

# ***Primera aproximación en estudios de salinidad de suelo en la Pampa Húmeda argentina utilizando imágenes SAR e inversión de modelos electromagnéticos***

Por ***Federico Machado***

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

**MAGISTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

*Noviembre, 2020*

©IG-CONAE 2020

©FaMAF-UNC 2020

DIRECTOR

***Magister Romina Solorza***

SAOCOM-CONAE, Falda del Cañete, Córdoba.



Esta obra está bajo una licencia [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

A mi familia

---

## Agradecimientos

---

Al equipo SAOCOM, a Laura Frulla, quién en su momento confió y me presentó esta oportunidad para el cursado de la maestría, a Romina Solorza por la dirección y contención a lo largo del trabajo, a Juan Manuel Cáceres por la predisposición a las dudas y consultas que fueron surgiendo investigando el tema.

Al Equipo de Mediciones in Situ, y particularmente a Miguel Rodríguez Maiztegui, quien sin su apoyo en el pedido de los datos proporcionados de la red telemétrica de CONAE este trabajo no hubiera sido posible.

Al Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara, y a todo el equipo, quién supo brindar el espacio para el desarrollo de la pasantía en Italia y su asistencia técnica.

A mis compañeros de maestría Yenni Roa, Giuliana Beltramone, Juan Pablo Clemente, Diego Carcedo, Alejandro Testa, Sofía Viotto, Valentina Brailovsky, Cynthia Garay, Victoria Marinelli, María Paula Álvarez, Mauro López Gregori, Guillermo O'Connor, Santiago Bustos Revol, Jonatan Mogadouro, Daniel Castellano, José Benitez, Santiago Henn, Denis Martinez, Ariel Sosa Visconti, Ignacio Pintos, Gustavo Santos y al Instituto Gulich, CONAE y autoridades por todo lo compartido en estos años de aprendizaje.

---

## Resumen

---

La presente investigación tiene por objetivo examinar la capacidad que tienen los sistemas SAR polarimétricos para la detección y monitoreo de salinidad, particularmente en suelos agrícolas, donde esta problemática no solo tiene impactos sobre la producción, sino en las propiedades físico-químicas y el balance ecológico del suelo.

Para ello se utilizaron imágenes satelitales SAR COSMO-SkyMed (banda X, 9.6 GHz) y SAOCOM (banda L, 1.275 GHz) realizando la inversión de modelos electromagnéticos teóricos y semi-empíricos para la detección y monitoreo de esta problemática, evaluando el potencial del uso de información a distintas frecuencias. En forma complementaria, se realizó un análisis exploratorio con imágenes ópticas.

El estudio se realizó en el *core site* de la misión SAOCOM, ubicado en los departamentos de Unión y Marcos Juárez de la provincia de Córdoba, que cuenta con estaciones telemétricas de medición de parámetros biofísicos como humedad del suelo y salinidad, donde se encuentran cultivos representativos de la Pampa Húmeda.

En la región de las microondas del espectro electromagnético, la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica tienen un comportamiento diferencial: mientras la parte real es independiente de la salinidad del suelo, la parte imaginaria es altamente sensible a las variaciones de la conductividad eléctrica, particularmente a altos niveles de humedad volumétrica y a bajas frecuencias. En este principio se basa la detección de salinidad en el suelo.

Este estudio representa así un primer enfoque usando imágenes en bandas X y L para el estudio de la salinidad del suelo en vistas a la creación de un producto operativo de salinidad con imágenes SAOCOM, útil para el monitoreo de suelos agrícolas de la Pampa Húmeda afectados por esta problemática, teniendo en cuenta su extensión hacia zonas áridas y semi-áridas. Los resultados obtenidos con el modelo POM (Modelo de Física Óptica) corregido empíricamente con datos SAOCOM muestran resultados promisorios, con valores de la parte imaginaria de la constante dieléctrica en los sitios de validación no salinos en el rango de 4,497 a 17,711, incluso en áreas con cultivos de buen desarrollo, describiendo un marco de trabajo útil para futuras implementaciones de metodologías con imágenes SAR para la detección y monitoreo de esta problemática.

**Palabras clave:** Salinidad del suelo, Teledetección, Imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR), COSMO Sky-Med, SAOCOM

---

## Abstract

---

The present investigation has as its objective the examination of the capacity that SAR polarimetric systems have towards the detection and monitoring of soil salinity, particularly in agricultural soils, where this problematic not only impacts production, but also physical-chemical properties and ecological balance of soils.

SAR satellite images from both COSMO-SkyMed (X-band, 9.6 GHz) and SAOCOM (L-band, 1.275 GHz) were subsequently used to perform the inversion of theoretical and semi-empiric electromagnetic models for the detection and monitoring of this problematic, evaluating the potential of the use of the information in different frequencies. In a complementary way, an exploratory analysis was also performed with optical images.

The study was performed in the *core site* of the SAOCOM mission in the departments of Unión and Marcos Juárez in Córdoba province, where telemetric stations are located to measure bio-physical parameters such as soil moisture and salinity, and where representative crops of the Humid Pampas are also present.

In the microwaves region of the electromagnetic spectrum, the real part and the imaginary part have a differential behaviour: while the real part is independent of soil salinity, the imaginary part is highly sensitive to variations of soil conductivity, particularly at high levels of soil moisture and lower frequencies. It is in this principle that the detection of soil salinity in this study is based.

This study therefore represent a first approach using X- and L- band images for the study of soil salinity with the purpose of the creation of an operative product of soil salinity with SAOCOM images, useful for the monitoring of affected agricultural soils of the Humid Pampas, aimed to extend it towards arid and semiarid zones. The results obtained with empirically corrected POM model with SAOCOM data show promising results, with values of the imaginary part of the dielectric constant in non-saline validation sites in the range of 4.497 to 17.711, describing a framework towards future implementations of methodologies with SAR images for the detection and monitoring of this problematic.

**Keywords:** Soil Salinity, Remote Sensing, SAR, COSMO Sky-Med, SAOCOM

---

# Índice de Contenidos

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivo principal . . . . .	3
1.2.1. Objetivos secundarios . . . . .	3
1.3. Estructura de la tesis . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. El suelo y la salinidad . . . . .	5
2.2. Extensión de la salinización de suelo . . . . .	6
2.3. Medición de la salinidad . . . . .	7
2.4. Efecto de la salinidad en la constante dieléctrica del suelo . . . . .	9
2.5. Sistemas de teledetección con tecnología SAR . . . . .	11
2.5.1. Geometría de adquisición . . . . .	13
2.5.2. Distorsiones radiométricas . . . . .	15
2.5.3. Distorsiones topográficas y geométricas . . . . .	16
2.5.4. Polarización . . . . .	16
2.5.5. Interacción con el blanco . . . . .	17
2.5.6. Penetración de la onda electromagnética . . . . .	18
2.6. Modelado electromagnético . . . . .	20

2.6.1.	Modelo de Dubois . . . . .	21
2.6.2.	Modelo de Perturbación Pequeña - SPM . . . . .	21
2.7.	Estudios con imágenes radar de la salinidad de suelo . . . . .	22
<b>3.</b>	<b>Área de estudio</b>	<b>27</b>
3.1.	Descripción del área de estudio . . . . .	27
3.1.1.	Geomorfología . . . . .	29
3.1.2.	Edafología . . . . .	29
3.2.	Salinidad en Córdoba y en el área de estudio . . . . .	30
<b>4.</b>	<b>Materiales y Métodos</b>	<b>32</b>
4.1.	Análisis óptico . . . . .	32
4.1.1.	Características de las imágenes . . . . .	33
4.1.2.	Metodología . . . . .	34
4.2.	Análisis COSMO-SkyMed . . . . .	35
4.2.1.	Características de las imágenes . . . . .	35
4.2.2.	Pre-procesamiento de imágenes satelitales . . . . .	36
4.2.3.	Procesamiento . . . . .	37
4.2.3.1.	Aplicación del Modelo de Dubois . . . . .	38
4.2.3.2.	Aplicación del Modelo SPM . . . . .	38
4.2.3.3.	Aplicación del Modelo Combinado . . . . .	39
4.2.4.	Enmascarado de zonas no válidas . . . . .	39
4.3.	Análisis SAOCOM . . . . .	41
4.3.1.	Características de las imágenes . . . . .	41
4.3.2.	Metodología . . . . .	42
4.3.3.	Pre-procesamiento de las imágenes . . . . .	43
4.3.4.	Procesamiento . . . . .	43
4.4.	Datos de campo: Red telemétrica de medición . . . . .	44
4.4.1.	Humedad del suelo . . . . .	44
4.4.2.	Conductividad eléctrica . . . . .	45
4.4.3.	Análisis de los datos medidos . . . . .	45

<b>5. Resultados</b>	<b>47</b>
5.1. Resultados con imágenes ópticas: Sentinel-2 . . . . .	47
5.2. Resultados con imágenes SAR COSMO-SkyMed: Banda X . . . . .	51
5.3. Resultados con imágenes SAR SAOCOM: Banda L . . . . .	54
5.3.1. Parte real de la constante dieléctrica . . . . .	54
5.3.2. Magnitud de la constante dieléctrica . . . . .	57
5.3.3. Parte imaginaria de la constante dieléctrica . . . . .	59
<b>6. Conclusiones</b>	<b>62</b>
<b>Anexos</b>	<b>72</b>
<b>A. Conductividad eléctrica y humedad de suelo in-situ 2017</b>	<b>73</b>
<b>B. Conductividad eléctrica y humedad de suelo in-situ 2019</b>	<b>83</b>
<b>C. Mapas obtenidos con índices ópticos y clasificación con umbrales</b>	<b>93</b>

---

## Índice de figuras

---

2.1. Distribución de suelos afectados por salinidad/sodicidad en área relevada. . . . .	7
2.2. Distribución de suelos afectados por salinidad/sodicidad según región. . . . .	7
2.3. Relación entre $\epsilon'$ y $\epsilon''$ en función de la humedad volumétrica del suelo. . . . .	9
2.4. Relación entre $\epsilon''$ , $m_v$ y salinidad igual a 0% a), 5% b), 10% c), 20% d), 50% e), 100% f), y 200% g) saturado con NaCl. . . . .	10
2.5. Relación entre $\epsilon'$ y $\epsilon''$ en función de la frecuencia de un concentrado 100‰ de KCl con humedad volumétrica como parámetro. . . . .	10
2.6. Relación entre $\epsilon'$ y $\epsilon''$ en función de la frecuencia con respecto a $m_v$ . . . . .	11
2.7. Efecto de la textura del suelo en $\epsilon'$ y $\epsilon''$ en suelos no salino y salino. . . . .	12
2.8. Nomenclatura del espectro electromagnético según la frecuencia. . . . .	12
2.9. Geometría de adquisición de un sistema SAR. . . . .	14
2.10. Distorsiones topográficas presentes en imágenes SAR. . . . .	16
2.11. Mecanismos de retrodispersión dominantes: a) Especular, b) Difuso (dispersión superficial); c) Doble rebote y d) en Volumen. . . . .	18
2.12. Profundidad de Skin en función del contenido de humedad volumétrica, frecuencia y tipo de suelo. . . . .	19
2.13. Profundidad de penetración en función del contenido de humedad volumétrica y frecuencia. . . . .	19
2.14. Relación entre $\sigma_0$ y $\epsilon''$ y la salinidad de las muestras. . . . .	22
2.15. Relación entre $\sigma_0$ y CE; y entre $\epsilon''$ de la imagen y $\epsilon''$ de las muestras. . . . .	23

2.16. Simulaciones modelo IEM para $\sigma_0$ en banda L a 40° . . . . .	23
2.17. Simulaciones AIEM de la constante dieléctrica para $\sigma_0$ en banda C a 40° . . . . .	24
2.18. Coeficientes de retrodispersión simulados VS imagen RADARSAT-2. . . . .	24
2.19. Coeficiente de retrodispersión compensado por vegetación vs coeficiente de retrodispersión simulado. . . . .	25
3.1. Localización en la provincia de Córdoba del área de estudio y el Core Site de SAOCOM en los departamentos Unión y Marcos Juárez. . . . .	27
3.2. Régimen climático de Córdoba. . . . .	28
3.3. Régimen climático e hidrológico de la ciudad de Bell Ville. . . . .	28
3.4. Geomorfología y Distribución de suelos en la provincia de Córdoba. . . . .	30
3.5. Distribución de suelos salinos en la provincia de Córdoba. . . . .	31
4.1. Imágenes ópticas utilizadas en el análisis. . . . .	34
4.2. Metodología utilizada para la imagen en banda X (COSMO-SkyMed). . . . .	36
4.3. Imagen COSMO-SkyMed (07/06/2017) empleada, polarización VV. . . . .	37
4.4. Máscara final excluyendo áreas urbanas, cuerpos de agua y zonas con vegetación derivada de imagen Sentinel-2 del 09/06/2017. . . . .	40
4.5. Metodología utilizada para la imagen en banda L (SAOCOM) . . . . .	42
4.6. Imágenes preprocesadas a) Sentinel 2 color real b) SAOCOM VV c) SAOCOM VV con filtro Sigma Lee 5x5. . . . .	43
4.7. Localización de los sensores Hydraprobe en el área de estudio. . . . .	44
4.8. Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 3. . . . .	46
4.9. Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 66. . . . .	46
5.1. Histogramas de los distintos índices ópticos analizados según afloramientos y suelos no salinos. . . . .	48
5.2. Histogramas de los distintos índices ópticos analizados según afloramientos y suelos no salinos (Continuación). . . . .	49
5.3. CRSI y clasificación con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio. . . . .	50
5.4. Resultados de la inversión sin filtro - COSMO-SkyMed: a) Parte real b) Magnitud c) Parte imaginaria de la constante dieléctrica . . . . .	51

5.5. a) Parte real y b) magnitud de la constante dieléctrica - Imagen COSMO Sky-Med Filtro 11x11 . . . . .	52
5.6. Parte imaginaria de la constante dieléctrica - Imagen COSMO Sky-Med Filtro 11x11. . . . .	53
5.7. Parte real de la constante dieléctrica usando imagen SAOCOM - Modelo Dubois. . . . .	55
5.8. Valor medido vs. valor estimado de la parte real usando imagen SAOCOM.	55
5.9. Mapa de la humedad volumétrica [ $cm^3/cm^3$ ] usando imagen SAOCOM - Modelo Topp. . . . .	56
5.10. Valor medido vs. valor estimado de la humedad volumétrica usando imagen SAOCOM. . . . .	57
5.11. Magnitud de la constante dieléctrica: a) Modelo SPM. b) Modelo SPM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM. . . . .	57
5.12. Análisis del ratio copolarizada SAOCOM: a) Ratio copolarizado según modelo SPM b) Histograma del ratio copolarizado SAOCOM c) Histograma del ratio copolarizado corregido empíricamente SAOCOM. . . . .	58
5.13. Magnitud de la constante dieléctrica: a) Modelo POM. b) Modelo POM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM. . . . .	58
5.14. Análisis del ratio copolarizado SAOCOM corregido empíricamente: a) Ratio copolarizado según modelo POM b) Histograma del ratio copolarizado SAOCOM c) Histograma del ratio copolarizado corregido empíricamente SAOCOM. . . . .	59
5.15. Parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo SPM. b) Modelo SPM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM. . . . .	59
5.16. Valor medido vs. estimado de la parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo SPM. b) Modelo SPM corregido usando imagen SAOCOM. . . . .	60
5.17. Parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo POM. b) Modelo POM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM. . . . .	60
5.18. Valor medido vs. estimado de la parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo POM. b) Modelo POM corregido usando imagen SAOCOM . . . . .	61

---

## Índice de tablas

---

2.1. Clasificación de salinidad usando extractos de suelo en saturación a 25 °C. . . . .	8
3.1. Áreas afectadas por salinidad en la provincia de Córdoba. . . . .	31
4.1. Índices ópticos empleados y analizados. . . . .	33
4.2. Características de las imágenes Sentinel 2 empleadas. . . . .	33
4.3. Características de la imagen COSMO-SkyMed empleada. . . . .	35
4.4. Lista de los valores de parámetros usados para el procesamiento. . . . .	37
4.5. Características de las máscaras usadas. . . . .	39
4.6. Características de la imagen SAOCOM empleada. . . . .	41
4.7. Lista de los valores de parámetros usados para el procesamiento. . . . .	43
5.1. Umbrales obtenidos de los distintos índices utilizados. . . . .	47
5.2. Datos de sensores telemétricos en el área de estudio. . . . .	54
5.3. Valores medidos versus estimados según los modelos analizados usando imagen SAOCOM. . . . .	61

---

## Acrónimos

---

**CONAE** Comisión Nacional de Actividades Espaciales

**USDA** United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)

**CE** Conductividad Eléctrica

**INTA** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

**SIASGE** Sistema Ítalo Argentino de Satélites para Gestión de Emergencias

**SDT** Sólidos Disueltos Totales

**SPM** Small Perturbation Model

**POM** Physical Optics Model

**GOM** Geometric Optics Model

**WFS** Web Feature Service

**IDECOR** Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La *salinidad del suelo*, ocasionada por procesos naturales o antrópicos, es un riesgo ambiental significativo que afecta adversamente al crecimiento de los cultivos, su productividad, la calidad del suelo y del agua, y eventualmente resulta en la erosión de suelos y degradación general del recurso [1].

La *salinización* puede definirse como la acumulación en el suelo de sales solubles en agua, mientras que *suelos afectados por sal* son aquellos cuyos contenidos de sales están por encima del límite de toxicidad, la concentración máxima permisible que no afecta al crecimiento de los cultivos.

Los problemas de salinidad tienen un impacto significativo especialmente en regiones semi-áridas debido a que éstas áreas con condiciones climáticas más adversas están bajo presión para suministrar los recursos alimentarios que su población demanda. Esta presión resulta en cambios en el uso de suelo, que principalmente se debe a una intensificación de cultivos, acelerando los procesos de degradación, entre ellos la salinización, y eventualmente resulta en una reducción de la cosecha [2].

En algunos casos estos problemas pueden ser mitigados con un manejo eficiente del agua e introducción de medidas de prevención. En otros casos medidas de remediación pueden ser necesarias para restaurar suelos afectados y recuperar su productividad para la sostenibilidad de la agricultura por irrigación [3]. Por ende, los gestores de decisiones y los productores necesitan confianza que todas las estimaciones técnicas y datos suministrados a ellos sean confiables y robustos, ya que el efecto económico y social de sobre o subestimar la extensión, magnitud, y distribución espacial de la salinización puede ser desastroso [4].

