	0.00	0.00
PEQ. PROP. FUERA DEL DISTRITO	0	0	0.00	0.00
OTROS	0	0	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>	<b>5,692</b>	<b>5,223</b>	<b>10,354.90</b>	<b>10,293.66</b>

Ilustración 67 Resumen padrón de usuarios 2018.

Tabla 15 Resumen de datos obtenidos del SIG 2018 proporcionado por el DR016

Total de usuarios reportados SIG	4951	Superficie Reportada	8259.901
Total de usuarios de riego SIG	4684	Superficie de Riego	7644.054

Por lo anterior, es importante identificar las superficies cultivadas y que aún no se tienen digitalizadas, para poder actualizar el SIG de Distrito de Riego y poder tener un mayor control y gestión del recurso hídrico, por tales motivos es que se realizó la digitalización de parcelas no reportadas en el SIG entregado por CONAGUA, ni en el SIG obtenido en el SINA.

El criterio para identificar las superficies cultivadas y que no se tienen digitalizadas respecto a lo reportado por los distritos y unidades de riego de CONAGUA, se basó en la información que se procesó y que se muestra en el “Análisis del Sector”, en el cual, se identificaron respecto a los índices NDVI y SAVI valores arriba de 0.20, correlacionando este valor a las zonas con presencia de cultivos y que no están registrados, por el contrario se descartaron todos los valores de los índices menores a 0.20 considerándolos áreas sin cultivos.



A continuación, se presentan los resultados para cada mes de cada año procesado, destacando toda el área identificada que no está digitalizada, ni está asociada a las concesiones en distritos y unidades de riego, incluyendo la delimitación de su superficie por medio del uso de los diferentes índices e imágenes a falso color. Al final se incluye una tabla síntesis que representa los valores de los rangos de cada índice para cada año.

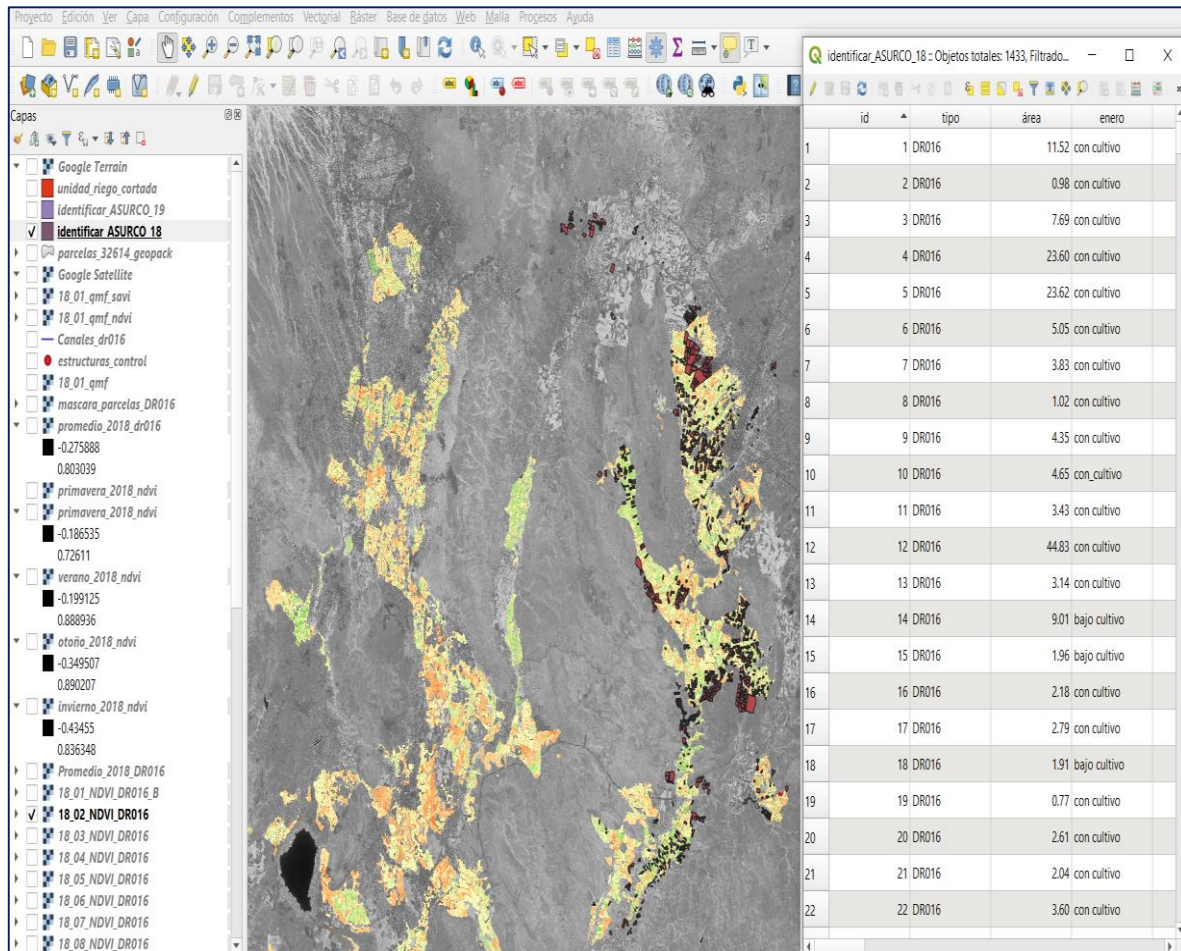
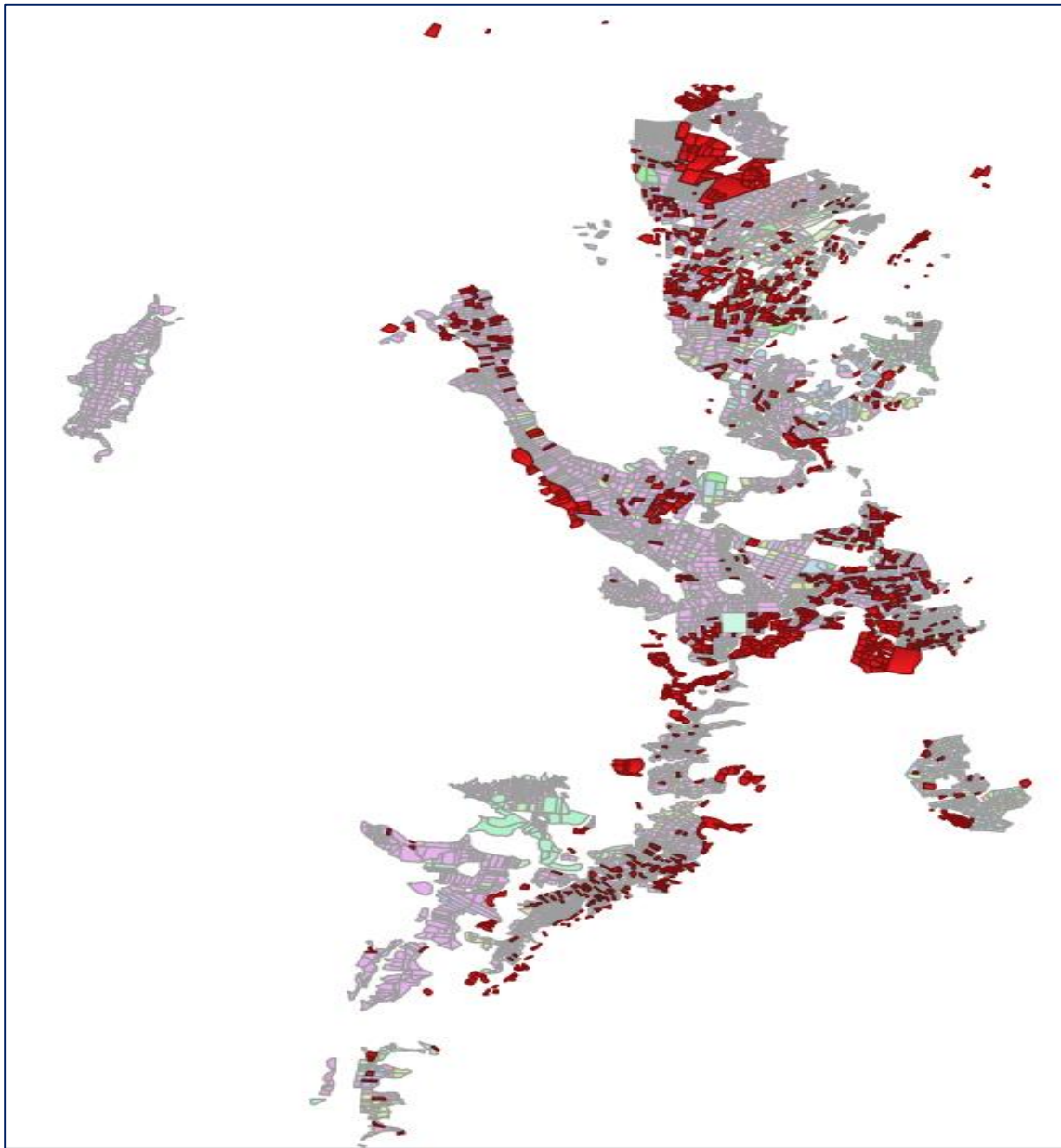


Ilustración 68 Parcelas identificadas en 2018 mediante índices.

En estos mapas se puede observar, por ejemplo, que hay discrepancia entre el padrón de usuarios reportado por el Distrito de Riego y que tienen derecho al agua y las parcelas que están siendo regadas y que no se encuentran dentro del padrón de riego.