En consecuencia, la comunidad de la teledetección necesita enfocarse en proveer las mejores herramientas para el mapeo y monitoreo de la salinidad, que son de vital importancia y relevancia para la producción global de alimentos y el desarrollo de estrategias de mitigación y planes de manejo [5], donde la detección a tiempo de la problemática, la evaluación de su grado de severidad y su extensión -particularmente en su etapa inicial- es vital [2].

### 1.1. Motivación

Monitorear la salinidad significa primero identificar los lugares donde las sales suelen concentrarse y segundo detectar los cambios en esta concentración. Ambos dependen en gran medida de la manera peculiar en el que las sales se distribuyen en la superficie del suelo, y en las capacidades de la teledetección para identificarlas [6].

Sin embargo, no existe a escala nacional en la actualidad un proceso sistemático para el monitoreo de la afectación de suelos salinos, especialmente irrigados, y poco se ha hecho para desarrollar y validar tecnologías para la ejecución de este proceso basado en teledetección, con las consecuentes ventajas económicas y la posibilidad de una mayor densidad de muestreo que la metodología clásica de muestreo puntual y análisis de laboratorio [7].

En este contexto, Argentina desarrolló la misión SAOCOM 1, equipada con un instrumento de Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés) polarimétrico que opera en el rango de las microondas del espectro electromagnético en la denominada banda L (1,275 GHz). La misión SAOCOM consta de dos satélites idénticos, SAOCOM 1-A (lanzado el 7 de octubre de 2018) y SAOCOM 1-B (lanzado el 30 de agosto de 2020), con el objetivo de obtener productos específicos derivados de la información SAR, en particular mapas de humedad de suelo, lo que representa una gran ayuda para la agricultura, la hidrología y para el área de salud, debido a su comprobado impacto socio-económico [8].

A su vez, ésta misión conforma junto con la constelación de los cuatro satélites COSMO-SkyMed (SAR, banda X), el SIASGE (Sistema Ítalo Argentino de Satélites para Gestión de Emergencias) [8], gran fuente de datos sinérgicos de doble frecuencia (bandas X y L) que combinados son de gran contribución para el monitoreo de los distintos fenómenos y aspectos de la superficie terrestre. Además, satisfacen ampliamente lo planteado en el Plan Espacial Nacional de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) en cuanto a contribuir con el desarrollo de aplicaciones y productos de impacto en los sectores sociales, económicos y productivos [8].

La información SAR, tal como la provista por la misión SAOCOM 1 y el SIASGE, presentan una gran potencialidad para mapear la salinidad del suelo, ya sea mediante el análisis de los coeficientes de retrodispersión o a partir de la inversión de modelos electromagnéticos. Esto es debido a la sensibilidad a parámetros de la superficie como la rugosidad y la constante dieléctrica compleja, siendo este último parámetro afectado por la presencia de sales y la humedad del suelo [4, 9].

Justamente debido al comportamiento diferencial de la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica se puede considerar a las microondas eficientes en la detección de la salinización de los suelos: mientras la parte real es independiente de la salinidad del suelo, la parte imaginaria es altamente sensible a las variaciones de la conductividad eléctrica, vinculado al contenido de sal en el suelo. Esto permite la separación de suelos salinos de otros [10], donde las bandas C-, P-, y especialmente la banda L- son consideradas las más adecuadas para la detección de la salinidad en diferentes ambientes [9, 10, 11].

Comparando los estudios de salinidad de suelo con los estudios sobre humedad de suelo, la investigación sobre la salinización y su efecto en la constante dieléctrica se encuentra en una fase mucho menos completa, principalmente debido a su complejidad [12]; y a pesar de los distintos modelos dieléctricos y de retrodispersión desarrollados, la falta de modelos específicos para suelos húmedos salinos dificultan la demarcación de suelos afectados por esta problemática utilizando imágenes satelitales [13].

Por lo expuesto, este trabajo propone entonces la primera aproximación del estudio de la salinidad en zonas productivas húmedas agrícolas de la Pampa argentina usando imágenes del sistema SIASGE (COSMO Sky-Med y SAOCOM), realizando un trabajo preliminar exploratorio con imágenes ópticas, teniendo en mente la extensión de las aplicaciones de SAOCOM hacia zonas áridas y semi-áridas.

## 1.2. Objetivo principal

- Estudiar y analizar metodologías existentes para la estimación de la salinidad del suelo a través del uso de imágenes SAR polarimétricas, en vistas a la creación futura de un producto de salinidad en zonas agrícolas afectadas por esta problemática.

### 1.2.1. Objetivos secundarios

- Revisar el estado del arte y estudiar los fundamentos teóricos que sustentan el estudio de la salinidad con el uso de sensores remotos SAR.
- Realizar un estudio exploratorio sobre el uso de imágenes ópticas para la detección de la problemática.
- Analizar métodos que utilizan imágenes SAR polarimétricas para el estudio de la salinidad del suelo.
- Analizar la relación entre las partes real e imaginaria de la constante dieléctrica y la salinidad del suelo para la comprensión de la física del problema.
- Implementar modelos teóricos de retrodispersión radar, incluyendo los métodos de inversión para la estimación de la constante dieléctrica compleja, parámetro clave para estimar la salinidad.
- Procesar imágenes de radar a distintas frecuencias, banda X y banda L, utilizando el potencial polarimétrico de las mismas para la detección y mapeo de suelos salinos.
- Validar resultados con datos de campo en sitios de muestreo específicos.
- Estudiar la viabilidad para implementar la estimación de salinidad a partir de modelos electromagnéticos en los suelos agrícolas de la Pampa húmeda argentina.

## 1.3. Estructura de la tesis

El *Capítulo 1* presenta una breve introducción al problema de la salinidad del suelo, y como este trabajo pretende abordarlo para su caracterización usando imágenes satelitales.

El *Capítulo 2* contiene los fundamentos básicos teóricos de la problemática de la salinidad en el suelo junto con conceptos para su medición y clasificación, así como el efecto de la salinidad en la variable física de la constante dieléctrica del suelo. Además se explica la teoría relacionada a la adquisición de imágenes de SAR, los mecanismos de interacción entre señal-blanco y una descripción de los modelos electromagnéticos desarrollados. Por

último se incluye una revisión de los antecedentes en la literatura con respecto al estudio de la salinidad del suelo usando imágenes SAR y ópticas.

El *Capítulo 3* incluye la descripción del área de estudio, el problema de la salinidad en la provincia de Córdoba y el área de estudio.

En el *Capítulo 4* se describen las imágenes ópticas y de radar de apertura sintética a usar en el trabajo, como así la metodología de pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes. Asimismo se detalla la red telemétrica de medición de CONAE, fuente de datos de campo para la validación de resultados.

En el *Capítulo 5* se exponen los resultados obtenidos a partir de aplicar las metodologías desarrolladas en el capítulo anterior. Se presentan mapas extraídos de imágenes ópticas y SAR de dos frecuencias distintas: banda-X (COSMO-SkyMed), y banda L (SAOCOM).

Por último, el *Capítulo 6* contiene las conclusiones finales del trabajo y lineamientos para trabajos futuros para mejorar la precisión en la estimación de la salinidad del suelo.

### 2.1. El suelo y la salinidad

El *suelo* es la estructura básica de soporte de la agricultura, compuesto por materia mineral, materia orgánica, aire y agua. Sobre él se establece el crecimiento vegetativo y el crecimiento radicular al suministrar a la planta nutrientes, agua y soporte mecánico, resultado de la interacción del clima, topografía, organismos y los distintos materiales parentales a lo largo del tiempo [14].

El grupo de suelos afectados por *salinización* incluye suelos que contienen sales solubles, o sus iones, en al menos uno de sus horizontes en cantidades superiores al umbral de toxicidad: la máxima concentración permisible de sales que no limita el crecimiento vegetal [15]. En particular, los iones que contribuyen a la salinización de suelos incluyen a  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , y raramente,  $NO_3^-$  o  $K^+$ , los cuales puede ocurrir en concentraciones y proporciones altamente variables [16].

De acuerdo al Manual de Agricultura del United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (USDA) [17], los suelos afectados por sal se encuentran caracterizados por una conductividad eléctrica específica (CE) del extracto de suelo saturado por encima de 4 mS/cm a 25°C. Mas recientemente, los suelos también se consideran afectados con una menor CE de 2 mS/cm debido a que ciertos tipos de frutas, vegetales y cultivos ornamentales sufren los efectos de salinidad en el rango de 2 a 4 mS/cm [15] [18].

La *salinización primaria* es el desarrollo de sales a través de procesos naturales, principalmente meteorización física o química y transporte del material madre, depósitos geológicos o agua subterránea. Los suelos pueden ser ricos en sales debido a los materiales constituyentes de la roca madre tales como carbonatos o feldespatos. También eventos geológicos o formaciones específicas pueden incrementar la concentración de sales en agua subterránea, y por ende en las capas de suelos adyacentes [19].

En contraste con la salinización primaria, la *salinización secundaria* es introducida por la intervención humana; principalmente irrigación con agua salina u otras malas prácticas de

irrigación a veces acompañadas con condiciones de drenaje insuficientes [19]. En la agricultura por irrigación, especialmente en zonas áridas y semi-áridas, el desarrollo de sales en el perfil del suelo está determinado por procesos de evapotranspiración que remueven el agua de los poros del suelo dejando las sales detrás [5].

Las plantas responden a los Sólidos Disueltos Totales (SDT) en el agua del suelo que rodea a las raíces, la cual está influenciada por las prácticas de riego, sal naturalmente presente y por los SDT en el agua de riego [20]. La presencia de sales no solo disminuye la producción agrícola de la mayoría de los cultivos, sino como un resultado de su efecto en las propiedades físico-químicas del suelo afecta adversamente el balance ecológico asociado de la zona en cuestión [3].

Entre los aspectos mas perjudiciales de la presencia de sales en el suelo se puede nombrar:

- baja productividad agrícola;
- erosión del suelo tanto hídrica como eólica, debido a la gran dispersabilidad del suelo y una disminución en la tensión de corte;
- incremento de las inundaciones debido a una mayor escurrimiento como resultado una permeabilidad del suelo disminuida;
- baja recarga de agua subterránea;
- desbalance ecológico debido a los cambios de la cobertura vegetal de mesófitas a halófitas, de cobertura arbórea a arbustal, etc.;
- riesgo a la salud humana debido al efecto tóxico de ciertos elementos como F, B, y Se;
- bajos rendimientos económicos debido a los altos costos de siembra, merma de productividad y disminución de la calidad;
- costos de mantenimientos más altos y vida útil reducida de edificios, caminos, diques, cañerías y maquinaria agrícola, las cuales se ven corroídas por sales y efectos específicos del sodio y otros elementos [3].

Un estimado exacto de las pérdidas causadas por esta problemática puede ser difícil de determinar; sin embargo es claro que las pérdidas pueden ser de carácter considerable y un importante trabajo debe ser realizado para controlar la salinidad [21].

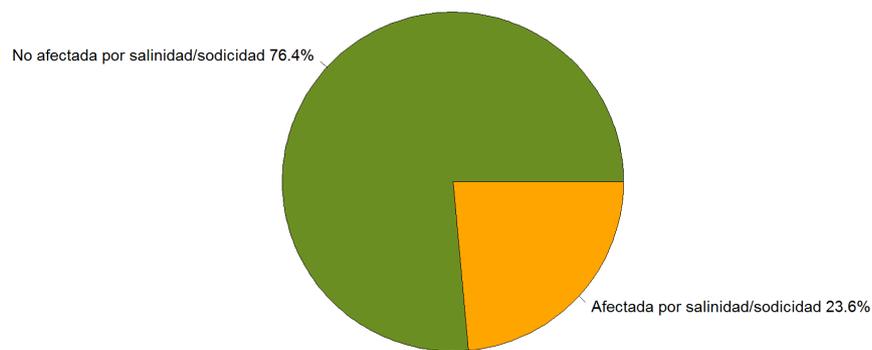
## **2.2. Extensión de la salinización de suelo**

La extensión mundial de suelos con salinización primaria es de aproximadamente 955 Mha, mientras que aquellos con salinización secundaria afecta cerca de 77 Mha, donde el 58% de éstas se encuentran en áreas irrigadas. Alrededor del 20% de todas las zonas irrigadas se encuentran afectadas por sales, y esta proporción tiende a subir a pesar de los esfuerzos dedicados a la remediación [6].

Los problemas de salinización de suelos tienen un gran impacto especialmente en zonas semi-áridas debido a que estas áreas con condiciones climáticas adversas están bajo gran presión para suministrar recursos alimenticios a una población que rápidamente incrementa. Esta presión resulta de los cambios en el uso de la tierra, la cual es producto principalmente

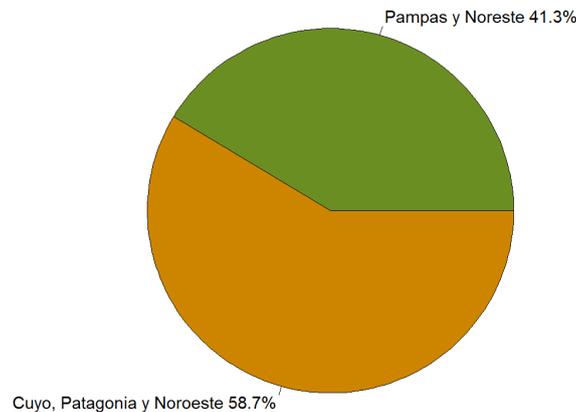
de una política de intensificación de la agricultura. Esta práctica acelera los procesos de degradación del recurso suelo, entre ellos salinización, y eventualmente en una reducción de la productividad [2].

En un estudio llevado a cabo por Sánchez *et al.* [7] en 2015 en un área efectiva irrigada de 1.749.524,3 ha (representando el 83,3% de la superficie total irrigada en Argentina) se identificaron 412.338 ha afectadas en algún grado por esta problemática. Esto significa que el 23,6% de los suelos irrigados se encuentran atravesados por este fenómeno [7].



**Figura 2.1:** Distribución de suelos afectados por salinidad/sodicidad en área relevada [7].

Analizando estos números de acuerdo a las distintas regiones de Argentina, 170.470 ha afectadas corresponden a las Pampas y a la región Noreste, principalmente bajo procesos de sodificación; y 241.868 ha a las regiones de Cuyo, Patagonia y Noroeste principalmente por procesos de salinización por irrigación [7].



**Figura 2.2:** Distribución de suelos afectados por salinidad/sodicidad según región [7].

### 2.3. Medición de la salinidad

En teoría un análisis riguroso de la salinidad del suelo requiere, para empezar, la extracción de muestras representativas del suelo y del agua en sus poros, y segundo, la determinación consecuente de la concentración de los iones respectivos para un contenido de agua del suelo estándar para su eventual sumatoria en un parámetro único conocido como SDT [22]. Aunque preciso, este método representa un trabajo intensivo, costoso y destructivo, e impo-

ne severas limitaciones para trabajos demandantes en datos de campo, tanto espacial como temporalmente [22].

La alternativa es la realización de mediciones de Conductividad Eléctrica (CE) que ofrece una manera de solucionar las limitaciones del método muestral y de análisis de laboratorio [22], ya que la concentración de solutos (*i.e.* salinidad) pueden ser determinados *in situ* utilizando señales eléctricas o electromagnéticas con sensores apropiados [22, 23].

La *conductividad eléctrica*, o CE, es una expresión numérica de la habilidad inherente de un medio de conducir una corriente eléctrica, y constituye un índice práctico de la concentración total de los solutos ionizados en una muestra acuosa, proporcional a la cantidad de carga iónica presente [24] a pesar de que se encuentra afectada por la temperatura, el contenido de humedad en el suelo, la mineralogía y contenido de arcillas, la intercambio de cationes (CEC), el contenido de materia orgánica, y por la movilidad, valencias y concentraciones relativas de los iones individuales que componen a la solución [20, 25, 26].

Para su análisis, el suelo puede pensarse como un conductor heterogéneo donde el agua, las partículas sólidas y el aire están presentes en cantidades y distribuciones variables, y en el cual los portadores de corriente eléctrica están disueltos en agua o como iones adsorbidos a partículas sólidas.

Un modelo de conductividad eléctrica aparente desarrollado por Rhoades y Corwin [27] describe tres caminos de conductancia: 1) entre las capas de las partículas de suelo y la solución del suelo; 2) a través del continuo de las soluciones del suelo; y 3) a través o entre la superficie de las partículas del suelo en contacto directo. La conductividad eléctrica de las componentes del suelo medidas de esta manera se conoce como *Conductividad eléctrica aparente*  $CE_a$ , donde se equipara la conductividad eléctrica medida a una conductividad eléctrica equivalente de un material de fase única [22, 28, 29].

La *conductividad eléctrica* necesita ser expresada a una temperatura de referencia con el objetivo de poder ser comparable y fiable debido a que la *conductividad electrolítica* (contrariamente a la conductividad metálica) incrementa a una tasa de aproximadamente 1,9% por cada incremento de grado centígrado. En la práctica la temperatura de referencia más usada es 25 °C donde la conductividad eléctrica es medida a una temperatura conocida y luego ajustada a ésta referencia utilizando un coeficiente apropiado de corrección de temperatura [23].

Por acuerdo internacional, el estándar universal para la medición de la salinidad del suelo es la *conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo a 25 °C*, también llamado  $CE_{e,25}$ . La tolerancia a la salinidad de los cultivos se encuentra expresada en ésta variable y, por ende, todas las mediciones obtenidas deben ser convertidas a  $CE_{e,25}$  para ser útil en la determinación de la salinización presente [22].