En 2018 se encontraron 1416 nuevas parcelas, las cuales se pueden observar en la Ilustración 68 mediante polígonos de color rojo, con una superficie de cultivo de 2006.93 hectáreas, se realizó la delimitación mediante un shape que se le nombró: identificar\_ASURCO\_2018, cubriendo toda el área de superficies que se encontraban respecto a los índices e imágenes a falso color cobertura vegetal en buenas condiciones.



*Ilustración 69 Parcelas identificadas en 2019 mediante índices.*

Para 2019 se encontraron 1426 nuevas parcelas que no se tienen digitalizadas, identificadas en la Ilustración 69 mediante polígonos de color rojo, con una superficie de 2010.22 hectáreas, se realizó la delimitación mediante un shape que se le nombró: identificar\_ASURCO\_2019, cubriendo toda el área de superficies que se encontraban respecto a los índices e imágenes a falso color con cobertura vegetal en buenas condiciones.

En resumen, se aprecia que falta digitalizar el módulo de riego y comprobar en situ la situación de las parcelas identificadas y los cuerpos de agua a partir de los índices calculados.



### 5.5.3 Diagnostico del comportamiento del Módulo ASURCO y nivel de digitalización

Se utilizó información de punta, con imágenes del satélite Sentinel, con las cuales fue posible digitalizar, cuantificar y monitorear los cambios en la superficie agrícola de riego, evaluar cómo se desarrollan los cultivos, obtener cuerpos de agua que no estaban digitalizados, su superficie por mes y año, así como diferentes archivos que ayudaron con la transformación digital y el análisis del sector agrícola los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 16 Archivos digitales del Módulo de Riego para su análisis.

Nombre	Tipo de archivo	Cálculo	Con que información se formo
identificar_asurco_18_01_12	Raster	Con Raster de NDVI, SAVI, Falso color	Con las 13 bandas del satélite SENTINEL
mascara_sin_parcelas_dr016	Raster	Sólo se aprecian las zonas que no están consideradas en el distrito de riego	SHAPE DR016 proporcionado por CONAGUA
mascara_parcelas_DR016	Raster	Sólo se aprecian las zonas que están consideradas en el distrito de riego, por mes del año 2018 y 2019	SHAPE DR016 proporcionado por CONAGUA
primavera_2018_ndvi	Raster	Es el promedio	marzo-mayo
verano_2018_ndvi	Raster	Es el promedio	junio-agosto
otoño_2018_ndvi	Raster	Es el promedio	septiembre-noviembre
invierno_2018_ndvi	Raster	Es el promedio	diciembre-febrero
primavera_2018_ndvi	Raster	Es la combinación	marzo-mayo
parcelas_may_0.6_ndvi_(POR MES-2018)	Ráster	Se quitan las zonas correspondientes al Distrito de Riego, y después se genera un ráster que tengan valores mayores a 0.6	mascara_sin_parcelas y multiplicar por Índices
parcelas_may_0.6_ndvi_(POR MES-2019)	Raster	Se quitan las zonas correspondientes al Distrito de Riego, y después se genera un ráster que tengan valores mayores a 0.6	mascara_sin_parcelas y multiplicar por Índices
identificar_asurco_respaldo	Shapefile	Identificando las zonas con índice NDVI alto e	Con los Raster de NDVI, SAVI y Falso color



		identificarlo mediante un polígono	
dentificar_ASURCO_18	Shapefile	Identificando las zonas con índice NDVI alto e identificarlo mediante un polígono	Con los Raster de NDVI, SAVI y Falso color
dentificar_ASURCO_19	Shapefile	Identificando las zonas con índice NDVI alto e identificarlo mediante un polígono	Con los Raster de NDVI, SAVI y Falso color
cuerpos_agua_18_01_12	Shapefile	Identificando las zonas con índice NDWI alto e identificado mediante polígono	Con los Raster de NDWI, Combinación de banda SWIR y Falso color
cuerpos_agua_19_01_12	Shapefile	Identificando las zonas con índice NDWI alto e identificado mediante polígono	Con los Raster de NDWI, Combinación de banda SWIR y Falso color

Con estos archivos se logró obtener información que se pudo digitalizar y que deja traza puesto que se obtiene información relevante de cómo se han comportado las parcelas respecto a los diferentes meses, a continuación, se muestran las tablas 17 y 18, las cuales resumen los datos que se obtuvieron de la información procesada del índice NDVI.

Tabla 17 Valores de índice NDVI de la máscara del Módulo de Riego ASURCO 2018.

Año/Mes	MÁXIMO	PROMEDIO	MINIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDART	ESTACIÓN
18_01	0.84850	0.39441	-0.37363	0.18650	Invierno
18_02	0.78504	0.33898	-0.04121	0.15629	Invierno
18_03	0.85706	0.40290	-0.01695	0.15801	Primavera
18_04	0.67982	0.27352	-0.17808	0.12516	Primavera
18_05	0.75607	0.34600	-0.02578	0.14755	Primavera
18_06	0.87669	0.53924	-0.02531	0.18889	Verano
18_07	0.86735	0.60631	-0.00199	0.16844	Verano
18_08	0.90879	0.64794	-0.02400	0.18355	Verano
18_09	0.90595	0.65167	-0.03488	0.16237	Otoño
18_10	0.91403	0.67320	-0.09800	0.18234	Otoño
18_11	0.87538	0.61755	-0.03808	0.18910	Otoño
18_12	0.88006	0.53185	-0.03583	0.20709	Invierno

En la Tabla 17, se pueden observar los diferentes valores máximos, mínimos y promedio del índice NDVI por mes, de los cuales podemos destacar que en verano y otoño se presentan



los valores máximos de este índice, siendo octubre el mes que tiene el valor máximo y que mantiene el promedio más alto, por el contrario en 2018 abril fue el mes con el promedio más bajo de este índice y el valor mínimo, lo cual coincide con la temporada de estiaje de los fenómenos climáticos en Morelos.

Tabla 18 Valores de índice NDVI de la máscara del Módulo de Riego ASURCO 2019.

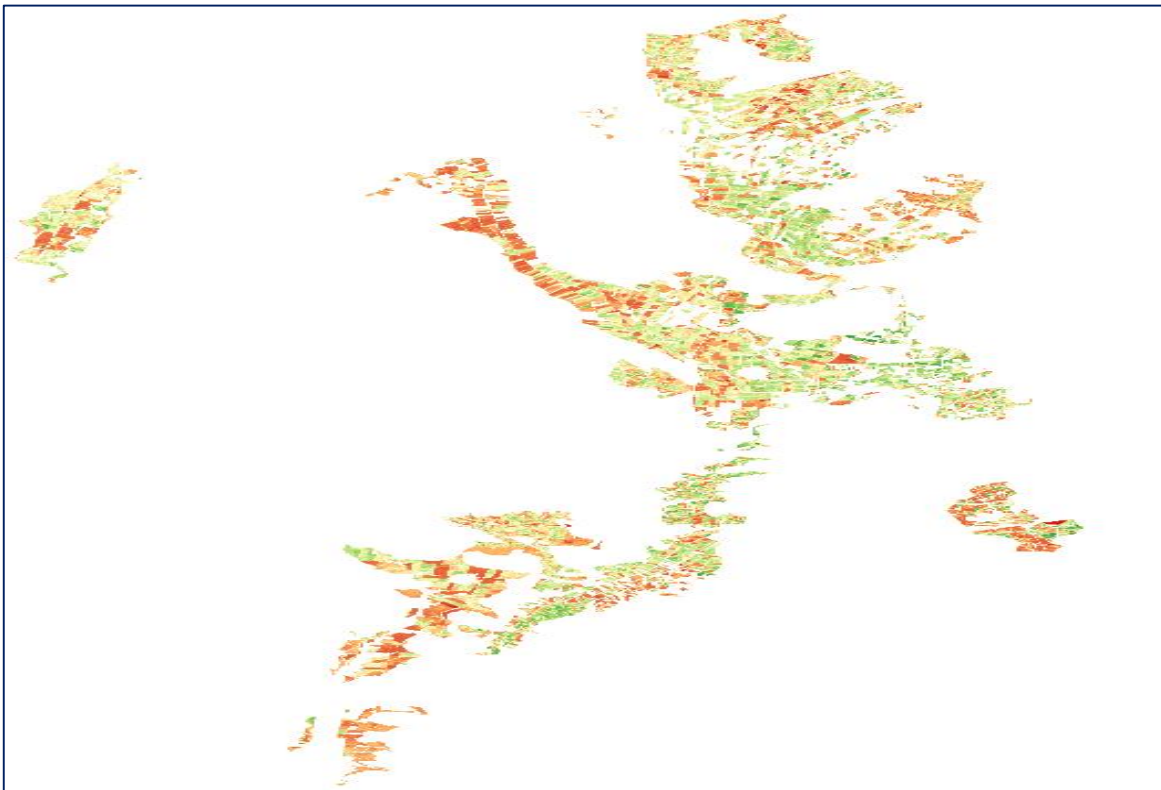
Año/Mes	MÁXIMO	PROMEDIO	MINIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDART	ESTACIÓN
19_01	0.81406	0.43936	-0.01608	0.18034	Invierno
19_02	0.86685	0.41047	-0.19195	0.19128	Invierno
19_03	0.87964	0.39197	-0.12414	0.17298	Primavera
19_04	0.79179	0.34160	0.00905	0.15654	Primavera
19_05	0.84031	0.38814	-0.02972	0.17375	Primavera
19_06	0.83964	0.51757	-0.04969	0.16493	Verano
19_07	0.89295	0.63332	-0.07604	0.18623	Verano
19_08	0.92277	0.66777	-0.04241	0.18173	Verano
19_09	0.87568	0.45693	-0.05262	0.21830	Otoño
19_10	0.92429	0.68325	-0.04692	0.17772	Otoño
19_11	0.94237	0.67664	-0.07690	0.17012	Otoño
19_12	0.81207	0.48698	-0.05480	0.19737	Invierno

En la Tabla 18, se puede apreciar a diferencia de la Tabla 17 que el valor máximo del índice NDVI en 2019, fue en noviembre y que en septiembre en el promedio bajo mucho las condiciones de los cultivos respecto al año anterior y que de julio a noviembre se tienen los mejores promedios respecto a la salud vegetal y a respecto a una mayor superficie cultivada.