**Tabla 2.1:** Clasificación de salinidad usando extractos de suelo en saturación a 25 °C.

<i>Clase</i>	<i>ECe (dS m<sup>-1</sup>)</i>	<i>Efecto en cultivos</i>
<b>0</b> No salino	0-2	Efectos negligibles
<b>1</b> Salinidad ligera	2-4	Rendimiento de cultivos sensibles afectado
<b>2</b> Salinidad moderada	4-8	Rendimiento de varios cultivos afectado
<b>3</b> Salinidad fuerte	8-16	Solo cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente
<b>4</b> Salinidad extrema	>16	Solo pocos cultivos especialmente tolerantes rinden satisfactoriamente

En conclusión, el método más común para la cuantificación de la salinidad del suelo es medir la conductividad eléctrica aparente ( $CE_a$ ) junto con el contenido volumétrico de humedad del suelo, para aplicar curvas de calibración que relacionen la  $CE_a$  con la conductividad eléctrica en saturación,  $CE_e$  y aplicar el coeficiente de corrección de temperatura para finalmente obtener el parámetro buscado,  $CE_{e,25}$  [30]. Rhoades *et al.* [31] sugiere que la  $CE_a$  sea medida cuando el suelo posea una humedad próxima a la capacidad de campo. En esta situación, el valor de la  $CE_a$  es aproximadamente igual a la conductividad eléctrica del suelo del extracto de saturación.

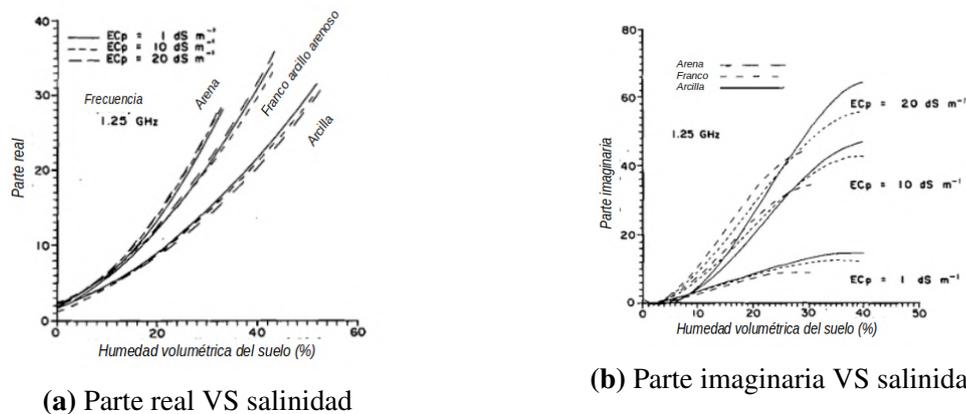
## 2.4. Efecto de la salinidad en la constante dieléctrica del suelo

La *constante dieléctrica* ( $\epsilon$ ) está representada por un número complejo adimensional, que queda expresado por la ecuación:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (2.1)$$

donde  $\epsilon'$  es la parte real y  $\epsilon''$  es la parte imaginaria. Si la parte real  $\epsilon'$ , relacionada a la polarización del medio, gobierna la velocidad de propagación de la onda dentro del material, la parte imaginaria  $\epsilon''$  está relacionada con la conductividad del medio y representa la atenuación de la señal de radar por absorción de energía requerida para alcanzar la polarización (*perdidas óhmicas*) [11].

Sreenivas *et al.* [10] realizaron un estudio sobre la influencia de la salinidad del suelo en el comportamiento dieléctrico como una función de la humedad volumétrica del suelo en banda L (1.25 GHz). Sus resultados revelaron que la parte real se encuentra altamente influenciada por la textura del suelo y el contenido volumétrico de humedad, aunque la salinidad no pareciera tener influencia alguna en ella (Fig. 2.3a). En cambio la parte imaginaria se incrementa con el contenido de sales para todos los suelos considerados (Fig. 2.3b) y con el incremento de la humedad de suelo.



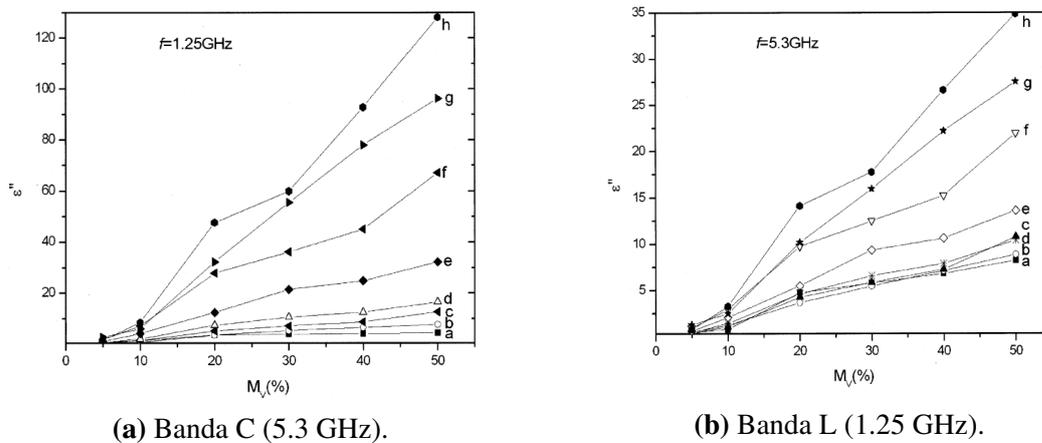
**Figura 2.3:** Relación entre la parte real (izquierda) e imaginaria (derecha) como función de la humedad volumétrica del suelo [10].

Shao *et al.* [32] evaluaron la parte real e imaginaria de muestras de suelo preparadas en laboratorio como función de la frecuencia, salinidad y contenido de humedad. La parte real

mostró una disminución en su magnitud a medida que la frecuencia se incrementaba, y un incremento a la par de una mayor humedad del suelo, pero encontraron que tanto la frecuencia como la salinidad tenían poca influencia en la parte real de la constante dieléctrica.

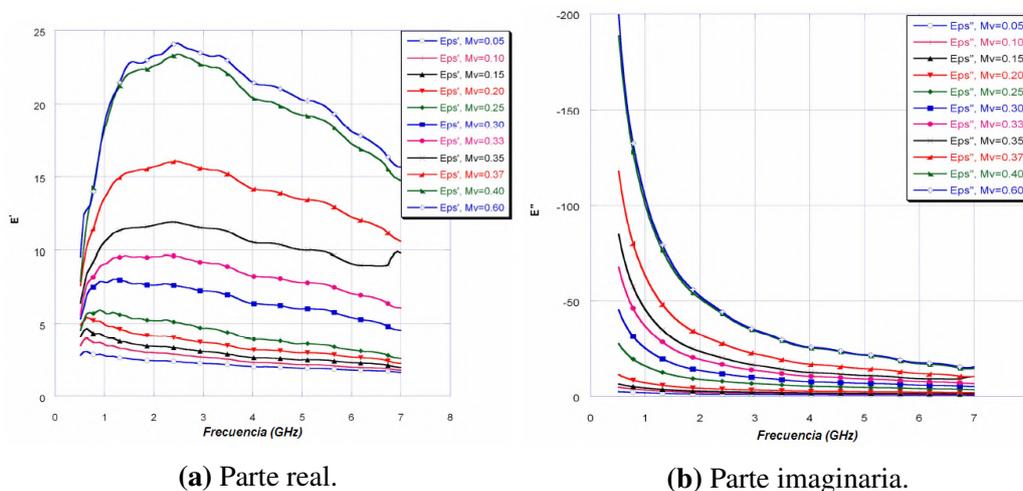
La parte imaginaria, en cambio, está afectada fuertemente tanto por la salinidad como por la humedad especialmente a bajas frecuencias, disminuyendo a medida que ésta aumenta. Este hecho sugiere que bajas frecuencias, tales como las bandas C- y L- son promisorias para el monitoreo del fenómeno en cuestión.

Shao *et al.* [32] también analizaron la parte imaginaria como una función del contenido volumétrico de humedad en el suelo con la salinidad como parámetro en las muestras de laboratorio (Fig. 2.4). Si el contenido volumétrico de agua es bajo, también lo es la concentración de iones; por lo tanto  $\epsilon''$  tiene un valor pequeño y no es sensible a la salinidad del suelo, una conclusión también compartida por Wu *et al.* [33].



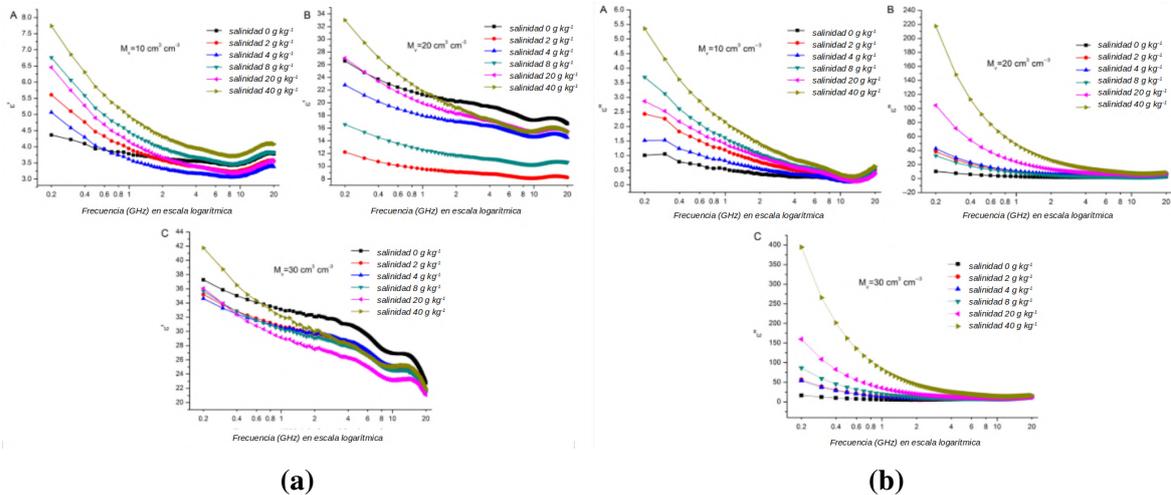
**Figura 2.4:** Relación entre  $\epsilon''$ ,  $M_v$  y salinidad igual a 0% a), 5% b), 10% c), 20% d), 50% e), 100% f), y 200% g) saturado con NaCl [32].

Lasne *et al.* [12] presentaron un estudio destinado a entender la influencia de la salinidad del suelo en función de la humedad del suelo en el comportamiento dieléctrico de los suelos, y luego en los coeficientes de retrodispersión de imágenes SAR aerotransportadas y satelitales, enfocándose en las propiedades dieléctricas de las sales KCl (Fig. 2.5).



**Figura 2.5:** Relación entre  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  en función de la frecuencia de un concentrado 100% de KCl con humedad volumétrica como parámetro [12].

Sus mediciones también apoyan la idea de que la parte real de la constante dieléctrica está afectada principalmente por el contenido de humedad. Además,  $\epsilon''$  disminuye rápidamente con el incremento de frecuencia, especialmente para contenidos de humedad que superan la humedad de transición. Estos resultados fueron también confirmados por Gong *et al.* [34], donde cinco suelos distintos fueron medidos para evaluar la influencia de la humedad y la salinidad en tanto la parte real como imaginaria de la constante dieléctrica (Figura 2.6).



**Figura 2.6:** Relación entre a)  $\epsilon'$  y b)  $\epsilon''$  con respecto a la humedad del suelo ( $m_v$ ) y salinidad en función de la frecuencia [34].

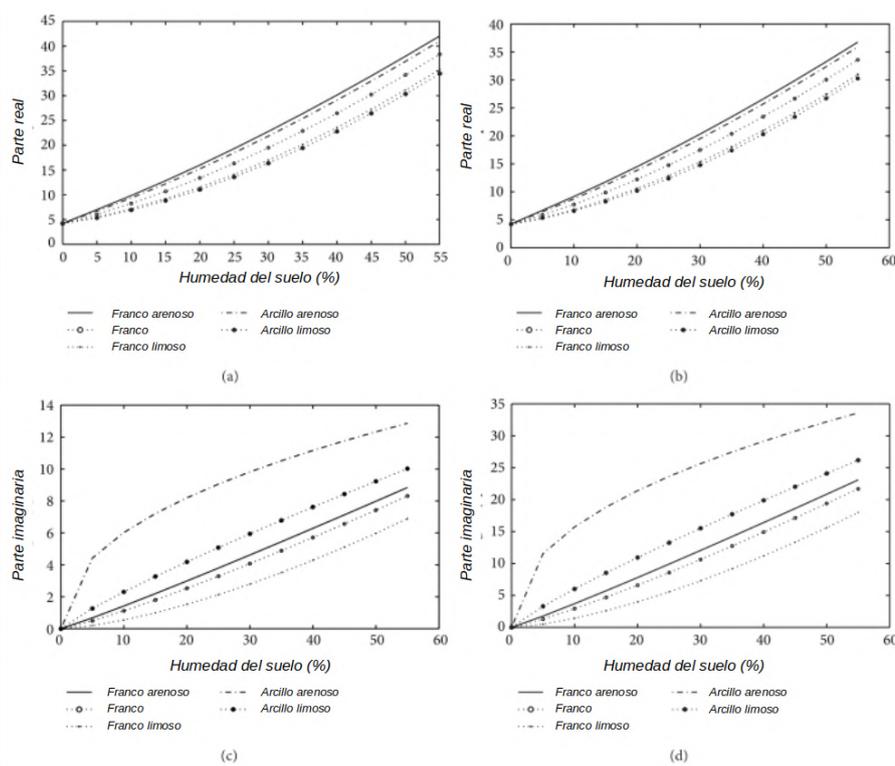
La Figura 2.6b muestra que  $\epsilon''$  disminuye con el incremento de la frecuencia y que tanto la salinidad como la humedad afectan a  $\epsilon''$ , pero es claro que la salinidad juega un rol más crucial en la magnitud de  $\epsilon''$ . Dentro del rango de frecuencias más bajas las muestras con diferentes salinidad tienen una diferencia claramente más marcada en  $\epsilon''$ , indicando que las bajas frecuencias son las más útiles y recomendadas para la detección de suelo afectados por sales.

La textura del suelo afecta a la detección de la humedad del suelo debido a que la constante dieléctrica también fluctúa con el contenido relativo de arena, arcilla y limo en el suelo. Los resultados obtenidos por Li [35] (Fig. 2.7) muestran que a más altos niveles de porcentaje de contenido de arena en el suelo, más alta es la parte real de constante dieléctrica; mientras que el efecto de la textura en  $\epsilon''$  muestra un incremento con el incremento del contenido de arcilla en el suelo.

Como conclusión, el incremento de la salinidad del suelo produce un incremento en la parte imaginaria de la constante dieléctrica del suelo, particularmente a altos niveles de humedad volumétrica y a bajas frecuencias. Además el efecto de la salinidad en la parte real es tan débil comparado con el efecto en la parte imaginaria que puede ser ignorado.

## 2.5. Sistemas de teledetección con tecnología SAR

La *teledetección* es una técnica que emplea la energía electromagnética, tal como la luz, el calor y las ondas de radio como medio para la detección y medición de las características de un objeto en la superficie, sin que haya contacto físico con el sensor. De esta forma permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas satelitales o aéreas asumiendo que existe entre el suelo y la radiación electromagnética,

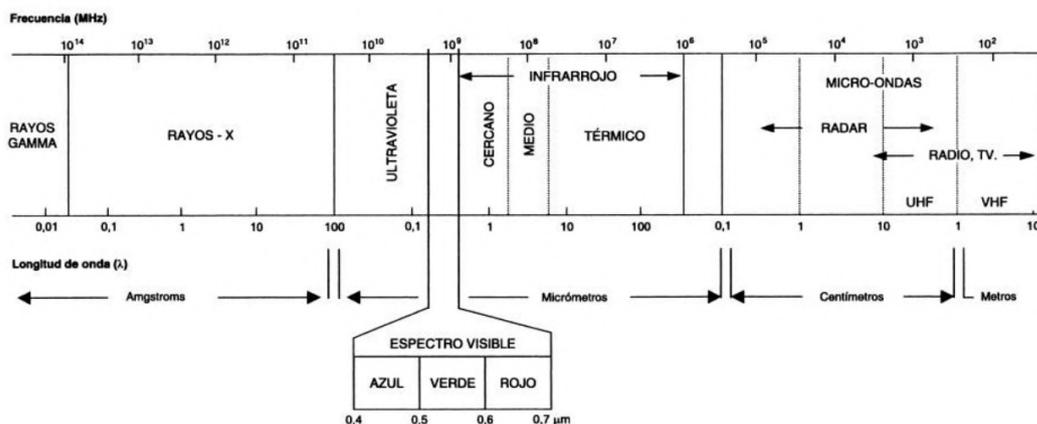


**Figura 2.7:** Efecto de la textura del suelo en la constante dieléctrica en suelos no salinos (izquierda) y con 60 % de sales disueltas (derecha) [35].

interacciones medidas y/o emitida por el sensor [36].

El funcionamiento de un sistema SAR se basa en la emisión de un pulso electromagnético, donde tanto el tiempo como la intensidad del eco reflejado (amplitud y fase) son medidos. Esa OEM emitida está compuesta por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (M), que poseen una naturaleza transversal entre ellos [37].

La mayoría de los sistemas SAR trabajan en general a una sola banda de frecuencias dentro del espectro electromagnético (Figura 2.8). Las más utilizadas para aplicaciones de teledetección son las correspondientes a las bandas X ( $\lambda = 3\text{cm}$ ), C ( $\lambda = 6\text{cm}$ ) y L ( $\lambda = 24\text{cm}$ ), donde cada una de estas bandas permite obtener distinta información de la superficie, ya que la longitud de onda gobierna los mecanismos de interacción que tiene la señal con los blancos en tierra [38].



**Figura 2.8:** Nomenclatura del espectro electromagnético según la frecuencia [39].

Entre las características más importantes de los sistemas SAR se puede nombrar [40]:

- Genera su propia señal y por lo tanto puede adquirir imágenes de día como de noche sin depender de las condiciones de iluminación del sol.
- Las microondas atraviesan nubes y lluvias con un muy bajo o nulo deterioro de la señal.
- Las microondas se retrodispersan en los materiales de una forma diferente a la energía óptica, proveyendo información complementaria a la provista por sensores ópticos.
- La información de fase contenida en los datos permite desarrollar una aplicación conocida como interferometría que es imposible de obtener con otro tipo de sensores.
- La posibilidad de la utilización de diferentes polarizaciones para envío y recepción de la señal en los SAR polarimétricos (envío horizontal o vertical y recepción horizontal o vertical).