Para ejemplificar lo anterior y la obtención de los datos digitalizados, se presenta en las siguientes Ilustraciones 70 y 71, un ejemplo gráfico de los cálculos realizados a las imágenes satelitales del índice NDVI calculado para el módulo ASURCO en 2019, en la Ilustración 70 se observa el mes con mejor promedio en 2019 correspondiente al mes de octubre, destacando que la mayor parte de la superficie se observa en color verde, lo cual indica que se tiene vegetación en buenas condiciones y en color naranja la superficie sin vegetación, caso contrario de la Ilustración 71, que muestra más superficie sin vegetación indicada en color naranja y rojo, ya que corresponde al mes de abril que tiene el promedio más bajo en el año 2019.



*Ilustración 70 Mascara índice NDVI de parcelas del Módulo de Riego ASURCO, octubre 2019.*



*Ilustración 71 Mascara índice NDVI de parcelas del Módulo de Riego ASURCO, abril 2019.*

Esta información nos ayuda a tener una interfaz en donde el usuario puede visualizar y asesorarse sobre las condiciones de su parcela o parcelas y monitorear toda la información, historial, rendimiento, índices y estados de sus cultivos, lo cual permitirá al productor



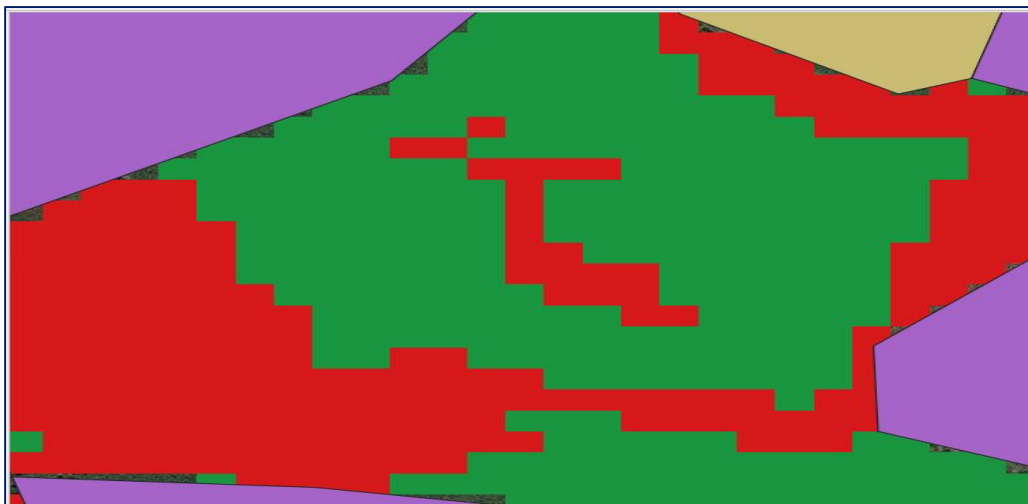


comparar los rendimientos de ciclos pasados y obtener una evaluación del desarrollo de sus cultivos para tomar decisiones necesarias y oportunas, y así tener un mejor rendimiento en el ciclo actual.

También se descubrió que hay zonas de las parcelas registradas en las que se tiene problemas, puesto que existen diferentes valores dentro de la misma parcela lo que puede deberse a diferentes circunstancias que habría que analizar en campo, cómo por ejemplo: se puede deber a que la dureza del suelo es más baja y alta en ciertos lados del terreno, salinidad del terreno, puede que existan zonas de mayores pendientes ocasionando que exista mayor resbalamiento y menos concentración de fertilizante y agua, un ejemplo de esta situación se ilustra en las siguientes imágenes:



*Ilustración 72 Parcela identificada con problema de variabilidad, en el módulo ASURCO 2018.*



*Ilustración 73 Variabilidad de salud de la planta dentro de la parcela.*

En estas ilustraciones se expresa cómo se muestra el comportamiento de una finca con las precipitaciones, riegos y prácticas culturales realizados dentro de la misma, marcando en color rojo las zonas que se presentan problemas dentro de la parcela, lo cual puede ayudar a definir las zonas a investigar correctamente y recomendar las zonas en que se deben ubicar la instalación de sensores para un mayor entendimiento de lo que sucede dentro de la parcela.



Mediante la aplicación de sistema de distribución normal de los índices calculados, se logró extraer información de parcelas que difieren en su comportamiento respecto al tiempo, encontrando distintos comportamientos. Respecto al año analizado es posible evaluar cómo se desarrollan los cultivos, y en su caso, los productores pueden tomar las medidas conducentes a corregir errores en el manejo de sus cultivos. Esto es la base de la agricultura de precisión.

A continuación, se muestra en la Tabla 19 un resumen de las parcelas identificadas que difieren en la calidad y el cambio de uso de suelo, obtenida por medio de los índices calculados con el programa QGIS usando los valores promedios y desviación estándar de las máscaras de las parcelas y así se identificaron las parcelas del módulo de riego ASURCO donde se ha perdido vegetación, siendo el valor 3 el más radical, puesto que indica las parcelas que en 2018 había vegetación, en comparación con 2019 que respecto a los índices indica que se perdió, resumiendo en la tabla el número de las parcelas y su área.

Tabla 19 Cambio de calidad y uso de suelo de las parcelas del Módulo de Riego ASURCO

Mes	Calidad de suelo (2) Parcelas	Área (ha)	No se sembró (3) Parcelas	Área (ha)
Enero	204	369.4831	28	50.8659
Febrero	160	244.7761	35	48.9217
Marzo	171	229.2105	73	84.6997
Abril	146	188.134	23	28.1132
Mayo	138	188.3739	3	2.7716
Junio	151	227.6513	6	8.2048
Julio	184	292.1771	41	56.7882
Agosto	139	217.5473	69	72.2484
Septiembre	83	134.214	-	-
Octubre	138	190.4264	99	125.4149
Noviembre	185	241.2715	48	56.8483
Diciembre	255	329.6275	19	19.2581

El procesamiento de las imágenes de satélite y su análisis en el SIG permitieron de manera rápida y rentable tener un diagnóstico del nivel de digitalización del sector agrícola, la recopilación de información importante como lo son las parcelas identificadas no registradas, las que sufrieron un cambio respecto al tiempo y los cuerpos de agua identificados que no están registrados, lo cual indica el nivel de rezago que se tiene en el módulo de riego, por lo tanto, es necesario implementar acciones para que todo el personal que interfiere en la toma de decisiones dentro del distrito de riego tenga disponible toda la información actualizada respecto al módulo y distrito de riego, la tecnología de percepción remota y SIG, nos indicó que se debe prestar más atención al sector, que se debe actualizar la información digital implementando de manera integral más tecnologías para corroborar y obtener más datos digitales, por lo que se recomienda realizar las siguientes acciones:

- Capacitación integral sobre la importancia de los datos y la digitalización en el módulo y distrito de riego de tal manera que se recabe información confiable de cada



uno de los aspectos que intervienen en el uso y aprovechamiento del agua y de cada uno de los diferentes sectores que intervienen en la administración de este recurso, aprovechando al máximo la información que el campo nos brinda y partiendo de este conocimiento establecer las tecnologías con las que se podrá sacar el máximo provecho.

- Sensibilizar a los usuarios respecto a la importancia de tener datos digitalizados y actualizados de sus parcelas, para poder mejorar la producción y la eficiencia en su finca deben partir de este ámbito y así establecer un plan de acción.
- Es necesario que mediante acciones de colaboración entre los diferentes sectores que intervienen en el módulo de riego se actualice la información digital de todo el sector agrícola, exigiendo a los usuarios el actualizar el padrón de usuarios y las parcelas no registradas, indicar el nivel de tecnificación en que se encuentran las parcelas, e investigar si se apoyan en algún tipo de tecnología para saber las necesidades hídricas de su cultivo.
- Obtener un sistema de asesoramiento de riego y visualización en un sencillo entorno, el cual tenga integrado: el análisis de la información proporcionada por los usuarios, tipo de cultivos, volúmenes de agua entregados por módulo a cada usuario, aprovechamientos autorizados en la zona de estudio, eficiencias y rendimientos por cultivo.
- Realizar un seguimiento de actualización y entrega de agua, recopilando información confiable de avance de riegos y registros que tienen los canaletes del módulo de riego con puntos de control georreferenciados, digitalizar los datos en el programa SIG, para así contrastar la información entregada, con datos de percepción remota y detectar las parcelas de los usuarios con derecho y usuarios precarios que no han pagado el servicio del agua.
- Se hace necesario realizar un plan de acciones estructurales para aumentar la eficiencia en el uso del agua, consistentes en mejorar las condiciones físicas de infraestructura hidroagrícola que se encuentra en condiciones precarias y de rizado, las cuales consisten en la rehabilitación y modernización del sistema de conducción y distribución del agua utilizada para riego, realizar la tecnificación mediante proyectos adaptables a las tecnologías, digitalizados y basados en las necesidades reales de las parcelas.
- Para empezar a implementar agricultura de precisión e inteligente se propone implementar las siguientes acciones:
- Para garantizar la eficiencia en el uso del agua una propuesta comenzará con la instalación de **sensores y estaciones climatológicas**, para medir las principales variables que intervienen en el crecimiento de la planta (temperatura, radiación, humedad, estado del suelo y el agua de la planta).
- Mejorar la medición del agua en puntos de control y nivel parcelario, definiendo el agua entregada a los usuarios, digitalizando y automatizando los datos de volumen de agua entregada en tiempo real.
- Automatizar la recolección de datos de todos los sectores y durante todo el trabajo operativo dentro de la parcela, empezar a vislumbrar la cantidad de datos a obtener, en donde se van a alojar, base de datos a utilizar, que programas se empezaran a calibrar para hacer uso de estos con base en su uso, calidad, cantidad, confiabilidad, seguridad, escalabilidad y disponibilidad.