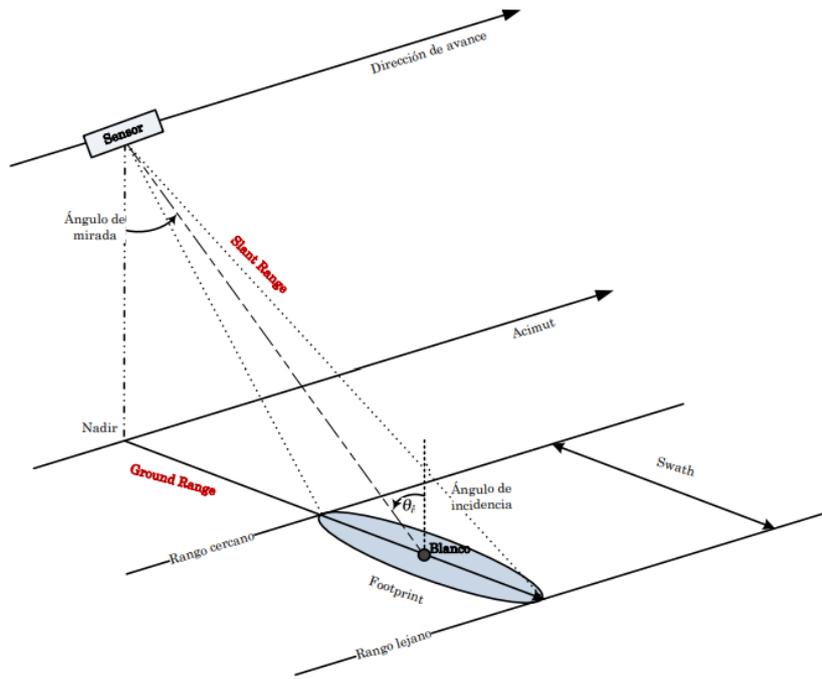
### 2.5.1. Geometría de adquisición

El radar de apertura sintética es un sensor activo montado en una plataforma que se mueve en una órbita al mismo tiempo que emite pulsos electromagnéticos hacia la superficie terrestre, en dirección perpendicular a la de desplazamiento, capturando los ecos de la señal reflejada por ella [41].

Dichos pulsos electromagnéticos son enviados a un intervalo de tiempo fijo denominado Tiempo de Repetición de Pulso (PRT), donde cada uno de estos pulsos ilumina un área de la superficie de la Tierra que es denominada *pisada de la antena*. Desde este área iluminada retornan los ecos correspondientes a cada uno de los blancos (*targets*) independientes que la componen [40].

La captura de ecos de la señal emitida permite calcular la posición exacta de cada blanco a partir del retardo con el que arriba su eco, ya que el tiempo transcurrido entre la emisión y su retorno permite identificar exactamente donde se encuentra en la superficie terrestre el punto retrodispersor [42]. Para que esto sea posible, las ondas deben ser enviadas en forma perpendicular a la dirección de vuelo del satélite y con un ángulo de mirada distinto de cero a partir del nadir para evitar ambigüedades provocadas por el arribo simultáneo de dos ecos correspondientes a distintos blancos [40].

La Figura 2.9 resume la geometría de adquisición de un sistema SAR: El sensor se desplaza en una dirección de avance paralela a la dirección de *acimut*, al mismo tiempo que la antena realiza la captura de las imágenes en visión lateral, en la dirección de *rango* perpendicular a la de *acimut*, determinando la distancia existente entre el sensor y el blanco. El ancho de la superficie que es iluminada por el SAR para formar la imagen es llamado *ancho de barrido o pisada de antena* y está determinado por la distancia entre los *rangos cercano y lejano* [43].



**Figura 2.9:** Geometría de adquisición simplificada de un sistema SAR ([43] en base a [44]).

La proyección del *rango oblicuo* sobre la superficie es denominada *rango en tierra*. Esta proyección se obtiene mediante la división del rango oblicuo por el seno del ángulo de incidencia local  $\theta_i$ . El *ángulo de incidencia* se define como el ángulo entre la normal a la superficie que pasa por el blanco y el rango oblicuo  $R$  del mismo. Notar que este ángulo se incrementa desde el rango cercano hacia el lejano [45], y que debido a la esfericidad de la superficie terrestre y a la variabilidad de  $\theta_i$  a lo largo del ancho de barrido, el ángulo de incidencia local es diferente al ángulo de mirada [43].

La *resolución geométrica*, es decir la distancia entre dos puntos que se pueden visualizar por separado, está definida por la resolución en rango y en acimut. La *resolución en slant range* ( $r_{slant}$ ) está dada por la siguiente ecuación [43]:

$$r_{slant} = \frac{c}{2B} \quad (2.2)$$

donde  $c$  es la *velocidad de la luz* y  $B$  es el *ancho de banda del chirp*, o señal modulada, emitido [43].

La subsecuente estimación de la *resolución en tierra* o *resolución en ground range* ( $r_{ground}$ ) se estima utilizando el *ángulo de incidencia local*  $\theta_i$  [43]:

$$r_{ground} = \frac{c}{2B \sin \theta_i} \quad (2.3)$$

El sistema SAR también aprovecha el avance de la plataforma para obtener una resolución en acimut ( $r_{acimut}$ ) del orden de la resolución en rango, limitada por la frecuencia  $f$  (o la longitud de onda  $\lambda$ ) del sistema, la longitud de la antena  $l_a$  y la distancia en range slant  $R_0$  entre el sensor y el objeto, de acuerdo a la siguiente expresión [43]:

$$r_{acimut} = \frac{\lambda}{2L_a} R_0 \quad (2.4)$$

donde  $L_a$  es la *longitud de la apertura sintética*, dada por la siguiente ecuación:

$$L_a = \frac{\lambda}{l_a} R_0 \quad (2.5)$$

donde  $l_a$  es la dimensión física de la antena [43].

Substituyendo  $L_a$  en la Ecuación 2.4 es posible ver que la *resolución geométrica* se incrementa con el largo físico de la antena  $l_a$  [43].

$$r_{acimut} = \frac{l_a}{2} \quad (2.6)$$

Como resultado, el tamaño del píxel para  $r_{ground}$  y  $r_{acimut}$  son desiguales; por lo tanto es necesario aplicar a las imágenes el proceso que se conoce como “multilooking” (multi-mirada) con el objetivo de conseguir píxeles cuadrados. Este procedimiento consiste en dividir el espectro de la imagen, trabajando en el dominio de las frecuencias, en un número de partes o looks que luego son promediados en la imagen final [43].

### 2.5.2. Distorsiones radiométricas

Dada la rugosidad de la superficie, la señal SAR es susceptible de sufrir fluctuaciones aleatorias, incluso en zonas más bien homogéneas, ya que dentro de una misma celda de resolución pueden existir múltiples objetivos o blancos. Debido a ello, los pulsos o ecos emitidos retornan habiendo recorrido caminos diferentes y acumulando diferencias de fase [46], y dependiendo del valor de estas diferencias, la interferencia puede ser constructiva, parcial o destructiva [47].

El fenómeno conocido como *speckle* es básicamente interferencia a gran escala. Conocido también como ruido “sal y pimienta” se visualiza en las imágenes como una granulado claro y oscuro, y está físicamente ligado a la naturaleza coherente de los sensores SAR impartiendo una aleatoriedad tal que la magnitud de cada pixel obedece una distribución de Rayleigh [48] representando un gran obstáculo para la clasificación, análisis e interpretación de las imágenes.

El ruido da lugar a lo que se conoce como incerteza radiométrica, la cual por lo general se cuantifica conociendo el Número Equivalente de Looks (ENL), calculado como la relación entre la potencia recibida media y la correspondiente desviación estándar dentro de un área homogénea:

$$ENL = \frac{\mu}{\sigma} \quad (2.7)$$

Las técnicas principales de reducción del speckle se pueden dividir en dos categorías. La primera está relacionada al procesamiento de la imagen luego del proceso de su formación utilizando la técnica conocida como multilooking. Este procedimiento tiene como resultado la mejora de la calidad radiométrica de la imagen reduciendo el speckle, pero a expensas de la pérdida de resolución espacial. La segunda técnica involucra la aplicación de filtros específicos, de paso bajo y adaptivos, que se basan en modelos estadísticos [43, 47].

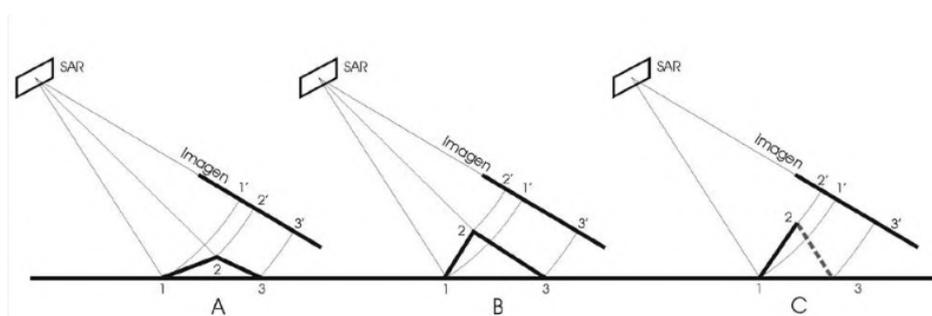
### 2.5.3. Distorsiones topográficas y geométricas

Debido a la modalidad de adquisición de un sistema radar de visión lateral, configuración que permite constituir la imagen a partir de la información de ecos reflejados en el terreno, las imágenes obtenidas son susceptibles de sufrir distorsiones geométricas [49] relacionadas con la topografía de la zona que se está ilumina, entre ellos: 1) acortamiento; 2) inversión; y 3) sombra [38].

El acortamiento, o *foreshortening*, es un efecto muy habitual en regiones montañosas o terrenos irregulares. Se da en pendientes orientadas hacia el sensor SAR y el efecto visual es que aparecen comprimidas en la imagen, es decir que se representan en la imagen como si fueran más cortas que en el terreno. Esto se debe a que el pulso del radar llega primero a la base del objeto en cuestión, que a su punto más alto. [47]

Cuando la pendiente de la ladera en cuestión es mayor al ángulo de visión del radar se produce inversión, o *layover*: los ecos provenientes de la cima llegan al radar antes que aquellos que llegan a la base (Figura 2.10B). La ladera aparece invertida (y comprimida) en la imagen. El layover se incrementa para ángulos de vista más pequeños; es decir que se intensifica en el rango cercano y en terrenos montañosos [47].

Cuando el haz del radar directamente no puede iluminar la superficie se produce el efecto conocido como sombreado o *shadowing*. El efecto *shadowing* es más frecuente hacia el rango lejano de la imagen, detrás de estructuras verticales (como edificios altos) o pendientes muy abruptas. En este caso no hay ecos reflejados provenientes de la zona en sombra y en la imagen sólo puede verse el ruido térmico del sensor (Figura 2.10C) [49].



**Figura 2.10:** Distorsiones topográficas presentes en imágenes SAR: a) Acortamiento b) Inversión c) Sombreado [49].

### 2.5.4. Polarización

El término *polarización* propiamente dicho depende principalmente de la configuración de la antena y se refiere a la orientación espacial de una onda electromagnética plana [50]. Si el vector del campo eléctrico cae en la misma dirección que el plano de incidencia, se dice que el tipo de polarización es *paralela* u horizontal; mientras que si el vector cae en un ángulo recto, respecto del ángulo de incidencia, se dice que el tipo de polarización es *perpendicular* o vertical [43].

En los sistemas SAR las antenas de emisión se diseñan para poder controlar la dirección del campo eléctrico saliente, las cuales se configuran para la transmisión en polarización horizontal (H) y/o vertical (V). De manera análoga, el canal de retorno también puede ser configurado en H y/o V, dando lugar a señales co-polarizadas (HH y VV) y cross-polarizadas (HV y VH) [43].

Una imagen SAR de polarización completa, también denominado full polarimétrico o quad-pol, emite y recibe la onda en las cuatro combinaciones posibles HH, VV, HV y VH, que puede expresarse a modo de una matriz de polarización, que contendrá la información de la magnitud física del blanco a través de la interpretación del  $\sigma^0$ , como se expresa en la ecuación 2.8:

$$\sigma_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{HH}^0 & \sigma_{HV}^0 \\ \sigma_{VH}^0 & \sigma_{VV}^0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dado que los materiales anisotrópicos, como son la gran mayoría de los presentes en una escena, frecuentemente reflejan diferentes polarizaciones con diferentes intensidades, estas combinaciones proveen una matriz de información por cada elemento en la escena y suele ser muy útil para su uso en clasificaciones, mejorando la habilidad para caracterizar las propiedades físicas de los objetos y la obtención de propiedades biofísicas o geofísicas de elementos de la superficie de la Tierra [40].

### 2.5.5. Interacción con el blanco

La señal retrodispersada, entre otras cosas, depende de los posibles mecanismos de interacción que se encuentran dados por la densidad del medio, la geometría de los elementos dispersores y las propiedades dieléctricas de los elementos [51].

Las propiedades dieléctricas de un medio gobiernan la señal de microondas de longitud de onda  $\lambda$  que interactúa con un medio retrodispersor. Éstas propiedades determinan cuanto de la radiación entrante se retrodispersa en la superficie, cuánta señal penetra al medio, y cuánta energía es perdida por procesos de absorción [52], y se encuentran fuertemente relacionadas con su contenido de humedad y también en el caso del suelo por su salinidad en menor escala (ver Sección 2.4).

La *rugosidad superficial* del blanco es una variable que también afecta a la señal incidente del radar SAR, y depende exclusivamente de la configuración del sistema SAR para la captura de la escena, en cuanto a parámetros como longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia. Particularmente, la rugosidad superficial depende fuertemente de la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la señal incidente [53].

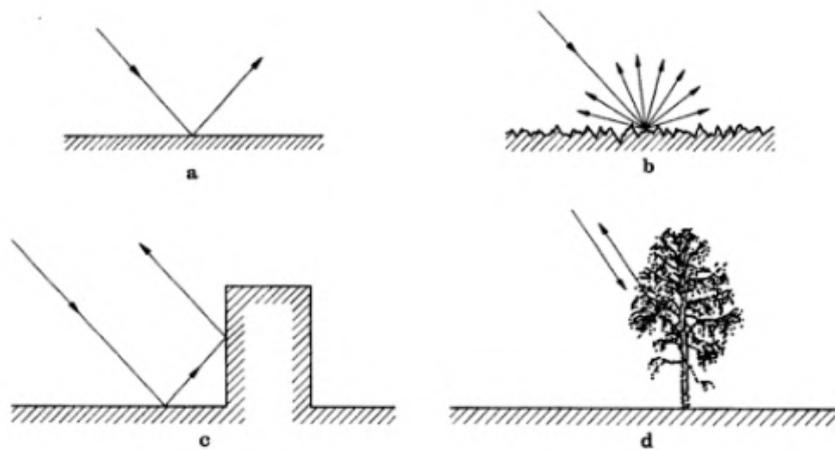
Los principales mecanismos de interacción pueden resumirse en [50]:

**Retrodispersión de superficie (especular y difusa):** En el caso de la *retrodispersión especular*, el tipo de superficie a la que arriba la señal emitida por el radar es relativamente lisa, y por lo tanto la señal tenderá a rebotar en sentido opuesto a la dirección del sensor (*i.e.* aguas en calma). Si por el contrario la microrugosidad se hace perceptible a la longitud de onda del radar, se genera un mecanismo de difusión de la retrodispersión hacia distintas direcciones (reflexión de tipo lambertiana), registrándose un porcentaje de la misma que vuelve al sensor.

**Retrodispersión doble rebote:** Es producida por reflectores de tipo esquina, donde dos superficies perpendiculares crean una fuerte señal retrodispersada. Este tipo de mecanismo puede encontrarse en áreas urbanas, donde el efecto doble rebote es creado por las estructuras de los edificios. También es el caso típico de los reflectores tipo *corner reflectors* creados para generar una fuerte respuesta en una imagen SAR con fines de calibración de los sensores.

**Retrodispersión en volumen:** Es el resultado de la interacción múltiple de la señal del radar

con numerosos objetos presentes en un medio homogéneo. Se produce, por ejemplo, en el caso de la vegetación vigorosa, donde la retrodispersión es la suma de la contribución del rebote entre tallos, hojas y troncos.



**Figura 2.11:** Mecanismos de retrodispersión dominantes: a) Especular, b) Difuso (dispersión superficial); c) Doble rebote y d) en Volumen [50].

La descripción de la rugosidad de las diferentes superficies se realiza a través de dos parámetros, obtenidos de los perfiles unidimensionales que la componen y que describen su componente vertical y horizontal, respectivamente. Estos son: la componente vertical  $s$ , relacionado con el tamaño de las irregularidades; y la componente horizontal  $l$ , relacionado con la cantidad y espaciamiento de las mismas. Ambos parámetros  $s$  y  $l$  se miden a partir de una línea media previamente definida, que usualmente se elige como el promedio de las alturas [54].

Por su parte, los elementos que componen la estructura de la vegetación también afectan la señal de retrodispersión de manera diferente, de acuerdo a las dimensiones de sus componentes y a la longitud de la onda incidente. Para cada frecuencia, es posible identificar una fuente principal de origen de la respuesta. Por ejemplo, el backscattering en banda L estará más influenciado por las hojas de tamaño mas grandes, mientras que el backscattering de la banda C está significativamente más afectado por hojas más pequeñas [37].

Asimismo, la retrodispersión depende de la geometría de incidencia de la onda. Longitudes de onda corta (*i.e.* Banda X) reflejan desde la parte superior del canopy, en condición de cobertura continua; mientras que longitudes de onda larga (*Banda L*) penetran el dosel y reflejan desde la superficie del suelo. Longitudes de onda intermedias (*Banda C*) tienen contribuciones tanto desde el dosel como de la superficie del suelo [55].

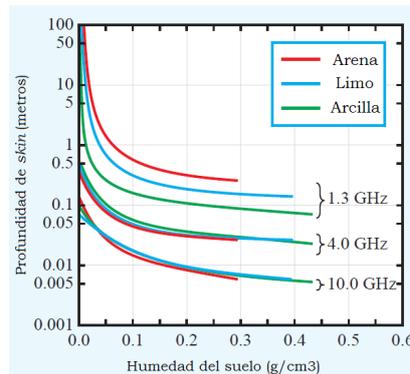
### 2.5.6. Penetración de la onda electromagnética

La profundidad de penetración de un medio con un coeficiente de extinción  $k_e$  está definida como aquella profundidad en que la onda incidente se atenúa a un 37% de su densidad de potencia original, mientras que la profundidad *skin* se define como la profundidad en el que la amplitud de la onda incidente es igual al 63% de su amplitud original. Ambos conceptos están relacionados con la profundidad en el que las ondas electromagnéticas interactúan con el medio que encuentran, y por consecuencia con la profundidad en el que distintos parámetros físicos pueden ser estimados [53].