- Una vez que se dispone de los sensores y el sistema de riego, se deberá realizar la programación del riego sostenible y el ajuste de la cantidad de agua de riego necesaria, de acuerdo con las mediciones de los sensores utilizados, atendiendo a dos principales conceptos: la evapotranspiración y la fase fenológica del cultivo.
- Actualizar constantemente los riegos recomendados dependiendo de las lecturas de los sensores y reforzar esta información con las estaciones meteorológicas más cercanas al distrito de riego y así hacer la mejor previsión del riego para los cultivos.
- Realizar mediciones del crecimiento vegetativo, parámetros fisicoquímicos y el rendimiento del cultivo por lo que el riego se puede ajustar en cada momento si es necesario.
- Obtener un mapa digitalizado con la ubicación y estado de los dispositivos instalados (sensores, contadores de agua, electroválvulas y estaciones meteorológicas), información individual y detallada de cada tipo de dispositivo (localización, batería, nivel de humedad, el tiempo total de encendido de las electroválvulas, el consumo de agua total en litros).
- Diseñar e implementar el internet de las cosas para la automatización del riego que facilite y mejore la forma tradicional que emplea el pequeño agricultor mediante el uso de microcontroladores, tensiómetros, transductores, medidores ultrasónicos de nivel, nodos de control y actuadores, ubicados a nivel obras de cabeza y nivel parcelario y mediante una programación escalable permita realizar más conexiones, iniciando desde el control del agua entregada en bloque hasta el nivel parcelario.
- Realizar un cuadro de mando de gestión que permita analizar todos los dispositivos instalados y así establecer periodos de mantenimiento eficiente de los emplazamientos y facilitar la toma de decisiones.
- Evaluar los rendimientos de los cultivos y la calidad final de la cosecha, con la cantidad de agua utilizada, con el fin de verificar la eficacia de las acciones realizadas.
- Se debe tener el monitoreo de todos los niveles en tantos puntos como estructuras de control o tramos se tengan en el canal y poder ordenar una maniobra de apertura o cierre de la compuerta desde un dispositivo digital o centro de control.
- A cada acción realizada se le deberá realizar un análisis que indique el nivel de impacto generado en el sector, los beneficios generados, nivel de digitalización obtenido, dominio de conocimiento de tecnologías aplicadas y por aplicar al sector, aumento de eficiencia del agua, y aumento de la producción.
- Se debe contemplar también la realización de actividades de comunicación y difusión constante para dar a conocer los resultados y beneficios medioambientales que supondrá la aplicación de este sistema de riego eficiente.

Si consideramos este proceso de mejoras significativas, de transformación digital e implementación de herramientas, técnicas y tecnologías derivadas de la industria 4.0 al sector agrícola se hace necesario contar con una metodología de aplicación, que nos indique los pasos a seguir y las posibilidades de avanzar a cada implemento o mejora estructural dentro del Distrito de Riego.



## Capítulo 6 Conclusiones

En la información analizada en los Distritos de Riego, se detectó que existe un rezago respecto a la digitalización del sector y que no se le ha dado la importancia a los datos, dado que se encontraron discrepancia entre estos, por lo anterior, se puede concluir que los datos presentados en el Distrito de Riego 016 no son confiables, y esto se atribuye a un escaso conocimiento que tienen los productores respecto a las tecnologías que pueden aplicarse para la obtención de datos, los cuales coadyuvarán a tomar mejores decisiones, y en consecuencia a mejorar la productividad y la eficiencia del agua, encontrando en la digitalización y la obtención de datos confiables la parte primordial para la adopción de tecnologías de la industria 4.0, por lo que se hace preciso el introducir progresivamente las tecnologías avanzando desde acciones de sensibilizar a todos los agentes involucrados en el sector agrícola, de contar con sistemas de trazabilidad digital, con datos integrales, actuales y confiables hasta los sistemas inteligentes capaces de determinar las necesidades hídricas del cultivo respecto a las propiedades del suelo, variabilidad climática y requerimiento de agua de acuerdo a su etapa fenológica y tipo de cultivo analizado, además, se debe tener en cuenta que en modalidades más avanzadas, se deberá realizar un diagnóstico en que se pueda establecer acciones de colaboración que permitan transmitir los conocimientos obtenidos en el sistema de escalabilidad en que se encuentra, de acuerdo al desarrollo tecnológico aplicado.

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes a las que se llegó durante el desarrollo de esta tesis.

### 6.1 En relación con la base de datos

La base de datos de las tecnologías permite sobre todo, dar a conocer todas las tecnologías derivadas de la industria 4.0, además de, las capacidades de aplicación, la evolución que han tenido los diferentes sistemas desde la agricultura de precisión hasta la agricultura inteligente, el impacto que puede generar su implementación en el sector hidroagrícola, establecer las condiciones facilitadoras para la aplicación de cada tecnología, conocer y acceder a la información de manera rápida a cada una de las tecnologías, lo que facilita la elección estas, respecto al nivel de adopción que se tenga, dando a conocer las tecnologías de mayor impacto en la industria 4.0, los beneficios obtenidos con su aplicación e identificando las herramientas informáticas que ayudaran a analizar la mejor propuesta de la adopción tecnológica y sacar su máximo provecho.

Con la base de datos se logró realizar una propuesta de implementación tecnológica respecto a las necesidades a cubrir en el módulo de riego Asurco y respecto a su nivel de desarrollo, permitiendo identificar lo que se puede lograr al implementar las tecnologías propuestas al realizar, comportamientos asociativos con la revisión bibliográfica y encontrando ejemplos de su aplicación, estrategias y planes de aplicación, resultados obtenidos y si respecto al nivel de desarrollo del módulo de riego se podría obtener un análisis de las condiciones digitales y el comportamiento de sus datos.



Como complemento a la base de datos se describen todas las tecnologías de agricultura de precisión e inteligente, pilares de las tecnologías derivadas de la industria 4.0, nuevas técnicas de producción y herramientas, encontrando en algunos casos pocos ejemplos de aplicación en el sector agrícola, por lo que se recomienda realizar campañas de adopción tecnología, en las cuales se realicen proyectos especiales, introducción de paquetes tecnológicos, acciones de apoyo y colaboración que permitan transferir experiencias y resultados de buenas políticas y prácticas agrícolas, para avanzar en la generación y adaptación de nuevos sistemas inteligentes partiendo de la importancia de los datos (que aseguren la información y el control a lo largo de todos los procesos y toda la cadena agroalimentaria) y la digitalización de la información, para dar a conocer una herramienta estructurada, planificada y ordenada de las tecnologías, que pueden ser útiles para obtener las necesidades y problemáticas del lugar.

Se debe destacar que mucha de la información que ayudaría a comprender más el uso de tecnologías derivadas de la industria 4.0 se encuentra restringida, lo que dificulta la transferencia de conocimientos y empobrece la base de datos presentada.

Así también, se recomienda realizar campañas especiales de divulgación de la información, para sensibilizar a los usuarios y agentes involucrados en el sector hidroagrícola los beneficios que conlleva el adoptar las tecnologías de la industria 4.0 mediante medios tradicionales, internet, juntas de sistema, publicaciones y acciones demostrativas que permitan acceder a la información de los proyectos elaborados para la aplicación de alguna tecnología y los beneficios obtenidos. Es importante además implementar en los programas de mejoramiento de los distritos de riego la importancia de obtener datos digitalizados y confiables para un mejor aprovechamiento de estas tecnologías y abordar de manera inteligente la problemática del agua y cambio climático, siendo los campesinos quienes puedan administrar sus datos y tomen las decisiones respecto al campo y sus cultivos.

## 6.2 En relación con el caso de estudio

En el caso de estudio, se ilustra la aplicación de tecnología de percepción remota, TICs y SIG, para ilustrar un análisis mediante la digitalización e información de uso libre, lo cual nos arrojó que no se tiene actualizado el padrón de usuarios, encontrando parcelas que hacen uso del agua sin tener derecho a esta, cuerpos de agua no identificados dentro del distrito de riego, y deficiencias de estado de salud de las plantas dentro de las parcelas, concluyendo que se deben realizar acciones para actualizar los datos y estar en posibilidades de implementar más tecnologías de manera ordenada y planificada, sin embargo, de las mayores problemáticas para los agricultores en la aplicación tecnológica es la elección adecuada de tecnologías respecto a nivel de digitalización y conocimiento de su parcela, la complejidad para utilizar e interpretar la información recabada y la poca importancia que se le da a los datos y la digitalización del sector. Mooney, P., & Grupo, E. T. C. (2019), indican que, conforme aumente la influencia de la agricultura 4.0, los productores grandes o pequeños que no acepten la nueva plataforma tecnológica quedarán aún más marginados en el mercado y sujetos a regímenes regulatorios determinados por las corporaciones, bajo este contexto se plantea la necesidad de contar con una metodología de aplicación tecnológica respecto a la base de datos de la tecnología 4.0 realizada en esta tesis y que ilustre las acciones a realizar para poder hacer un buen uso de las tecnologías que nos ayudarán a tener digitalizado y



evaluado este sector en tiempo real, permitiendo establecer a partir de las necesidades y condiciones actuales del distrito de riego, las acciones a implementar para hacer más eficiente el uso del agua y potencialice la producción, todo esto bajo un sistema de trazabilidad y beneficios inmediatos, tales como: extraer menores cantidades de líquido de las fuentes de abastecimiento (haciendo más eficiente el agua), aumentando la producción en las superficies de riego registradas, obteniendo las superficies añadidas de manera ordenada y planificada., optimizar el tratamiento y acciones a ejecutar en cada sector del campo.