La profundidad de penetración de la onda incidente en los suelos está directamente relacionado con el contenido de humedad presente y la longitud de la onda incidente. En un medio sin pérdidas de retrodispersión el cálculo de la penetración de la onda  $\delta_p$  puede realizarse utilizando la siguiente fórmula [43, 53]:

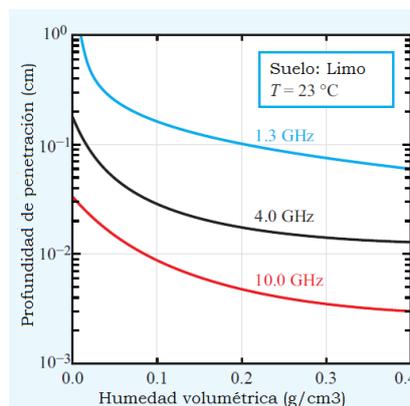
$$\delta_p = \frac{\lambda \epsilon'}{2\pi \epsilon''} \quad (2.9)$$

La Figura 2.12 muestra la profundidad en la que una señal de microondas disminuye un 63 % (*skin depth*) para tres tipos de frecuencia y tres tipos de suelo distintos. Se observa que hay tres factores en simultáneo que afectan a la penetración: la frecuencia (o longitud de onda), la humedad en el suelo, y la textura del mismo [53].



**Figura 2.12:** Profundidad de Skin en función del contenido de humedad volumétrica, frecuencia y tipo de suelo [56].

Para suelos perfectamente secos, con valores de  $\epsilon' = 3$  y  $\epsilon'' = 0.05$ , la profundidad de penetración a la frecuencia de 1 GHz es  $\delta_p = 1.65$  m. Esto explica, por ejemplo, como la misión SIR-A con un instrumento SAR en banda L fue capaz de detectar y mapear la topografía subterránea en el desierto egipcio [56]; mientras que a más altas frecuencias la profundidad que es capaz de penetrar la onda incidente disminuye, tal como muestra la Figura 2.13:



**Figura 2.13:** Profundidad de penetración en función del contenido de humedad volumétrica y frecuencia [56].

Asimismo se observa que el aumento del contenido volumétrico de la humedad lleva apareado una disminución en la profundidad de penetración, como se muestran en las Figuras 2.12 y 2.13. Se ha observado que a medida que la humedad volumétrica del suelo aumenta, la profundidad de penetración de la onda radar disminuye hasta a una profundidad de 1 cm para frecuencias de 10 GHz, y a 10 cm a 1,3 GHz [53].

Aplicando la fórmula 2.9 tomando como referencia la medición in-situ del sitio 3 el día 02-01-2018 a las 19:00:15, a un humedad volumétrica del 0,30 con una parte real igual a 19,318 y una parte imaginaria de la constante eléctrica aproximadamente igual a 10,424, se tiene:

$$\delta_p = \frac{\lambda \varepsilon'}{2\pi \varepsilon''} = \frac{0,2351m * 19,318}{2\pi * 10,424} = 0,0693m = 6,93cm \quad (2.10)$$

En la práctica, Ulaby *et al.* [53] encontraron que el espesor de la capa del suelo a la cual la humedad es captada por un radar en Banda L está en el orden de los 5 cm, en el orden de magnitud de las mediciones llevadas a cabo por la red telemétrica [43].

## 2.6. Modelado electromagnético

Para tomar en cuenta las diferentes configuraciones de los sensores y los parámetros de superficie, varios modelos de retrodispersión fueron desarrollados en las últimas décadas para ayudar a determinar la relación entre la señal de radar y ciertos parámetros biofísicos, que pueden ser clasificados en tres categorías; teóricos, empíricos y semi empíricos [55].

El desarrollo de *modelos teóricos* simulando los coeficientes de retrodispersión en términos de la constante dieléctrica y la rugosidad de suelo para un área con características conocidas, es uno de los enfoques más comunes para la extracción de parámetros físicos. El modelo teórico estándar es el de *Aproximación de Kirchoff*, que consiste en el *Modelo de Óptica Geométrica* (Geometric Optics Model (GOM)), el *Modelo de Óptica Física* (Physical Optics Model (POM)) y el *modelo de Perturbación Pequeña* (Small Perturbation Model (SPM)) [57].

Los *modelos empíricos* han sido empleados para analizar la interacción de las microondas con las superficies naturales a través de algoritmos simples (*i.e.* regresión lineal de variables), con diferentes grados de éxito. Debido a que estos tipos de modelos son generalmente derivados de conjunto de datos específicos, la mayoría son solo válidos en el área investigada, y además debido a las limitaciones en la frecuencia de observación, ángulos de incidencia y rugosidad de la superficie, los modelos empíricos pueden no ser válidamente aplicados a otros conjuntos de datos diferentes a aquellos que se usaron para su desarrollo [55].

Los modelos semi empíricos de retrodispersión representan un compromiso entre la complejidad de los modelos teóricos, y la simplicidad de los modelos empíricos, y pueden ser aplicado cuando existe poca a nula información sobre la rugosidad del suelo. Se consideran una mejora de los modelos empíricos, dado que se basan en principios físicos y luego se emplean datos simulados o experimentales para simplificar el modelo teórico.

La principal ventaja de estos modelos es que no son dependientes de un lugar en particular-problema asociado a modelos empíricos. Los modelos de este tipo más usados son aquellos desarrollados por *Oh* [58], *Dubois* [59] and *Shi* [60], entre otros [55].

La *inversión* de estos modelos permite inferir a partir del conjunto de datos que conforman la respuesta del sensor un conjunto de parámetros biofísicos de la superficie terrestre que afectaron a la misma. Sin embargo este tipo de inversiones es considerada un problema de tipo *mal condicionado* debido a que no existe una relación lineal entre ellos y los datos que recibe el sensor; esto significa que diferentes combinaciones de parámetros de entrada pueden corresponder a idénticas salidas, disminuyendo el nivel de precisión de los parámetros obtenidos [43, 61].

### 2.6.1. Modelo de Dubois

Dubois *et al.* [59] desarrollaron un algoritmo empírico para la extracción del contenido de humedad de suelo y altura rms de datos sensados remotamente a través de un escaterómetro. El algoritmo fue optimizado para superficies de suelo desnudo y desarrollado con datos de frecuencia que variaban de 1.5 GHz ( $\lambda = 0.205$  m) a 11 GHz ( $\lambda = 0.028$  m), rugosidades de 0.003 a 0.03 m y ángulos de incidencia entre 30 y 45 grados.

Dubois [59] eligió usar solo la señal de retrodispersión co-polarizada en vez de señales cross-polarizada debido a que son menos sensibles a la vegetación, más fáciles de calibrar y menos susceptible al ruido del sistema. Incluso este modelo puede ser usado en superficies con vegetación dispersa, con un índice NDVI de hasta 0,4 [55, 62, 63]

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2,75} \frac{\cos^{1,5} \theta}{\sin^5 \theta} 10^{0,028 \epsilon' \tan \theta} (ks * \sin \theta)^{1,4} \lambda^{0,7} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2,35} \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} 10^{0,046 \epsilon' \tan \theta} (ks * \sin \theta)^{1,1} \lambda^{0,7} \quad (2.12)$$

En estas ecuaciones  $\sigma^0$  es la retrodispersión en su respectiva polarización expresada en unidad lineales,  $\theta$  es el ángulo de incidencia local expresado en radianes, ks es la altura altura RMS normalizada a la longitud de onda, y  $\lambda$  es la longitud de onda expresada en centímetros.

La inversión de estas ecuaciones (2.11) y (2.12), expresan la constante dieléctrica en función de las polarizaciones HH y VV para parámetros de radar específicos (longitud de onda y ángulo de incidencia). El rango estimado de validez es de  $m_v \leq 35\%$  para el contenido de humedad en el suelo; y  $ks \leq 2,5$  para ángulos de incidencia mayores a 30 grados [55].

### 2.6.2. Modelo de Perturbación Pequeña - SPM

El Modelo de Perturbación Pequeña (SPM) asume que la variación en la altura de la superficie es pequeña comparada con la longitud de onda, que la pendiente superficial es pequeña y que el ángulo de incidencia es mayor a 35 grados [64], y por lo tanto es más apropiado para aplicaciones con longitudes de ondas mayores, como es el caso de las bandas S-, L- o P-.

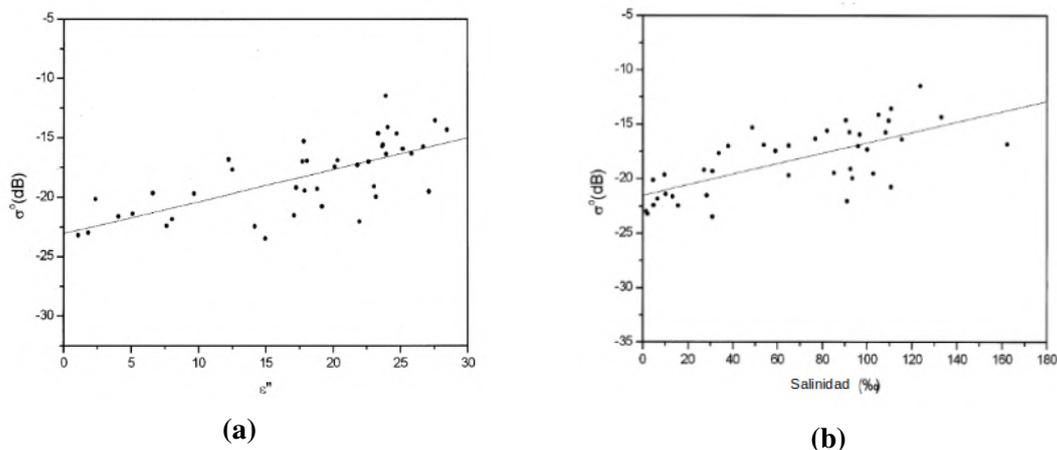
$$\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0} = \frac{(\epsilon \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})^4}{(\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})^4 (\epsilon + \epsilon \sin^2 \theta_i - \sin^2 \theta_i)^2} \quad (2.13)$$

Aunque el rango de validez del modelo está limitado a unas ciertas características del terreno, constituye una de las soluciones más usadas para el estudio de la retrodispersión terrestre. De acuerdo a este modelo, una superficie aleatoria puede ser descompuesta en sus componentes espectrales de Fourier donde la retrodispersión es principalmente debida a la componente espectral de la superficie que iguala a la longitud de onda efectiva al ángulo de incidencia dado [65].

Taylor [9] desarrolló el ratio co-polarizado expresado en la Ecuación 2.13, el cual se expresa como una ecuación no lineal que no depende de la rugosidad del terreno, y para un ángulo de incidencia dado, sólo depende de la magnitud de la constante dieléctrica.

## 2.7. Estudios con imágenes radar de la salinidad de suelo

Shao *et al.* [32] compararon mediciones dieléctricas con coeficientes de retrodispersión extraídos de una imagen RADARSAT (C-HH) que fueron adquiridas al mismo tiempo que un muestreo de suelo extraídos del área del lago salado Jilantai.



**Figura 2.14:** Relación entre  $\sigma_0$  extraídos de una imagen RADARSAT y a) la parte imaginaria de la constante dieléctrica  $\epsilon''$  de las muestras; b) la salinidad de las muestras [32].

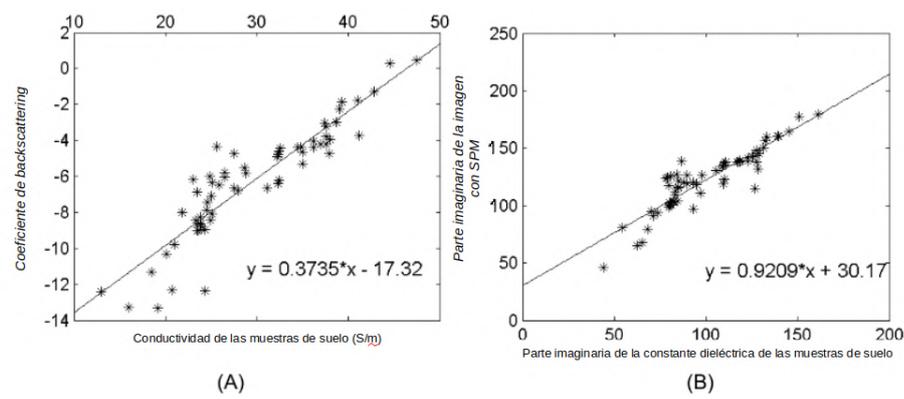
Descubrieron que el coeficiente de correlación entre  $\sigma_0$  extraída de una imagen RADARSAT y  $\epsilon''$  medido en la muestra de suelo es de 0.70; y con la salinidad es de 0.69, sugiriendo que la salinidad del suelo tiene un peso importante en el coeficiente de retrodispersión en el área de estudio.

Taylor *et al.* [9], aplicaron el Modelo de Perturbación Pequeña (SPM) en el área de Pyramid Hill (Victoria, Australia) en superficies totalmente saturadas de humedad. Las componentes de la constante dieléctrica obtenidas por la inversión de modelos delimitan claramente la distribución de suelo salinos, pero son más bajos que los esperados por las mediciones realizadas. La derivación de la salinidad fue mejorada aplicando una corrección de vegetación a los datos antes de la aplicación del modelo para compensar por la atenuación de la cobertura vegetal parcial.

Bell *et al.* [64] aplicaron el Modelo de Perturbación Pequeña (SPM) y el Modelo Óptica Física (POM) a las bandas C-, L- y P-; y el modelo de Dubois a la banda L en la región del río Alligator, Australia. El modelo que determina la magnitud de la constante dieléctrica junto con aquel que determina la parte real describen al modelo combinado, que enfatiza la parte imaginaria de la constante dieléctrica para el mapeo de la salinidad.

El método de corrección por vegetación usado por Taylor [9] fue también aplicado a los datos antes de la inversión del modelo SPM/POM. Esto, en conjunto con el modelo DM, lleva a un modelo combinado corregido por vegetación. Una sinergia entre ambos modelos fue luego producida para producir un mapa de salinidad mejorado [64].

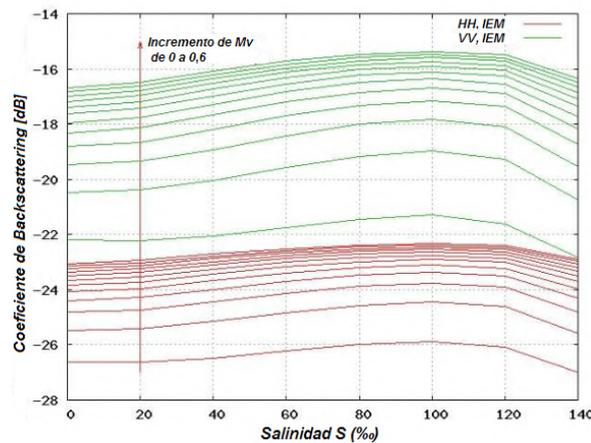
Aly *et al.* [66] estudiaron el efecto de la salinidad en el cálculo del coeficiente de retrodispersión usando el modelo de Perturbación Pequeña (SPM) y el modelo de Óptica Física (POM) como también el modelo de Dubois para dos tipos de suelos: franco y franco arenoso. Los resultados obtenidos con imágenes RADARSAT muestran una alta correlación entre la parte imaginaria calculada y las mediciones realizadas.



**Figura 2.15:** Relación a) entre  $\sigma_0$  y la conductividad de la muestra de suelo, b) entre  $\epsilon''$  de la imagen y las muestras de suelo [66].

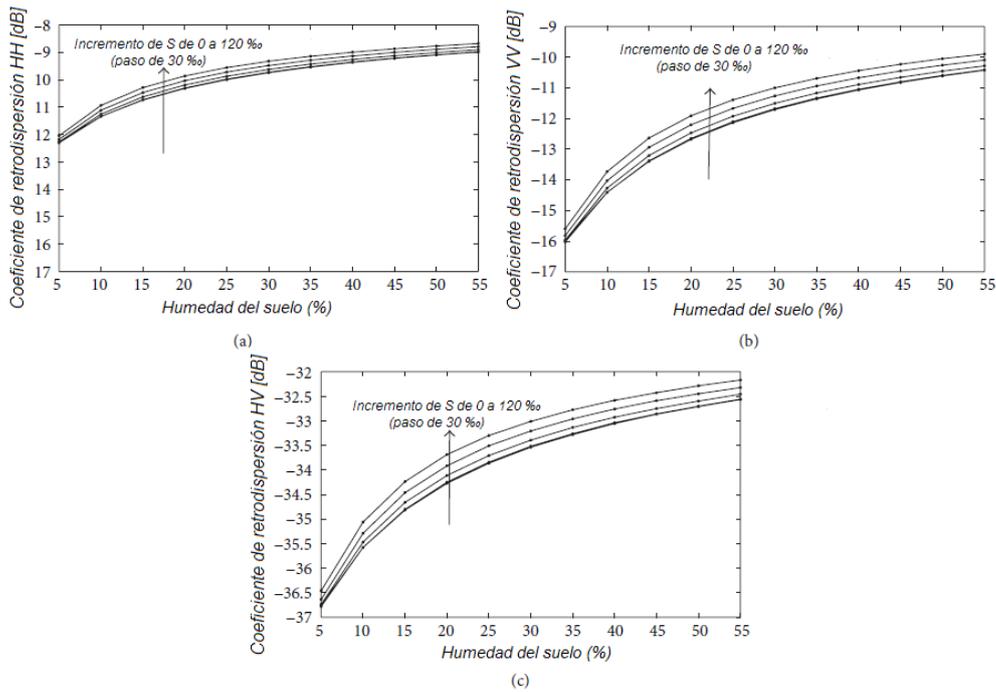
Aly *et al.* [67] volvieron a estudiar los modelos de retrodispersión para entender el comportamiento de los coeficientes de retrodispersión en suelos afectados por sal. Basado en una serie de relaciones, se propuso una formulación paramétrica que permita la determinación de la salinidad en imágenes RADARSAT combinando tres modos distintos del satélite (S1, S3 y S5) sin el uso de modelos.

Lasne *et al.* [11] computaron los coeficientes de retrodispersión de radar en banda L para valores de constante dieléctrica previamente medidos. Los resultados, presentados en la Figura 2.16, indican que la sensibilidad del coeficiente de backscattering a la salinidad depende del contenido de humedad, donde la sensibilidad es más importante para la polarización vertical (VV).



**Figura 2.16:** Simulaciones del modelo IEM para los coeficientes de retrodispersión en banda L a  $40^\circ$  [11].

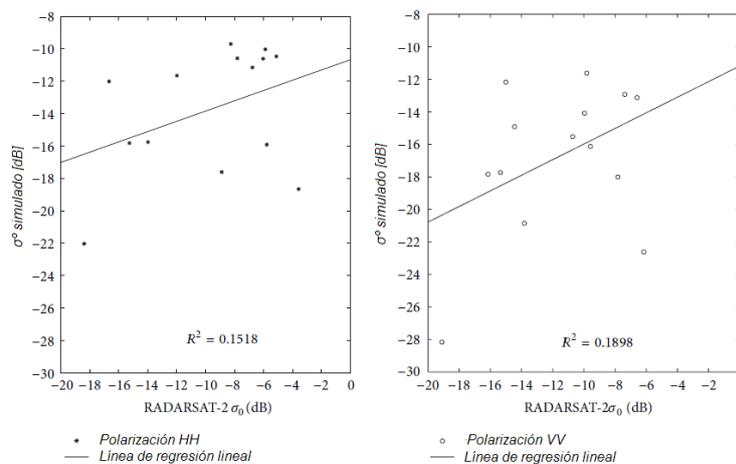
Li *et al.* [35] usaron modelos de retrodispersión para entender el comportamiento de los coeficientes de retrodispersión en suelos salinos basados en el análisis de su constante dieléctrica. Los efectos de la humedad y la salinidad en la constante dieléctrica combinando el modelo de Dobson con el modelo de agua salina fueron analizados usando RADARSAT-2, y luego los coeficientes de retrodispersión fueron simulados usando el modelo AIEM.



**Figura 2.17:** Simulaciones AIEM de la constante dieléctrica simulada para un coeficiente de retrodispersión en banda C a 40° respecto a humedad y salinidad de suelo (a) HH, (b) VV, y (c) HV [35].

Los resultados, presentados en la Figura 2.17, muestran que la sensibilidad de los coeficientes de retrodispersión respecto a la salinidad del suelo depende del contenido de humedad del suelo. Con un incremento en la humedad, el coeficiente simulado incrementa su valor, mismo efecto observado con salinidad. La salinidad en este estudio afecta apenas más a la polarización HH que a los otros dos modos simulados, particularmente donde el contenido de humedad es alto.

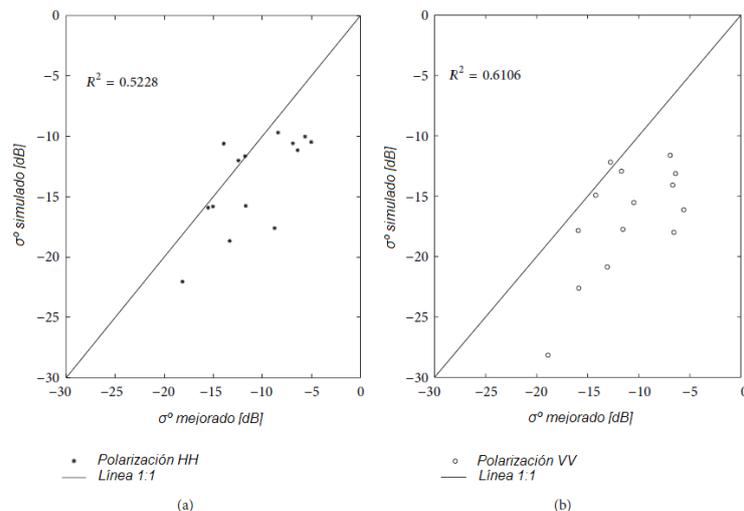
El coeficiente de retrodispersión simulado y extraído de las imagen RADARSAT en polarización HH y VV son mostrados en la Figura 2.18. La relación entre  $\sigma_0$  simulados y de la imagen es de 0.1518 (HH) y 0.1898 (VV).



**Figura 2.18:** Coeficientes de retrodispersión simulados VS imagen RADARSAT-2 en polarización a) HH y b) VV [35].

La correspondencia obtenida fue muy pobre, donde los autores apuntan a una influencia de píxeles mixtos. El tipo de suelo salino-alcalino de la región se encuentra en una pradera,

caracterizada por pradera con áreas de suelos desnudos. Para compensar el efecto de éstas pasturas en el píxel, un modelo de nube de agua fue usado para este fin, pero no fue considerado suficiente para resolver el problema.



**Figura 2.19:** Coeficiente de retrodispersión compensado por vegetación usando modelo de nube de agua con coeficiente de retrodispersión simulado en polarización a) HH y b) VV [35].

En la actualidad el estudio de la salinidad se está enfocando en el uso de descriptores polarimétricos y el uso de técnicas de *machine learning*. Nurmemet *et al.* [68] utilizaron técnicas de descomposición polarimétrica múltiple, junto con técnicas de selección de características óptimas (wrapper feature selector, WFS) y algoritmo de Support Vector Machine (SVM) con imágenes quad-pol PALSAR-2 sobre el oasis de Keriya, China. La precisión global y el coeficiente Kappa obtenidos fueron de 87.57% y 0.85 respectivamente, más altos que aquellos calculados y obtenidos por clasificación supervisada de Wishart y de clasificación por SVM.

Taghadosi *et al.* [69] usaron técnicas de Support Vector Regression (SVR) con diferentes funciones de kernel para relacionar variables con la salinidad de suelo medida. También aplicaron algoritmos de Selección de Características (Feature Selector, FS) de Algoritmos Genéticos y Selección de Características Secuencial (Sequential Feature Selection, SFS) para optimizar y seleccionar las variables que mejor explican al modelo, mostrando que  $\epsilon$ -SVR con un kernel de Radial Basis Function (RBF) tuvo la mejor precisión con un Coeficiente de Determinación  $R^2 = 0.9783$  y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) = 0.3561 usando imágenes Sentinel-1 en VV y VH.

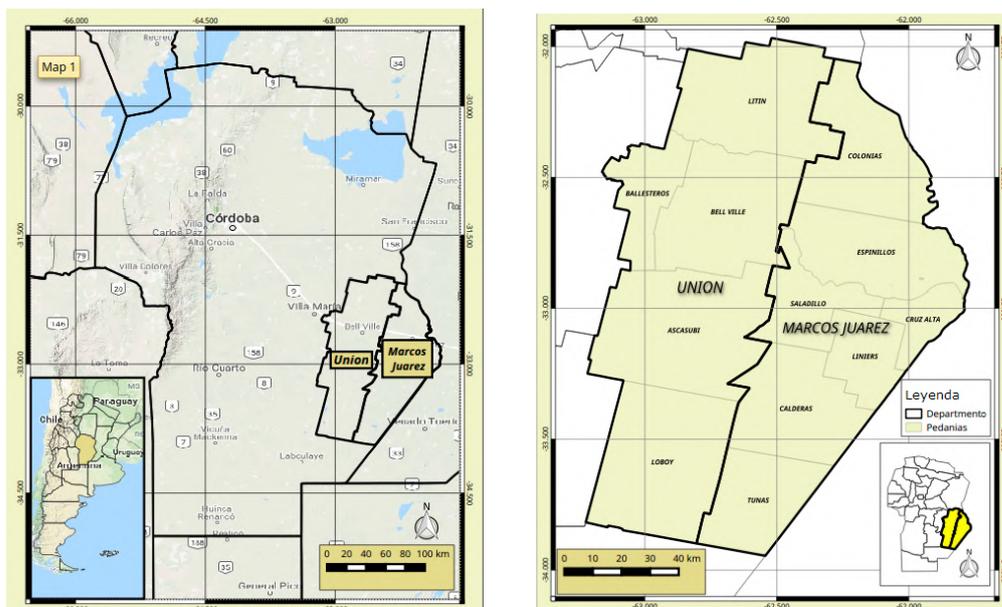
Cheng *et al.* [70] analizaron los datos full-polarimétricos en una imagen RADARSAT-2, y la entropía, anti-entropía y ángulo promedio de retrodispersión fueron extraídos para caracterizar el mecanismo de retrodispersión en Qian An County, China. Basada en espacio  $H/\alpha$  combinado con una clasificación no supervisada de Wishart, el tipo de medio retrodispersor observado es estimado. La precisión de la clasificación obtenida es comparada con algoritmos tradicionales de clasificación, encontrando que las imágenes full-polarimétricas poseen una ventaja irremplazable para la extracción de información de suelos afectados por salinidad.

Hoa *et al.* [71] estudiaron cinco técnicas de aprendizaje automático consideradas estado del arte del momento (*Multilayer Perceptron Neural Networks*, *Radial Basis Function Neural Networks*, *Gaussian Processes*, *Support Vector Regression*, y *Random Forests*) para el mapeo de salinidad usando información de banda C extraída de Sentinel-1 en el delta del Río Mekong, Vietnam. El desempeño de los cinco modelos confirma que el mapeo de la salini-

dad del suelo depende de los métodos y técnicas usadas. De los cinco modelos, el método de *Procesos Gaussianos* con una función de kernel RBF mostró la mejor precisión ( $r = 0.808$ ,  $RMSE = 2.885$ , and  $MAE = 1.897$ ) demostrando la viabilidad de imágenes Sentinel-1 para producir mapas de salinidad incorporando métodos de aprendizaje automático.

### 3.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende los departamentos Unión y Marcos Juárez, localizados al SE de la provincia de Córdoba. En esta área se encuentra localizado el *Core Site* destinado a la calibración y validación de la misión SAOCOM, cuyas coordenadas centrales son  $32^{\circ} 40' 56.43''$  S,  $62^{\circ} 25' 18.19''$  O. La red telemétrica del equipo SAOCOM se encuentra en área, donde datos de humedad de suelo como de salinidad son recolectados mediante sensores instalados en la zona, fuente de datos de campo para el trabajo final (ver Sección 4.4).



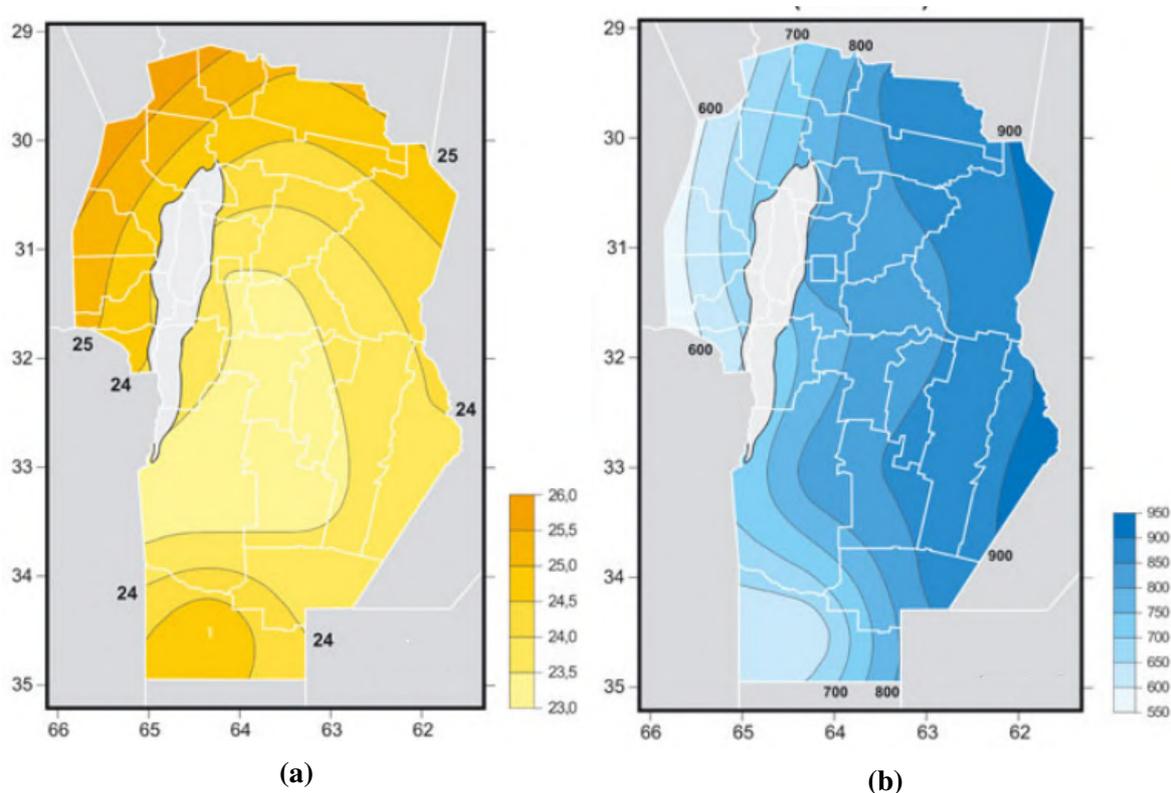
**Figura 3.1:** Localización en la provincia de Córdoba del área de estudio y el Core Site de SAOCOM en los departamentos Unión y Marcos Juárez.

Desde un punto de vista agrícola, los cultivos representativos de la región son la soja, el maíz y el trigo. Como cultivos secundarios se pueden encontrar sorgo, cebada y maní. En esta área

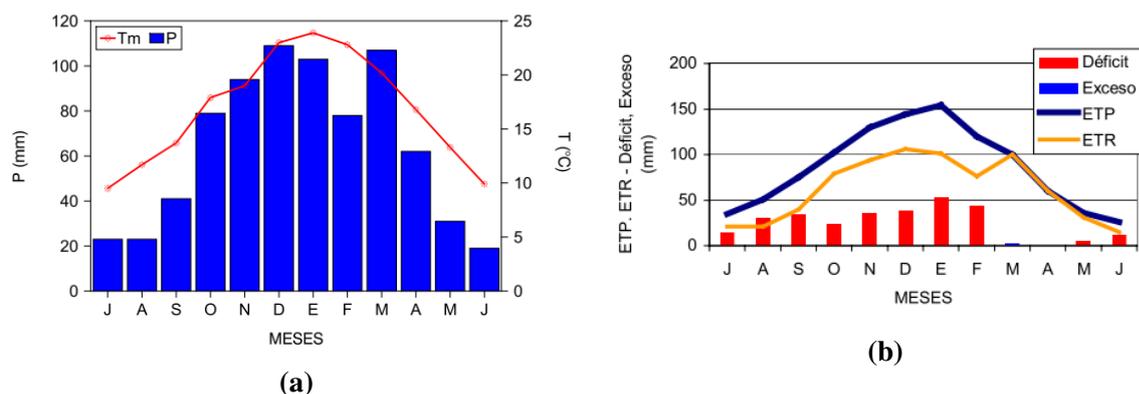
### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

los productores respetan la rotación de cultivos sugerida por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): Noviembre-Diciembre a Marzo-Abril: soja y maíz rotando de año a año. Abril a Noviembre: trigo. El sistema de producción adoptado por los productores es el de *siembra directa* [72]

El clima local en el área de estudio es continental templado con una temperatura anual media de 17.4 °C. Enero es el mes más cálido, con una temperatura media de 23.9 °C y Julio el más frío, con una media mensual de 9.5 °C. Las precipitaciones media son de aproximadamente 840 mm, acumuladas principalmente de Septiembre a Abril [73]. La Figura 3.3b presenta el balance hídrico climático de Bell Ville (ciudad representativa del área). Es notable tomar en cuenta que las variaciones estacionales de precipitaciones, evapotranspiración potencial y real están siempre en déficit, excepto en Marzo, Abril y Mayo [73].



**Figura 3.2:** Régimen climático de Córdoba: a) Temperaturas medias de Enero. b) Precipitación media Anual. [73].



**Figura 3.3:** a) Régimen climático y b) hidrológico de la ciudad de Bell Ville [73].

### 3.1.1. Geomorfología

La provincia de Córdoba puede ser básicamente dividida en 22 áreas geomorfológicas que definen aspectos geomórficos, estructurales y de vegetación bien marcados en cada sección (Figura 3.4a). En el área de estudio los principales representantes, de acuerdo a [73], son:

1. *Depresión del arroyo Tortugas - San Antonio*: Constituye una faja deprimida y alargada con orientación Norte - Sur. El drenaje en general es deficiente y son tierras que se anegan con facilidad y frecuentemente en épocas lluviosas. Los materiales superficiales son esencialmente de origen fluvial o eólico redepositados por corrientes fluviales, con salinidad y alcalinidad sódica. La vegetación natural es fundamentalmente halófila e hidrófila. Debido a esto son tierras de baja aptitud agrícola.
2. *Pampa loésica plana*: Es la de mayor extensión de la provincia de Córdoba, ubicándose en el área central de la llanura. El relieve es muy suave con gradientes regionales hacia el Este que no superan el 0,3% y los materiales predominantes están constituidos por potentes depósitos eólicos de textura franco limosa.
3. *Pampa ondulada*: Ocupa un pequeño sector en el centro Este y comprende lomas ligera a moderadamente onduladas, con pendientes que oscilan entre 0,5 y 3%, atravesadas por vías de escurrimiento semitemporarias. Tiene un drenaje natural libre y los suelos se han desarrollado sobre sedimentos eólicos franco limosos, siendo los más productivos de la Provincia. Han sido intensamente incorporados a actividades eminentemente agrícolas, encontrándose afectados por importantes procesos erosivos que son el resultado de las precipitaciones y de la forma y longitud de las pendientes y del uso intensivo de los suelos, principalmente en aquellos que drenan hacia las vías de desagüe más importantes.
4. *Pampa arenosa*: Extensa unidad fisiográfica ubicada al centro Sur y Sudeste de la Provincia en el límite con la provincia de Santa Fe. Este sector de la llanura cordobesa se caracteriza esencialmente por los materiales de origen eólico de textura franco arenosa fina. El relieve localmente dominante es el de lomas muy suavemente onduladas, con proporciones menores de lomas medanosas. Estas formas fisiográficas menores tienen una marcada orientación NNE - SSO por acción de los vientos dominantes. La capa freática no está muy profunda, y la mayor parte de los bajos y fundamentalmente las cubetas asociadas a las áreas medanosas, son cuerpos de agua permanentes o semipermanentes alimentados por ella, con la consiguiente salinización y alcalinización de los suelos.