A continuación, se integra cómo parte de las conclusiones de este trabajo una metodología de la aplicación tecnológica de la industria 4.0 al sector agrícola.

Tomándose como referencia las estructuras de adopción tecnológica que se han aplicado en otros países y los resultados obtenidos en la obtención de datos y análisis digital, basándose en una metodología de experimentación, sobre la cual Aqeel-ur- & Zubair A. (2012), indica que se pueden distinguir los siguientes pasos aplicados al sector agrícola:

1. Detección de parámetros agrícolas locales.
2. Identificación de la ubicación de detección y recopilación de datos.
3. Transferencia de datos del campo de cultivo a la estación de control para la toma de decisiones.
4. Toma de decisiones basada en datos locales, conocimiento de dominio e historia.
5. Actuación y control basado en la decisión.

La metodología que se expone a continuación se aplica al sector agrícola, cuenta con una estructura de necesidad escalable y se desarrolla en 3 fases, las cuales permiten adoptar las tecnologías partiendo de la importancia de los datos y la digitalización del sector por lo que se requiere se cuente con un diagnóstico de nivel de digitalización del sector completo, un análisis y dominio completo de las problemáticas, características y antecedentes de este.

**1er Fase. Análisis del sector agrícola:** siendo esta fase el objeto del presente trabajo, en la que a partir de establecer y conocer un caso de estudio que en este caso son los distritos de riego se aplicarán tecnologías de uso libre y fácil acceso para realizar un análisis exhaustivo de los distritos de riego, es decir, detección y mapeo de características y variables que interfieren en el proceso de los cultivos, planteando promover una cultura de observación y medición ya que se requiere para la agricultura inteligente establecer que está sucediendo en tiempo real, y así poder decidir qué hacer. Esta fase se desarrolla en las planteadas en el capítulo 4, las cuales consisten en las siguientes:

- *Etapa 1: Recopilación de información:* es necesario conocer aspectos generales de los distritos de riego, obtener las características principales, descripción de actividades y problemáticas existentes.
- *Etapa 2: Diagnostico general:* describir el distrito de riego, conocer las condiciones actuales, indicar los antecedentes y nivel digitalización del distrito, verificar actualización y que sus datos estén generando traza y que permita visualizarlos de manera rápida.
- *Etapa 3: Primera propuesta de aplicaciones tecnológicas:* revisión de base de datos de las tecnologías derivadas de la Industria 4.0 e indicar que tecnologías se utilizaran



para obtener un análisis completo del distrito de riego, describiendo características y antecedentes principales de cada tecnología.

- *Etapa 4: Análisis del sector:* realizar un análisis a partir de imágenes satelitales, sistemas de información geográfica, internet, aplicaciones y drones que permita obtener un marco de referencia, permitiendo presentar datos que generan traza y que pueden ser visualizados de manera rápida.
- *Etapa 5: Resultados de la obtención de datos y análisis digital:* a partir del uso de técnicas de Percepción Remota, TIC y SIG, poder obtener un diagnóstico en lo inmediato del comportamiento y nivel de digitalización del sector analizado, observar los cultivos durante su desarrollo pudiendo identificar y ubicar aquellos ambientes o sectores con problemas que requieran una rápida atención, indicando los sitios en donde se debe prestar atención de manera digital y dejando traza de información importante y relevante para el sector.

**2da Fase. Adopción de tecnológicas y toma de decisiones:** En esta fase se consolidó toda la información, pudiendo obtener un diagnóstico digitalizado que permite establecer que variables se deben medir, donde, como y cuando se deben implementar las tecnologías, **permitiendo establecer un plan tecnológico respecto a la mayor prioridad, trabajando siempre** en recoger y almacenar más y mejores datos para un mayor análisis, entre más variables se tengan registradas mejores decisiones se podrán tomar, se establecen sistemas de automatización, tener herramientas que controlen las variables de manera más fácil y directa.

- *Etapa 6: Segunda propuesta de aplicaciones tecnológicas:* revisión de Base de Datos de las tecnologías derivadas de la Industria 4: comprende en establecer las herramientas, técnicas y tecnologías que se pueden implementar respecto a las características, avances y nivel de digitalización que se tengan en el distrito de riego, describir características principales y antecedentes de aplicación.
- *Etapa 7: Detección de variables:* selección adecuada de las variables que se desean medir, respecto al análisis del sector agrícola realizado anteriormente.
- *Etapa 8: Identificación de la ubicación de detección y recopilación de datos:* con ayuda del sector digitalizado y su análisis se determina en que sitios se debe medir y las variables más importantes, debiendo indicar por orden de prioridad y de manera digitalizada los puntos de medición.
- *Etapa 9: Identificación de la ubicación de puntos de control:* definir y establecer respecto a los mecanismos de control y funcionamientos hidráulicos los sistemas de automatización de los canales, debiendo indicar por orden de prioridad y de manera digitalizada los puntos de control.
- *Etapa 10: Elección de sistema de comunicación:* respecto a las condiciones del lugar establecer que sistema de comunicación se debe elegir considerando, presupuesto, estructura de red, sistemas a conectar.
- *Etapa 11: Elección de sistema de almacenamiento de datos:* respecto a los datos generados, presupuesto, hardware y software a utilizar, etc.
- *Etapa 12: Transferencia de datos del campo de cultivo:* puntos de control, red de sensores a la estación de control para el almacenamiento y toma de decisiones.

**3ra Fase. Actuación, entrenamiento y evaluación del sistema:** En esta fase se pueden tomar decisiones más fáciles y rápidas, toda la información analizada y que se ha generado





con las tecnologías implementadas se tiene documentada de manera digital, permitiendo que se registre todo lo que acontece en las fincas, **se empieza a entrenar a máquinas para la toma de decisiones en tiempo real, evaluando y analizando los datos para corregir errores y divulgar resultados obtenidos.**

- *Etapa 13: Actuación del sistema:* verificar funcionamiento del sistema, actuación y calibración en campo de sensores y mecanismos autónomos, capacidad de respuesta en la acción y control del sistema.
- *Etapa 14: Elección de técnica para la toma de decisiones:* en relación con los datos obtenidos, historial de los datos y entrenamiento de algoritmos para evaluar el dominio de conocimiento basado en datos locales.
- *Etapa 15: Toma de decisiones:* establecer la planificación de la actuación: que sembrar, medir, operar, como cuando y donde, dejando traza de las acciones y los datos generados de estas que apoyen en mejorar la toma de decisiones.
- *Etapa 16: Evaluación del sistema:* revisión de condiciones actuales del sistema, establecer índices de rentabilidad económica, ambiental y social de las operaciones y funcionamiento en el campo de aplicación.
- *Etapa 17: Transferencia de resultado:* que de manera gráfica y digital permita establecer y divulgar los resultados obtenidos.

Las posibilidades de avanzar en cada oportunidad dependerían de los logros de la fase anterior, realizando una evaluación sistemática que indique si los cambios han sido exitosos, con la finalidad de obtener un sistema con mayores rendimientos económicos, ambientales y sociales.



## Siglas y abreviaturas

API: Interfaz de programación de aplicaciones

Bps: bits por segundo

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y El Caribe

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FIA: Fundación para la Innovación Agraria (Chile)

IoE: Internet de todo

IoT: Internet de las Cosas

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones

Kbps: Kilobits por segundo

M2M: máquina a máquina

M2P. Máquina a persona

Mbps: Megabits por Segundo

NFC: Comunicaciones de campo cercano

ODM: Objetivos de Desarrollo del Milenio

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

PCA: Análisis de componentes principales

P2P: Persona a persona

PLB: Baliza de localización personal

SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

SWRL: Lenguaje de reglas Semántica Web

SQWRL: Lenguaje de reglas web mejorado por consulta semántica

UAV: (del inglés Unmanned Aerial Vehicle)