### 3.1.2. Edafología

El agrupamiento de suelos similares, tiene por finalidad definir un uso productivo posible y el manejo más adecuado, manteniendo o mejorando su integridad física y biológica. Conocer qué suelos existen en una región, es información básica para la gestión directa del territorio [73].

Una clasificación proporciona criterios diferenciadores con fundamento científico y hace posible la subdivisión sistemática de ese todo en entidades simples o sea, clases del sistema. Al clasificar los suelos que ocurren en una región al ser caracterizados por un número de propiedades que les son específicas y que pueden ser identificadas por los nombres de las clases taxonómicas [73].

De acuerdo a esta clasificación las series de suelos presentes en el área de estudio son principalmente *Argiudol* de acuerdo a la taxonomía de suelo de la USDA. Éste tipo de suelo está caracterizado por un suelo oscuro, bien drenado, fértil debido a los altos contenidos de materia orgánica, y con moderada retención de humedad adecuado para agricultura y ganadería.

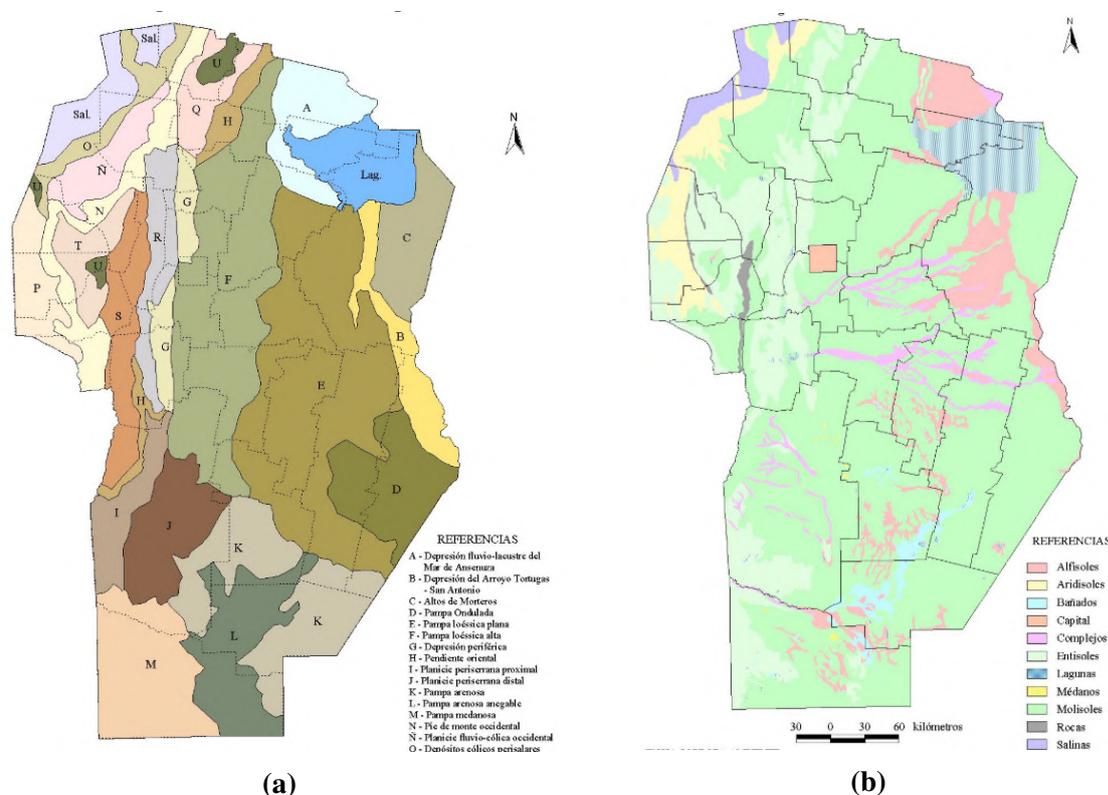


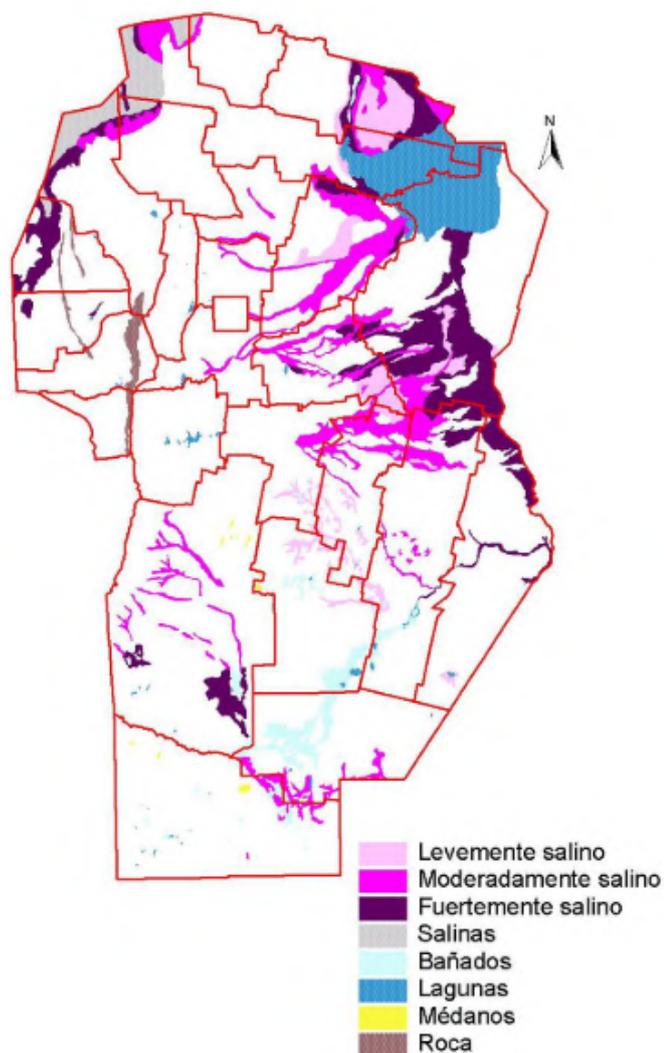
Figura 3.4: a) Geomorfología y b) Distribución de suelos en la provincia de Córdoba [73].

### 3.2. Salinidad en Córdoba y en el área de estudio

Los suelos afectados por agua y por el exceso de sales solubles en la región central de las Pampas se debe a la interacción de factores climáticos, hidro-geológicos, geomorfológicos, e hidrológicos, que dieron y continúan dando a esta área una evolución dinámica a través del espacio y del tiempo [74, 75].

El comportamiento típico hidrológico de las Pampas es aquel donde el agua superficial se mueve solo localmente y en diferentes direcciones y no existe un red de desagüe desarrollada [75]. En estas áreas que reciben ésta agua superficial, o donde el nivel freático está cerca y en contacto con la superficie, es donde los suelos halomórficos se desarrollan, influenciados por las sales solubles presentes en el agua y por la alternancia de períodos secos y húmedos. En esta situación las sales tienden a acumularse debido a procesos de evaporación y deposición de minerales [75].

En Córdoba el 16% de su superficie está afectado por algún grado de salinidad, lo que corresponde a 2,3 millones de hectáreas que se encuentran ubicadas en gran parte en los bañados del Río Dulce al norte y en los derrames de los ríos interiores de la llanura que solo ocasionalmente desaguan libremente [75]. Entre las principales sales involucradas en este proceso se encuentran  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , and  $Na^+$ , y en menor proporción  $CO_3^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  [74].



**Figura 3.5:** Distribución de suelos salinos en la provincia de Córdoba [76].

**Tabla 3.1:** Áreas afectadas por salinidad en la provincia de Córdoba [73].

Grupos	Clases	Área (en miles de hectáreas)
No-salino		11965
Salino		2327
	Bajo	809
	Moderado	496
	Fuerte	1013

---

## Materiales y Métodos

---

Existen diferentes maneras de clasificar los datos adquiridos por sensores remotos, de acuerdo a la fuente de la energía (sensores activos o pasivos), el tipo de plataforma (terrena, aérea o satelital), la región del espectro usada (óptica, infrarroja, microondas), el número y ancho espectral de las bandas (pancromático, multiespectral, hiperspectral), resolución espacial (alta, medio, baja), resolución temporal (horaria, diaria, semanal) y resolución radiométrica (8, 12 y 16 bits) [77].

En este contexto se describen los materiales y métodos utilizados para los tres análisis presentes en este trabajo: análisis óptico, análisis con imágenes SAR con imágenes COSMO-SkyMed (banda X), y análisis con imágenes SAR con imágenes SAOCOM (banda L). También se describe la red de datos telemétrica de CONAE, fuente de datos utilizada para la validación de resultados.

### 4.1. Análisis óptico

Aunque el presente trabajo se centre principalmente en el uso de imágenes de radar de apertura sintética, el uso de imágenes ópticas para el estudio de salinidad es otro campo prometededor para el monitoreo del fenómeno. Los diferentes satélites ópticos usados para el mapeo de áreas salinas incluyen Landsat TM [78, 79], Landsat MSS [80], Landsat OLI [81, 82], Spot Multispectral (XS) [82], Terra-ASTER [83, 84], Sentinel-2 [85, 86], entre otros.

La implementación de datos de sensores remotos ópticos en esta temática también derivó al uso, estudio y desarrollo de diferentes índices, tales como el índice de salinidad (SI, en inglés), el índice de diferencia normalizada de salinidad (NDSI), el índice de brillo (BI) junto con índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), como visto en [87, 88, 89, 90].

Como un estudio preparatorio al tema, entonces, se realizó un análisis con imágenes ópticas usando los índices más utilizados según la literatura para el estudio de la salinidad (ver Tabla 4.1). Para ello se tomó como referencia imágenes Sentinel-2 del área de estudio y zonas aledañas (Cañada de Jeanmarie) junto con datos de campo del 2017, año de adquisición de la imagen COSMO-SkyMed posteriormente utilizada.

**Tabla 4.1:** Índices ópticos empleados y analizados.

Índices de salinidad	Fórmula
Índice de diferencia normalizada de salinidad	$NDSI = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$
Índice de brillo	$BI = \sqrt{(R^2 + NIR^2)}$
Índice de salinidad-1	$SI_1 = \sqrt{BxR}$
Índice de salinidad-2	$SI_2 = \sqrt{GxR}$
Índice de salinidad-3	$SI_3 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$
Índice de salinidad-4	$SI_4 = \sqrt{G^2 + R^2}$
Índice de salinidad-7	$SI_7 = \frac{(GxR)}{B}$
Índice de salinidad-9	$SI_9 = \frac{(NIRxR)}{G}$
CRSI	$CRSI = \sqrt{\frac{(NIRxR) - (GxB)}{(NIRxR) + (GxB)}}$
Aster-1	$Aster_1 = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$
Aster-2	$Aster_2 = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$

### 4.1.1. Características de las imágenes

Sentinel-2 es una misión satelital europea multiespectral de alta resolución, que consiste en dos satélites gemelos situados en la misma órbita pero desfasados 180 grados. Se encuentra diseñado para un revisita temporal alta de 5 días en el Ecuador, y lleva consigo un instrumento óptico que muestrea en 13 bandas espectrales distintas: cuatro bandas a 10 metros, seis bandas a 20 metros y tres bandas a 60 m de resolución espacial [91].

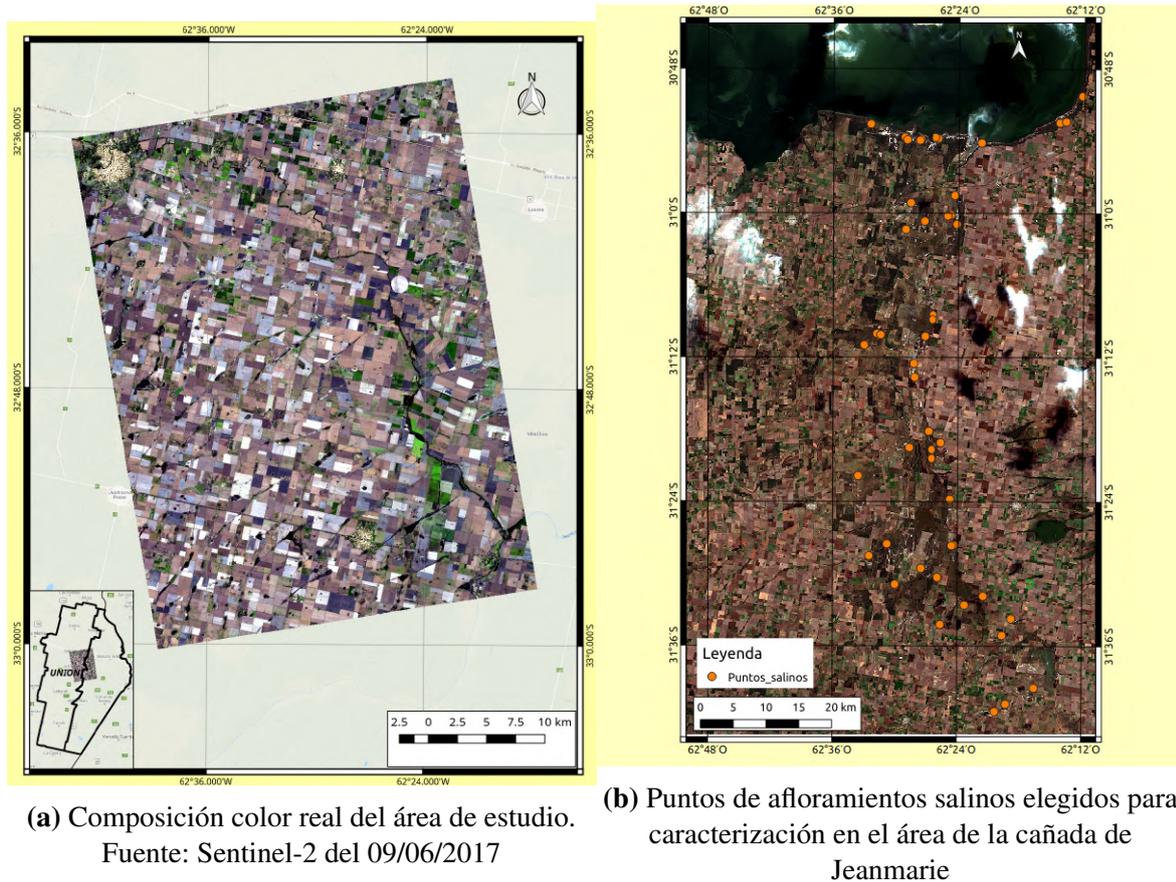
La imagen SENTINEL-2 utilizada en este estudio fue descargada gratuitamente del sitio <http://scihub.copernicus.eu/> en nivel L1C. Para tomar en cuenta los efectos atmosféricos y convertir la imagen de reflectancia en tope de atmósfera (TOA) a reflectancia en nivel de suelo (BOA), el procesador SEN2COR es ejecutado en el software SNAP para obtener las bandas finales corregidas usadas en esta metodología. Este procesador tiene como propósito principal corregir imágenes SENTINEL-2 en nivel L1-C de los efectos de la atmósfera para entregar como resultado la imagen en reflectancia corregida a nivel de suelo, o sea a nivel L2A [92].

**Tabla 4.2:** Características de las imágenes Sentinel 2 empleadas.

	Área de Estudio	Cañada Jeanmarie
Fecha de Adquisición	09/06/2017	09/06/2017
Plataforma	Sentinel 2A	Sentinel 2A
Número de Mosaico	T20HNJ	T20JNL
Cobertura nubosa	0,00	7,21
Nivel de Procesamiento	L1C	L1C

### 4.1.2. Metodología

Para el análisis de las imágenes ópticas se analizaron dos situaciones distintas para su posterior comparación: áreas salinas y no salinas. Para el caso de áreas no salinas, se toma como referencia los puntos de muestreo de la red telemétrica de CONAE (ver Sección 4.4), que para la fecha de las imágenes se encuentran dentro del rango de suelo no salino (ver Anexo A). Para el caso de área salinas se determinaron 50 puntos en el área correspondiente a afloramientos de sales mediante inspección óptica en la zona de la cañada de Jeanmarie, ubicada contiguamente al norte del área de estudio.



**Figura 4.1:** Imágenes ópticas utilizadas en el análisis.

Los puntos elegidos para el análisis se muestran en la Figura 4.1: a la izquierda la localización de los sensores telemétricos dentro del área de interés; y a la derecha los puntos de afloramientos salinos elegidos. La comparación entre ambas situaciones se realiza a través del análisis del histograma de los índices propuestos, estableciéndose el valor de cruce de los histograma como el umbral de separación entre ambas regiones.

## 4.2. Análisis COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation) es la inversión más grande del gobierno italiano en Sistemas Espaciales para la Observación de la Tierra. Es un sistema dual (aplicaciones civiles y de defensa) que apunta a establecer un servicio global de provisión de datos, productos y servicios que respondan a estándares establecidos internacionalmente y relevantes a un gran abanico de aplicaciones como Emergencias y Gestión de Riesgos, aplicaciones científicas y comerciales como militares. El sistema en su totalidad consiste en una constelación de cuatro satélites medianos, cada uno equipado con un Radar de Apertura Sintética (SAR) operando en banda X [93].

### 4.2.1. Características de las imágenes

Para esta primera aproximación se utilizó una única imagen COSMO-SkyMed y una imagen óptica SENTINEL-2, para poder calibrar y poner en funcionamiento la metodología propuesta en la Figura 4.2.

Para la selección de las fechas del análisis se debe tener en cuenta diversos factores: primero existe una necesidad de proximidad temporal de las imágenes ópticas y radar a analizar, segundo los modelos electromagnéticos trabajan mejor en suelos desnudos o con poca vegetación, y tercero que una humedad relativamente importante, al menos superando la humedad de transición, es deseable para observar el efecto de la salinidad en la constante dieléctrica.

Como el área de estudio es usada principalmente para propósitos agrícolas, y en concordancia con la época invernal donde la vegetación natural tiene a perder vigor, el mes de Junio fue elegido para este primer análisis. También esta fecha coincide con la cosecha de maíz, uno de los cultivos principales del área, dejando atrás parcelas de suelo desnudos en las parcelas dedicadas a ellas.