WLAN: Red de área local inalámbrica

WSN: Red de sensores inalámbricos

WWAN: Red inalámbrica de área amplia

4G: Móvil de cuarta generación

5G: Móvil de quinta generación



## Referencias

- Aguayo, R. (2012). 10 aplicaciones útiles para la agricultura. Criando Naranjos. <https://criandonaranjos.com/2012/12/17/262/>
- Agüera Vega, J., & Pérez Ruiz, M. (2013). Agricultura de precisión hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente*, 2013 (105), 12-27.
- Aqeel-ur-, R., & Zubair A., S. (2012). Smart Agriculture. En J. Ahmed Zubairi (Ed.), *Applications of Modern High Performance Networks* (pp. 120-129). BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS. <https://doi.org/10.2174/978160805077210901010120>
- Arista Cortes, J. (2020). Sistemas de Información Geográfica (SIG), uso de APIs para mapeo en línea y sus Aplicaciones en Agricultura. Tercer Seminario Temático “La geomática aplicada a la Agricultura de Riego”. 12 de noviembre de 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMIEI-9. México. 25pp).
- BANCO MUNDIAL. (2008). Informe sobre el desarrollo mundial 2008: Agricultura para el desarrollo. Banco Mundial.
- Barreiro Elorza, P., & Valero Ubierna, C. (2014). Drones en la agricultura. *Tierras de Castilla y León: Agricultura*, 220, 36-42.
- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). Industria-40-Fabricando-el-Futuro.
- Bautista, F., Pacheco, A., & Dubrovina, I. (2019). Climate change indicators software for computing climate change indices for agriculture. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 343. <https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1770>
- Betancourt, C. A. (2018). La Transformación Digital Del Sector Agrario Español. Coag.
- Bongiovanni, R., Mantovani, E. C., Best, S., & Roel, Á. (2006). Agricultura de precisión integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. *Procisur/IICA*.
- Bonneau, V., Copigneaux, B., Probst, L., & Pedersen, B. (2017). Industry 4.0 in agriculture: Focus on IoT aspects. Directorate-General Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
- Burritt, R., & Christ, K. (2016). Industry 4.0 and environmental accounting: A new revolution? *Asian Journal of Sustainability and Social Responsibility*, 1(1), 23-38. <https://doi.org/10.1186/s41180-016-0007-y>
- Bustamante, W. O., Velázquez, J. F., & Capurata, R. E. O. (2016). Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico. 430.
- Cabello, M. V. N. (2010). Introducción a las bases de datos relacionales. Vision Libros.
- Campero, J. C. C. N. del P. (2016). ¿La cuarta revolución industrial en Bolivia? *Friedrich-Ebert-Stiftung Bolivia*, 28.
- Campoverde Marca, A. M., Hernández Rojas, D. L., & Mazón Olivo, B. E. (2015). Cloud Computing para el internet de las cosas. Caso de estudio orientado a la agricultura de precisión.
- Carrillo, J. M., Castillo, L. G., & García, J. T. (2016). El Uso De Impresoras 3d En La Enseñanza De Asignaturas De Hidráulica.
- Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A., & Winschel, C. (2018). Preprocesamiento de imágenes satelitales del sensor sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6. 0. Instituto de Clima y Agua. CIRN INTA Castelar, 1-31.



- Castaño, A., & Piattini, M. (1999). Fundamentos y modelos de bases de datos. Madrid, España: Alfaomega.
- Clercq, M. D., Vats, A., & Biel, A. (2018). Agriculture 4.0: The Future Of Farming Technology. 30.
- CODEX ALIMENTARIUS, (2004), Informe de la sesión n° 27 de la comisión del Codex Alimentarius, Ed. FAO y WHO, Roma.
- Coelho, AD, Dias, BG, de Oliveira Assis, W., de Almeida Martins, F., y Pires, RC (2020). Monitoreo de sensores atmosféricos y de humedad del suelo con Internet de las cosas (IoT) aplicado en agricultura de precisión. 2020 XIV Conferencia de Enseñanza de Tecnologías Aplicadas a la Electrónica (TAEE). doi: 10.1109 / taee46915.2020.9163766
- Cohen-Manrique, C. S., Rodríguez-Manrique, J. A., & Romero Lázaro I. J. (2018). Lógica difusa aplicada a los sistemas de control en cultivos y distritos de Riego en la Subregión Sabana del Departamento de Sucre, Colombia. Gestión del Conocimiento perspectiva multidisciplinaria. Información tecnológica, 29(5), (pp 335-344).
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, CONAGUA (2016). Estadísticas del Agua en México, edición 2016 [en línea]. Ciudad de México (México): Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 275 p. <[http://201.116.60.25/publicaciones/EAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf)> [consulta: 09/10/2017]
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México.
- Consumidor. (2018). Información para consumidores. Obtenido de <https://www.consumidor.ftc.gov/articulos/s0018-aplicaciones-moviles-que-son-y-como-funcionan>
- Curtis, I. S.; Power, J. B.; Blackhall, N. W.; Laats, A. M. M. and Davey, M. R. (1994). Genotype-independent transformation of lettuce using *Agrobacterium tumefaciens*. J. Exp. Bot. 45(10):1441-1449.
- D'Urso, G., Richter, K., Calera, A., Osann, M. A., Escadafal, R., Garatuza-Pajan, J., Hanich, L., Perdigão, A., Tapia, J. B., & Vuolo, F. (2010). Earth Observation products for operational irrigation management in the context of the PLEIADeS project. Agricultural Water Management, 98(2), 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.020>
- del Val Román, J. L. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. In Proceedings of the Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII, Valencia, Spain (p. 10).
- Deshmane, S. (2015). Using the Lambda Architecture on a Big Data Platform to Improve Mobile Campaign Management. 11.
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Universidad Complutense de Madrid., 78.
- Escobar, D. F. (2000). Introduction to GIS. <https://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/IntroduccionSIG/GISModule/GISTheory.htm>
- Espinosa, J. L. E., Vélez, E. P., Tijerina, L., & Magdaleno, H. F. (2015). Sistema De Monitoreo Satelital Para La Evaluación De La Agricultura En El Distrito De Riego 038, Rio Mayo. 6.



- Espinoza, M. M., Andrade, R. I. M., Rojas, J. A., & Falcón, V. V. (2017). Tecnologías de la información y comunicación en la agricultura Information and communication technologies in agriculture. 12.
- Éva kuruczleki, Anita Pelle, Renáta Laczi, & Boglárka Fekete. (2016). The Readiness of the European Union to Embrace the Fourth Industrial Revolution. University of Primorska.
- Ezcaray, I. J., Teknikoa, G. M. E., & Ingeniarien, N. (2012). Agricultura De Precisión: Elaboración De Mapas De Consumo Y Resbalamiento trabajo Fin De Carrera. Universidad Pública de Navarra.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2015). Agricultura de Conservación. Preguntas más frecuentes. Departamento de Agricultura y Protección del consumidor. FAO. <http://www.fao.org/ag/ca/es/11.html>.
- FAO. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. COMO ALIMENTAR AL MUNDO 2050.
- Fernández de Castro Fabré, A., & Albóniga Gil, R. A. (2011). Una herramienta actual para mejorar nuestra agricultura: los GPS. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3), 11–14.
- Fernández Prieto, L. (2016). Caminos del cambio tecnológico en las agriculturas españolas contemporáneas, 95–146. <https://doi.org/10.13140/2.1.3227.1363>
- Fernández, L. P. (2001). Caminos del cambio tecnológico en las agriculturas españolas contemporáneas. <https://doi.org/10.13140/2.1.3227.1363>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- franzpc. (2019). Lista de índices espectrales en Sentinel 2 y Landsat. El blog de franz. <https://acolita.com/lista-de-indices-espectrales-en-sentinel-2-y-landsat/>
- Fuentes, S., & Tongson, E. (2018). Advances and requirements for machine learning and artificial intelligence applications in viticulture. *Wine & Viticulture Journal*, 33(3), 47–52. Retrieved from <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fsr&AN=130215635&lang=es&site=eds-live>
- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Revista Ciencia y Tecnología*. Recuperado de [http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia\\_y\\_tecnologia/ciencia\\_y\\_tecno\\_8.html](http://www.palermo.edu/ingenieria/Ciencia_y_tecnologia/ciencia_y_tecno_8.html).
- GARCÍA, M., Quintero, R., López-Murguía, A., (2002). *Biotecnología alimentaria*, Ed. Limusa, México.
- García, N. H. V. (2015). Operación de canales: Conceptos generales.
- Garrity, J. (2015). Harnessing the Internet of Things for global development.
- Garzón Rodríguez, W. A. (2020). Agricultura de precisión con drones [Tesis de Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio UCC. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/18079>
- gisadminbeers. (2017). Combinaciones RGB de imágenes satélite Landsat y Sentinel. Gis&Beers. <http://www.gisandbeers.com/combinacion-de-imagenes-satelite-landsat-sentinel-rgb/>
- gisadminbeers. (2018). Cómo interpretar una imagen satélite a falso color. Gis&Beers. <http://www.gisandbeers.com/interpretar-una-imagen-satelite-falso-color/>



- gisadminbeers. (2019). Cálculo del índice de vegetación SAVI. Gis&Beers. <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-vegetacion-savi/>
- gisadminbeers. (2020). Limitaciones del índice de vegetación NDVI. Gis&Beers. <http://www.gisandbeers.com/limitaciones-del-indice-vegetacion-ndvi/>
- González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016). Drones aplicados a la agricultura de precisión. *Publicaciones e Investigación*, 10, 23-37.
- González, J. C., Dolores, O. S. M., & Ángeles, J. M. (2018). Alternativas De Medición En Módulos De Riego Rigrat Del D.R.010, 074, 108 Y 109. 9.
- González, J., Blanco, S., Muñoz, S., de Heredia, E. L., Corrales, J. L. B., Aguilera, R., & Aguilera, M. (2019). EQUIPO TÉCNICO NORTE. 64.
- Goya, W. A., Andrade, M. R. D., Zucchi, A. C., Gonzalez, N. M., Pereira, R. D. F., Langona, K., Carvalho, T. C. M. D. B., Mangs, J.-E., & Sefidcon, A. (2014). The Use of Distributed Processing and Cloud Computing in Agricultural Decision-Making Support Systems. 2014 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing, 721-728. <https://doi.org/10.1109/CLOUD.2014.101>
- Grasso, A., & Díaz-Zorita, M. (2018). Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización (Edición para Fertilizar Asociación Civil). Edición para Fertilizar Asociación Civil.
- Guerbaoui, M., El Afou, Y., Ed-Dahhak, A., Lachhab, A. y Bouchikhi, B. (2013). Sistema de riego por goteo automatizado basado en PC. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Ingeniería*, 5 (1), 221-225.
- Guillén-García, C. E., Mogollón -Rojo, A., Dávila-Albarrán, M. J., & Boscán-Árraga, K. (2019). Monitoreo de la producción de caña panelera mediante herramientas de SIG y teledetección, años 2016-2017, Mérida, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 2(63), 249-268. <https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.9>
- Gurovich, L. (2015). Estudio de tasas de riego y eficiencia de métodos de riego para el área de convento viejo, 4:12-26.}
- Haq, M., Akhtar, M., Muhammad, S., Paras, S., & Rahmatullah, J. (2012). Techniques of Remote Sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: A case study of Sindh province, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(2), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.07.002>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- IBM. (2016). Five ways agriculture could benefit from artificial intelligence. Watson Blog. <https://www.ibm.com/blogs/watson/2016/12/five-ways-agriculture-benefit-artificial-intelligence/>
- IOF. (2020). Senderos tecnológicos para el cultivo de hortalizas en la UE - IOF2020— Utilización del ecosistema digital—IoF2020. <https://www.iof2020.eu/use-case-catalogue/vegetables/digital-ecosystem-utilisation>
- Janc, K., Czapiewski, K., & Wójcik, M. (2019). In the starting blocks for smart agriculture: The internet as a source of knowledge in transitional agriculture. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91, 100309. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100309>
- Jornadas de Automática. (2017). Actas de XXXVIII Jornadas de Automática. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- Khelifa, B., Amel, D., Amel, B., Mohamed, C., & Tarek, B. (2015). Smart irrigation using internet of things. 2015 Fourth International Conference on Future Generation Communication Technology (FGCT). doi:10.1109/fgct.2015.7300252



- Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2008). Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(7), 1379-1387. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>
- Kopetz, H. (2011). Internet of Things. En H. Kopetz, *Real-Time Systems* (pp. 307-323). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8237-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8237-7_13)
- Kreimer, P. (2003). Las TICs en la agricultura de precisión, ceditec (centro de difusión de tecnologías ETSIT-UPM).
- Kulkarni, E., & Kulkarni, R. B. (2016). WEKA Powerful Tool in Data Mining. *International Journal of Computer Applications*, 9–15. Retrieved from <http://research.ijcaonline.org/rtdm2016/number2/rtdm2575.pdf>
- Kumar, M. S., & J, P. (2017). Analysis of Network Function Virtualization and Software Defined Virtualization. *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*, 1(4), 122. <https://doi.org/10.30630/joiv.1.4.40>
- Lima, P. T., Castillo, J. G. C., & Barradas, R. A. (2011). Vulnerabilidad agroambiental frente al cambio climático. *Agendas de adaptación y sistemas institucionales*. 28.
- Lohr, S. (2012). *The Age of Big Data*. 5.
- Lomelí, J. (2020). La problemática y retos de los Distritos de Riego en México, [https://www.youtube.com/watch?v=35FCq75OBIg&ab\\_channel=Irrigaci%C3%B3nCOMIEI](https://www.youtube.com/watch?v=35FCq75OBIg&ab_channel=Irrigaci%C3%B3nCOMIEI).
- Lopez, J. E. G., Chavez, J. C., & Sanchez, A. K. J. (2017). Modelado de una red de sensores y actuadores inalámbrica para aplicaciones en agricultura de precisión. 2017 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC), 109-116. <https://doi.org/10.1109/MHTC.2017.7926210>
- López-Pintor, D. L.-P. M. (2016). Análisis de Casos de Estudio sobre Industria 4.0 y Clasificación según Sectores de actividad y Departamentos empresariales. *Universitat Politècnica De València*.
- Lugo, L. G., & Villanueva, N. H. G. (2010). Subcoordinación De Tecnología Apropiaada E Industrial Coordinación De Hidráulica.
- Madrid, I. (2017). Área: Ingeniería en Informática. 79.
- Maldonado, S. G., & Caceres, E. S. V. (2018). Propuesta Para El Desarrollo De Una Aplicación Sig Móvil Orientada A La Comercialización De Productos Agrícolas. 44.
- Manuel Antonio Martinez Guzman. (2013). *Tecnologías Para El Uso Sostenible Del Agua: Una Contribución a la Seguridad Alimentaria y la Adaptación Al Cambio Climático* (p. 70). FAO.
- Matabi. (2018). La Agricultura 4.0 y la revolución del sector agrícola—Matabi. <https://www.goizper.com/blogmatabi/elaliadoparatuhuertoyjardin/agricultura-4-0/>
- Mathivanan, S., & Jayagopal, P. (2018). A Big Data Virtualization Role in Agriculture: A Comprehensive Review. 17.
- McFeeters, SK (1996). El uso del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) en delimitación de características de aguas abiertas. *Revista Internacional de Percepción Remota*, 17, 1425-1432.
- Mejía-Saenz, E., Exebio-García, A., Palacios-Vélez, E., & Santos-Hernández, A. L. (2003). Mejoramiento Del Manejo De Distritos Y Módulos De Riego Utilizando Sistemas De Información Geográfica. 11.



- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación Secretaría General Técnica. (2019). Estrategia De Digitalización Del Sector Agroalimentario Y Forestal Y Del Medio Rural.
- Mooney, P., & Grupo, E. T. C. (2019). La insostenible agricultura 4.0. Digitalización y poder corporativo en la cadena alimentaria. Ver en < <https://bit.ly/3ep6Rxh>.
- Molina, J. M., Jiménez, M., & Ruiz, A. (2010). Supervisión y control de instalaciones de riego mediante dispositivos móviles. 3.
- Montesinos, José. (2013). "Red de sensores auto configurable mediante tecnologías ZigBee y Arduino con monitorización por aplicación Android". Tesis de grado. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Montoya, E. A. Q., Colorado, S. F. J., Golondrino, G. E. C., & Muñoz, W. Y. (2017). Propuesta de una Arquitectura para Agricultura de Precisión Soportada en IoT. RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, 24, 39-56. <https://doi.org/10.17013/risti.24.39-56>
- MORCILLO, G., CORTÉS, E., GARCÍA, J.L., (2013). Biotecnología y alimentación, Ed. UNED, Madrid.
- Moreda, P. (2020). 4ta Revolución Industrial: Industria 4.0. 11.
- Morgan, M. y Ess, D. 1997. The Precision-Farming Guide for Agriculturalists. John Deere Publishing, Moline, IL. 117pp.
- Mosquera, F. M., Piedrahita, D. C., Torres, A. A., Camposano, O. C., & Parrales, I. R. (2020). Actualidad De Las Tecnologías De La Información Y Comunicación Tic'S En La Producción Agropecuaria. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3927015>
- Nagel, J. (2012). Principales barreras para la adopción de las TIC en la agricultura y en las áreas rurales. 54.
- Olvera, M. D. S., Ojeda, W. B., Bahena, G. D., & Alpuche, O. G. (2014). Participación y apropiación de la modernización y tecnificación del riego en Chihuahua México. 1, 15.
- Ortiz Noriega, A. E., Félix Enríquez, S., Buentello Martínez, C. P., & Gómez, L. A. (2015). Investigación educativa en Latinoamérica (Centro de). Guadalajara.
- Ospina Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Vega-Rodríguez, E. E., Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Darghan-Contreras, A. E., Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Rodríguez-Molano, L. E., & Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmósfera*, 30(1), 63-76. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.01.06>
- Ospina-Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Vega-Rodríguez, E. E., Darghan-Contreras, A. E., & Rodríguez-Molano, L. E. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmósfera*, 30(1), 63-76.
- Padró, J.-C., Muñoz, F.-J., Ávila, L., Pesquer, L., & Pons, X. (2018). Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry. *Remote Sensing*, 10(11), 1687. <https://doi.org/10.3390/rs10111687>
- Palacios-Vélez, E. (1996). Métodos de distribución y eficiencias en el uso del agua en los sistemas de riego. Diplomado en diagnóstico, planeación, uso eficiente del Agua y la





- Energía Eléctrica y mejoramiento de la productividad en las unidades de riego para el desarrollo rural. Colegio de Postgraduados
- Palerm Viqueira, J., Collado Moctezuma, J., & Rodríguez Haros, B. (2010). Retos para la administración y gestión del agua de riego. En *El agua en México: Cauces y encauces* (Primera edición 2010).
- Palmer, N. (2012). Las TIC y la agricultura en el contexto del ‘crecimiento verde’. 9.
- Pat Mooney, P., & Grupo ETC. (2018). La insostenible Agricultura 4.0 Digitalización y poder corporativo en la cadena alimentaria. 52.
- Peña, E. (2007). Eficiencias del uso del agua en distritos de riego en México [Water use efficiencies in irrigation districts in Mexico]. *Gaceta del IMTA*, (3).
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2017). Definición de base de datos. *Definición.de*. <https://definicion.de/base-de-datos/>
- Pérez Vázquez, A., Leyva Trinidad, D. A., & Gómez Merino, F. C. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1). <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.857>
- PÉREZ, Bladimir J.; KOO, José M.; GARCÍA, Fernando & CARMONA, Juan (2014). Automatización, monitoreo y control remoto de un sistema de riego agrícola con código abierto [en línea]. En: 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, LACCEI'2014 (22-24/07/2014). Guayaquil (Ecuador): LACCEI – ESPOL. p. 1-9. ISBN: 978-0-9822896-7-9 <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP132.pdf> [consulta: 10/10/2017]
- Pérez, J., Urdaneta, E., & Custodio, Á. (2014). Metodología para el diseño de una red de sensores inalámbricos.
- Pino V., E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: Un futuro de alta tecnología. *Idesia (Arica)*, ahead, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- Ponvert Delisles, D., & Quan, A. L. (2013). Uso de las imágenes de satélites y los SIG en el campo de la Ingeniería Agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 75-80.
- PRIMORDIALES. (2018). Agricultura y Tecnología en la Cuarta Revolución Industrial. Primordiales. <https://www.primordiales.com.mx/agricultura-y-tecnologia-en-la-cuarta-revolucion-industrial/>
- Qgis. (2018). Qgis. Obtenido de <https://www.qgis.org/es/site/>
- Rahangadale, V., & Choudhary, D. (2011). On fuzzy logic based model for irrigation controller using Penman-Monteith equation. *Gondia, India: MIET*.
- Ramón Fernández, F. (2020). Inteligencia Artificial y Agricultura: Nuevos retos en el sector agrario. *CAMPO JURÍDICO*, 8(2), 123-139. <https://doi.org/10.37497/revcampojur.v8i2.662>
- Rendón-Sustaita, G. del C., Domínguez-López, J. Á., Martínez-Rodríguez, M. A., Garay-Molina, Ó. A., & Juárez-Pedraza, D. I. (2018). Sistema Inteligente para controlar sistemas de riego en México. *Ventana Informatica*, 37. <https://doi.org/10.30554/ventanainform.37.2721.2017>
- Ribeiro, J. G., Marinho, D. Y., & Espinosa, J. W. M. (2018). AGRICULTURA 4.0: DESAFIOS À PRODUÇÃO DE ALIMENTOS E INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS. 7.



- Roberto. (2017). Cálculo del índice NDWI. Gis&Beers. <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-ndwi-diferencial-de-agua-normalizado/>
- RODRIGO, O. (2016). Drones sobre o campo: avanços tecnológicos ampliam as possibilidades do uso de aeronaves não tripuladas na agricultura. Pesquisa FAPESP.
- Rojas, A. C. (2019). El desarrollo en Centroamérica y el plan México-CEPAL. Economía y sociedad. <https://economia.nexos.com.mx/?p=2354>
- Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). LA INTERNET DE LAS COSAS— UNA BREVE RESEÑA. 83.
- Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. Revista UIS Ingenierías, 19(2), 177-191. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2011). Inteligencia artificial: Un enfoque moderno. Pearson Educación.
- Saénz, E. M., Vélez, E. P., García, A. E., & Hernández, A. L. S. (2002). Problemas Operativos En El Manejo Del Agua En Distritos De Riego. 10.
- SAGARPA. (2010a). Retos y oportunidades del sistema agroalimentario de México en los próximos 20 años. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/retosyopportunidades.pdf> <https://docplayer.es/5028457-Retos-y-oportunidades-del-sistema-agroalimentario-de-mexico-en-los-proximos-20-anos.html>
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y ciencias del agua, 5(2), 177-183.
- SALCEDO TORRES, Abio Diógenes (2015). Diseño de un sistema automatizado para riego por goteo para palta Hass [en línea]. Tesis (Ingeniero Electrónico). Lima (Perú): Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. 64 p. + Anexos <<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6072>> [consulta: 09/10/2017]
- Sanchez, J. M. (2019). Las mejores herramientas de Big Data. Thinking for Innovation. <https://www.iebschool.com/blog/mejores-herramientas-big-data/>
- Sánchez-Olarte, J., Argumedo-Macías, A., Álvarez-Gaxiola, J. F., Méndez-Epinoza, J. A., & Ortiz-Espejel, B. (2015). Conocimiento tradicional en prácticas agrícolas en el sistema del cultivo de amaranto en Tochimilco, Puebla. Agricultura Sociedad y Desarrollo, 12(2), 237. <https://doi.org/10.22231/asyd.v12i2.151>
- Sanghera, A. (2018). How Adoption Of Blockchain Technology Will Revolutionise Agriculture. Inc42 Media. <https://inc42.com/resources/blockchain-technology-agriculture/>
- Santamaria, C. (2012). Entorno Geografico. Obtenido de <http://entorno-geografico.blogspot.com.co/2012/05/componentes-de-un-sig.html>
- Sarmiento, B., Hernández, M., & Gómez, X. (2014). Herramientas y Antecedentes Big Data. <http://online.fliphtml5.com/yac1/nuts/index.html#p=30>
- Senthilvadivu, S., Kiran, S. V., Devi, S. P., & Manivannan, S. (2016). Big Data Analysis on Geographical Segmentations and Resource Constrained Scheduling of Production of Agricultural Commodities for Better Yield. Procedia Computer Science, 87, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.130>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), (2013). “Los municipios que generan más valor agrícola. Número 14



- Sifuentes, E. I., Quintana, J. G. Q., Macías, J. C., & González, V. M. C. (2013). *IrriModel: Programación integral y gestión del riego a través de Internet*. 27.
- Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V. M., Salinas, D. A., & Quintana, J. G. (2016). *Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: Aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México*. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(2), 149-168.
- Silberchatz, K. (1998). *Fundamentos de bases de datos*. Madrid : McGraw-Hill.
- Sinergise, S.-H. by. (s. f.-a). *NDWI Normalized Difference Water Index*. Sentinel-Hub custom scripts. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndwi/>
- Sinergise, S.-H. by. (s. f.-b). *Simple RGB Composites (Sentinel-2)*. Sentinel-Hub custom scripts. Recuperado 1 de noviembre de 2020, de <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/composites/>
- Sivakumar, M. V. K., Roy, P. S., Harmsen, K., & Saha, S. K. (2004). *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*. In *Proceedings of the Training Workshop in Dehradun*, 1182.
- Smarandache, F., & Leyva-Vázquez, M. (2018). *Fundamentos de la lógica y los conjuntos neutrosóficos y su papel en la inteligencia artificial*. Infinite Study.
- Squartecchis, A. (2019). *Qué es WGS84?* Support Portal. <https://support.virtual-surveyor.com/es/support/solutions/articles/1000261351-qu%C3%A9-es-wgs84->
- Sung, J. (2018). *The Fourth Industrial Revolution and Precision Agriculture*. En S. Hussmann (Ed.), *Automation in Agriculture—Securing Food Supplies for Future Generations*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71582>
- Sutton, R. K. (Ed.). (2015). *Green Roof Ecosystems (Vol. 223)*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7>
- Tapankumar Basu, Vijaya Ravindra Thool, Dr. Ravindra C. Thool, & Harsh R. Birhade. (2006). *Artificial Neural Network Controller for Climate Control inside the Greenhouse Model*. *Computers in Agriculture and Natural Resources*, 23-25 July 2006, Orlando Florida. *Computers in Agriculture and Natural Resources*, 23-25 July 2006, Orlando Florida. <https://doi.org/10.13031/2013.21890>
- Tapankumar Basu, Vijaya Ravindra Thool, Ravindra C. Thool, & Anjali C. Birajdar. (2006). *Computer Based Drip Irrigation Control System with Remote Data Acquisition System*. *Computers in Agriculture and Natural Resources*, 23-25 July 2006, Orlando Florida. *Computers in Agriculture and Natural Resources*, 23-25 July 2006, Orlando Florida. <https://doi.org/10.13031/2013.21856>
- Taracido, E. J., Méndez, S. V., Costamagna, P., Rozzi, S. P., & Rodríguez, M. M. (2014). *Los Sistemas De Información Territorial (Sit) Como Herramientas Estratégicas Para El Desarrollo Económico Local*. 15.
- Thompson, L. J., & Puntel, L. A. (2020). *Transforming Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Multispectral Sensor into a Practical Decision Support System for Precision Nitrogen Management in Corn*. *Remote Sensing*, 12(10), 1597. <https://doi.org/10.3390/rs12101597>
- Torres, Raúl (2003). *Nuevos paradigmas en la actual revolución científica tecnológica*. San José, Costa Rica. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=GENxvGaB8pAC&pg=PA5&dq=que+es+la+terce+ra+revolucion+industrial&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj8->



- WD6rXZAhWBjlkKHbaLBLAQ6AEISjAH#v=onepage&q=que%20es%20la%20tercera%20revolucion%20industrial&f=false
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, N., Arquero, O., & Peña, J. M. (2015). High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology. *PLOS ONE*, 10(6), e0130479. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>
- Tovar Soto, J. P., Solórzano Suárez, J. D. los S., Badillo Rodríguez, A., & Rodríguez Cainaba, G. O. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: Estado actual. *Lámpsakos*, 22, 86-105. <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>
- United Nations. (2003). *Water for people-water for life: The United Nations world water development report* (p. 36).
- Valero Flores, F. (2019). Blockchain y el agua: Un valor añadido para un derecho universal. <https://smartwatermagazine.com/blogs/fernando-valero-flores/blockchain-and-water-added-value-a-universal-right>
- Vani, V., & Mandla, V. R. (2017). Comparative Study of NDVI and SAVI vegetation Indices in Anantapur district semi-arid areas. *International Journal of Civil Engineering & Technology*, 8(4), 287-300.
- Velasco, I., Robles, B. D., & Jaimes, S. (1996). Transferencia y adaptación de un sistema de información geográfica a asociaciones de usuarios de distritos de riego transferidos. 16.
- Vermeulen, S. J.; Campbell, B. M. and Ingram, J. S. I. (2012). Climate change and food systems. *Ann. Review Env. Res.* 37:195-222. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>.
- Williams, G. W. (2007). *El Cambio Técnico y La Agricultura: La Experiencia De Los Estados Unidos E Implicaciones Para México*. 13.
- Xie, N. F., Zhang, X. F., Sun, W., & Hao, X. N. (2015). Research on Big Data Technology-Based Agricultural Information System. 3.
- Yang, C. (2018). High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018226>
- Yousefi, M. R., & Razdari, A. M. (2015). Application of Gis and Gps in Precision Agriculture (a Review). *Int. J. Adv. Biol. Biom. Res.*, 3.
- Zeng, C., King, D. J., Richardson, M., & Shan, B. (2017). Fusion of Multispectral Imagery and Spectrometer Data in UAV Remote Sensing. *Remote Sensing*, 9(7), 696. <https://doi.org/10.3390/rs9070696>