**Tabla 4.3:** Características de la imagen COSMO-SkyMed empleada.

	COSMO-SkyMed
Fecha de Adquisición	07/06/2017
Modo del Instrumento	StripMap (Ping Pong)
Polarización	HH, VV
Orientación de la observación	Izquierda
Dirección de pasada	Ascendente
Beam ID	PP-11
Nivel procesamiento	L1C
Ángulo de rango cercano	36,897471
Ángulo de rango lejano	38,585495
Satélite	CSK 2

El procedimiento es adaptado del trabajo de Bell *et al.* [64] con modificaciones pertinentes a este trabajo tomando en cuenta la disponibilidad de las imágenes junto con sus características, y los respectivos datos de campo.

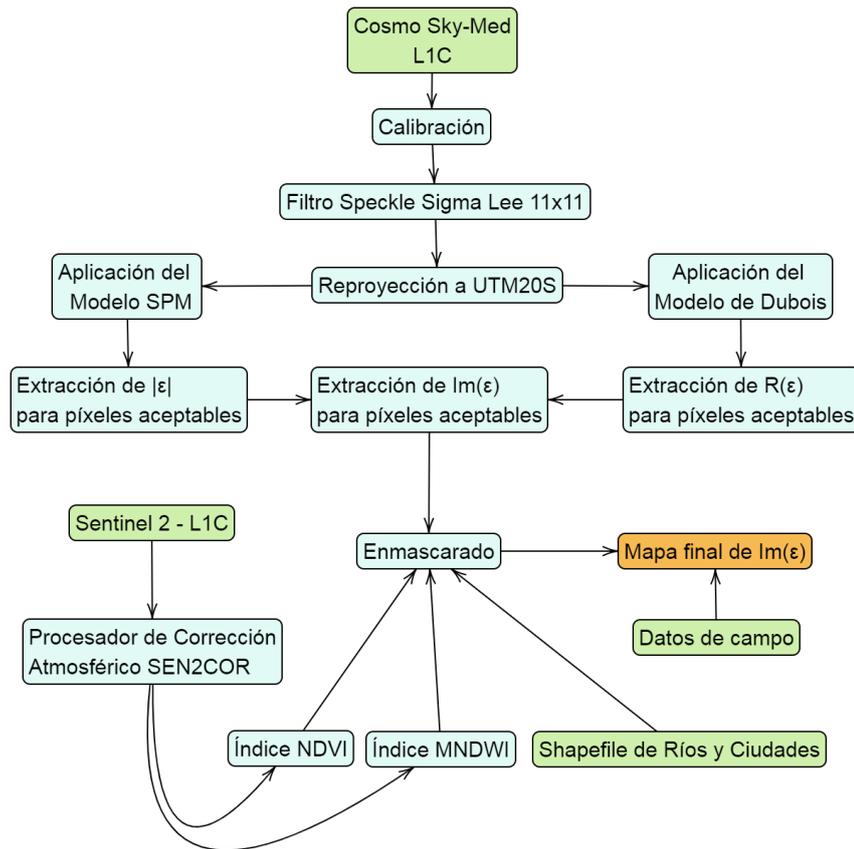


Figura 4.2: Metodología utilizada para la imagen en banda X (COSMO-SkyMed).

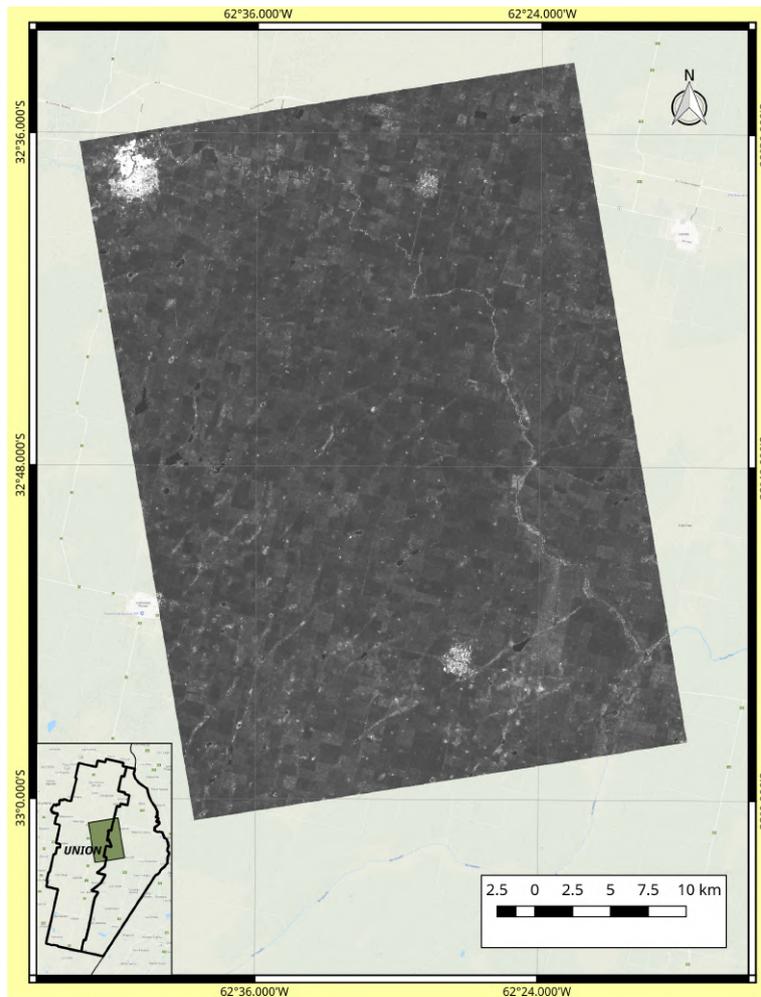
### 4.2.2. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

La imagen COSMO-SkyMed fue ordenada y obtenida en nivel L1-C, dirigido a generar productos Geocodificados corregidos por Elipsoide (GEC, en inglés). Un producto GEC contiene datos enfocados, geolocalizados en el elipsoide de referencia y representados en una cartografía predeterminada [94].

Paso siguiente se realizó una calibración para convertir la imagen en amplitud a coeficiente de retrodispersión, expresados tanto en unidades lineales y dB, cuya correspondencia está expresada en la Ecuación 4.1.

$$\sigma_{0[dB]} = 10 * \log(\sigma_0) \quad (4.1)$$

Para finalizar un filtro de speckle de ventana 11x11 fue aplicado a la imagen COSMO-SkyMed (Figura 4.3). La elección de un ventana tan grande para este paso se debe a una imagen inherentemente ruidosa propia de imágenes co-polarizadas (Modo PING-PONG) donde se obtuvieron los mejores resultados comparando con otros tamaños de ventana testeados (3x3 y 5x5).



**Figura 4.3:** Imagen COSMO-SkyMed (07/06/2017) empleada, polarización VV [dB].

### 4.2.3. Procesamiento

Antes de realizar el procesamiento, las siguientes suposiciones fueron realizadas en ciertos parámetros para esta primera aproximación del problema (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4:** Lista de los valores de parámetros usados para el procesamiento.

	Valores
Frecuencia	9,65 GHz
RMS	0,7 cm
Ángulo de Incidencia	37,741483 grados

El valor de la frecuencia usada en valor de la frecuencia central del instrumento COSMO-SkyMed; el valor de RMS es un valor típico de rugosidad para la práctica de siembra directa [95], considerando que ésta práctica se encuentra distribuida en el área de estudio y es representativa de la condición del suelo. Con respecto al ángulo de incidencia, la media entre el ángulo de rango cercano y lejano de la imagen fue tomado como el valor usado para las simulaciones.

### 4.2.3.1. Aplicación del Modelo de Dubois

Para aplicar este método un algoritmo desarrollado en lenguaje Python fue usado tanto para leer, re proyectar y procesar los datos junto con la librería *Rasterio* [96]. Como el ángulo de incidencia es considerado una constante, el modelo puede ser invertido con un enfoque analítico usando un algoritmo de inversión de dos pasos con las siguientes ecuaciones [65]:

$$\varepsilon' = \frac{C_{vv}(\sigma_{hh}^\circ - A_{hh}) - C_{hh}(\sigma_{vv}^\circ - A_{vv})}{\tan\theta(B_{hh}C_{vv} - B_{vv}C_{hh})} \quad (4.2)$$

$$s = \frac{\lambda}{2\pi\sin\theta} 10^{\frac{B_{hh}(\sigma_{vv}^\circ - A_{vv}) - B_{vv}(\sigma_{hh}^\circ - A_{hh})}{B_{hh}C_{vv} - B_{vv}C_{hh}}} \quad (4.3)$$

donde  $\sigma^\circ$  se encuentra expresado de la forma  $\log_{10}(\sigma_{intensidadlineal}^\circ)$ , y:

$$A_{hh} = 1,5\log(\cos\theta) - 1,5\log(\sin\theta) + 0,7\log(\lambda) - 2,75 \quad (4.4)$$

$$A_{vv} = 3\log(\cos\theta) - 3\log(\sin\theta) + 0,7\log(\lambda) - 2,35 \quad (4.5)$$

$$B_{hh} = 0,028 \quad (4.6)$$

$$B_{vv} = 0,046 \quad (4.7)$$

$$C_{hh} = 1,4 \quad (4.8)$$

$$C_{vv} = 1,1 \quad (4.9)$$

La validez de este modelo está restringido a los rangos de  $ks \leq 2,5$ ,  $\theta \geq 30$  y  $m_v \leq 35\%$ , condiciones que se cumplen este estudio. Además los resultados sin significado físico (valores negativos) fueron considerados no dato para el análisis final.

### 4.2.3.2. Aplicación del Modelo SPM

Para aplicar el modelo de pequeña perturbación (SPM) un algoritmo de Python fue también desarrollado, en el cual el ratio HH/VV fue calculado y luego usado como dato de entrada al algoritmo de inversión. Dicha inversión de la magnitud de  $\varepsilon$  usando el Modelo de Perturbación Pequeña es bastante directo: la formación del ratio de backscattering lleva directamente a una ecuación no lineal que, para un ángulo de incidencia dado, depende sólo de  $|\varepsilon|$  (expresado como  $\varepsilon$  en la Ecuación 4.10) [97].

$$\frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} = \frac{(\varepsilon\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})^4}{(\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})^4(\varepsilon + \varepsilon\sin^2\theta_i - \sin^2\theta_i)^2} \quad (4.10)$$

Debido a la complejidad de la Ecuación 4.10 una solución analítica no puede ser directamente extraída del ratio de retrodispersión. Consecuentemente, una Tabla de Búsqueda (LUT, Look Up Table en inglés) fue realizada para obtener los valores óptimos de  $|\varepsilon|$  de la retrodispersión observada, con el rango de  $|\varepsilon|$  restringido de 0.5 a 150 con un paso de 0.01.

Una vez que la Tabla de Búsqueda fue construida,  $|\varepsilon|$  se extrajo usando una función de costo para buscar el mejor ajuste del ratio de retrodispersión de la Tabla de Búsqueda, con el valor de ratio observado en la imagen COSMO-SkyMed. En este estudio la diferencia absoluta del valor modelado y observado fue seleccionado como función de costo y definida como [61]:

$$AE_r = \left\| \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} \text{estimado} - \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{VV}} \text{CSK} \right\| \quad (4.11)$$

#### 4.2.3.3. Aplicación del Modelo Combinado

La aplicación del modelo combinado es realizada fácilmente tomando en cuenta la parte real, calculada con el modelo de Dubois; y la magnitud de la constante dieléctrica derivada de la inversión del modelo SPM.

Como resultado se obtiene la parte imaginaria de la constante dieléctrica, un útil indicador para la detección de salinidad como ya explicado en la Sección 2.4.

$$Im[\varepsilon] = \sqrt{|\varepsilon|^2 - (Re[\varepsilon])^2} \quad (4.12)$$

Nuevamente una exclusión de datos no válidos es realizada correspondientes a aquellos píxeles cuya magnitud de la constante dieléctrica es mayor que la parte real, clasificándolos como no dato.

#### 4.2.4. Enmascarado de zonas no válidas

La aplicación de máscaras, o enmascarado, es el proceso con el cual se excluye del análisis aquellos píxeles cuyas coberturas reales el modelo no describe (*i.e.* cursos de agua, zonas urbanas), o no entran dentro de los rangos válidos de los mismos.

Para el caso del análisis con imágenes COSMO-SkyMed, las máscaras fueron utilizadas para excluir coberturas de vegetación, áreas urbanas, ríos y cuerpos de agua temporales y permanente (Tabla 4.5). Para ello se utilizó la imagen Sentinel-2 corregida atmosféricamente con las características descritas en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.5:** Características de las máscaras usadas.

	Fuente	Umbral
Vegetación	Sentinel 2 (NDVI)	0.3
Cuerpos de Agua	Sentinel 2 (MNDWI)	0.0
Ciudades	WFS (IDECOR)	-
Ríos	WFS (IDECOR)	-

Para excluir cobertura vegetal y solo lidiar con píxeles de suelos desnudos, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) fue calculado (Ecuación 4.13) usando una imagen Sentinel-2 corregida atmosféricamente del 09/06/2017, donde los píxeles de suelos desnudo son considerados aquellos que no exceden el umbral de 0,3.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} = \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4} \quad (4.13)$$

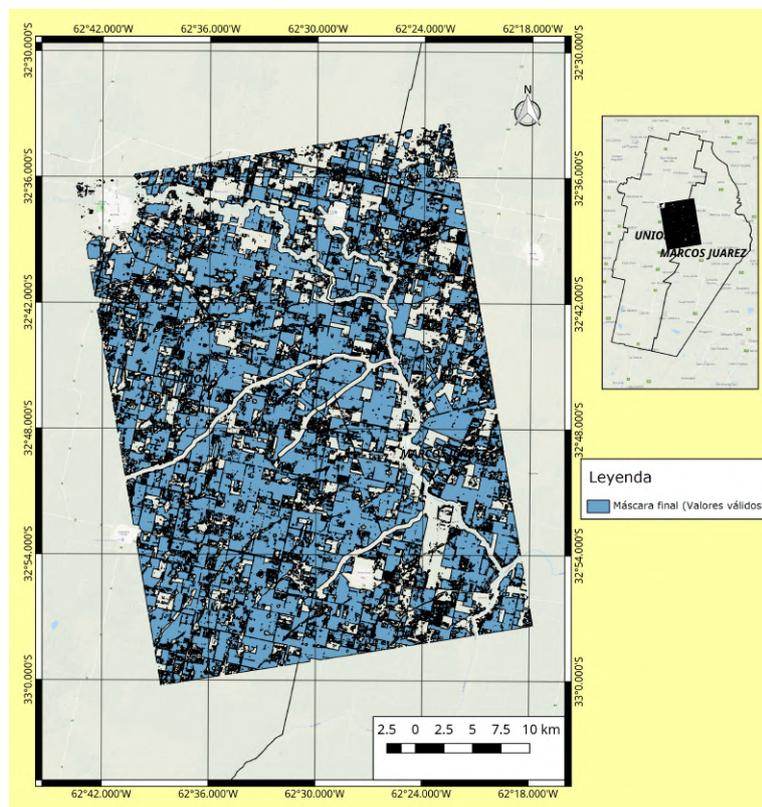
Para excluir los cuerpos de agua, sean temporales o permanentes, el índice MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) fue calculado (Ecuación 4.14) usando también la misma imagen Sentinel-2 del 09/06/2017, donde los píxeles de agua son considerados aquellos que no exceden el umbral de 0,0.

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} = \frac{Band3 - Band11}{Band3 + Band11} \quad (4.14)$$

Para excluir del análisis las áreas urbanas y los cursos de agua no relevantes al estudio, los shapefiles correspondientes fueron descargados del servicio oficial WFS de la provincia de Córdoba, al que se le aplicó con un buffer de 200 metros. La máscara final delimitando las zonas válidas de muestra en la Figura 4.4.

Web Feature Service o WFS del Consorcio Open Geospatial Consortium es la especificación creada para solicitar y recibir, a través de protocolos HTTP, datos geográficos y sus atributos. El servicio permite identificar, descargar, consultar, filtrar, bloquear y modificar dicha información geográfica [98].

Los servicios Web Feature Service (WFS) de Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR) posibilitan trabajar directamente con los datos vectoriales alojados en el servidor de IDECOR desde cualquier aplicación SIG de escritorio, una plataforma en la nube o incluso una aplicación de la organización [98].



**Figura 4.4:** Máscara final excluyendo áreas urbanas, cuerpos de agua y zonas con vegetación derivada de imagen Sentinel-2 del 09/06/2017.

### 4.3. Análisis SAOCOM

La serie de satélites SAOCOM abarca el desarrollo de instrumentos activos que operan en el rango de las microondas, cuyo objetivo central es la medición de la humedad del suelo y aplicaciones en emergencias, tales como detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones. Forma parte de un proyecto desarrollado en colaboración con la Agencia Espacial Italiana (ASI) e integra de manera operacional, junto con los satélites italianos COSMO-SkyMed, el Sistema Ítalo Argentino de Satélites para Gestión de Emergencias (SIASGE), donde la misión SAOCOM consta de dos satélites idénticos, SAOCOM 1-A (lanzado el 7 de octubre de 2018) y SAOCOM 1-B (lanzado el 30 de agosto de 2020).

Más específicamente su objetivo es proveer información de Radar de Apertura Sintética (SAR – Syntetic Aperture Radar) en banda L polarimétrica independientemente de las condiciones meteorológicas y de la hora del día, de distintas zonas de la tierra, en tiempo real y en modo almacenado, con una resolución espacial entre 10 y 100 metros y con diferentes ángulos de observación.

El catálogo de libre acceso <sup>1</sup>, permite la visualización y búsqueda dentro de la base de datos de las imágenes adquiridas por el sistema SAOCOM. Esta búsqueda cuenta con funcionalidades de filtrado tales como fechas de adquisición, área geográfica, polarización, modo de adquisición, niveles de procesamiento, tipo de órbita, dirección de pasada, con la posibilidad de visualizar los metadatos correspondientes a la imagen seleccionada.

#### 4.3.1. Características de las imágenes

Para el análisis de las imágenes SAOCOM se utiliza la capacidad full-polarimétrica del satélite para efectuar la inversión de los modelos propuestos, cuyas características de adquisición se detallan en la Tabla 4.6.

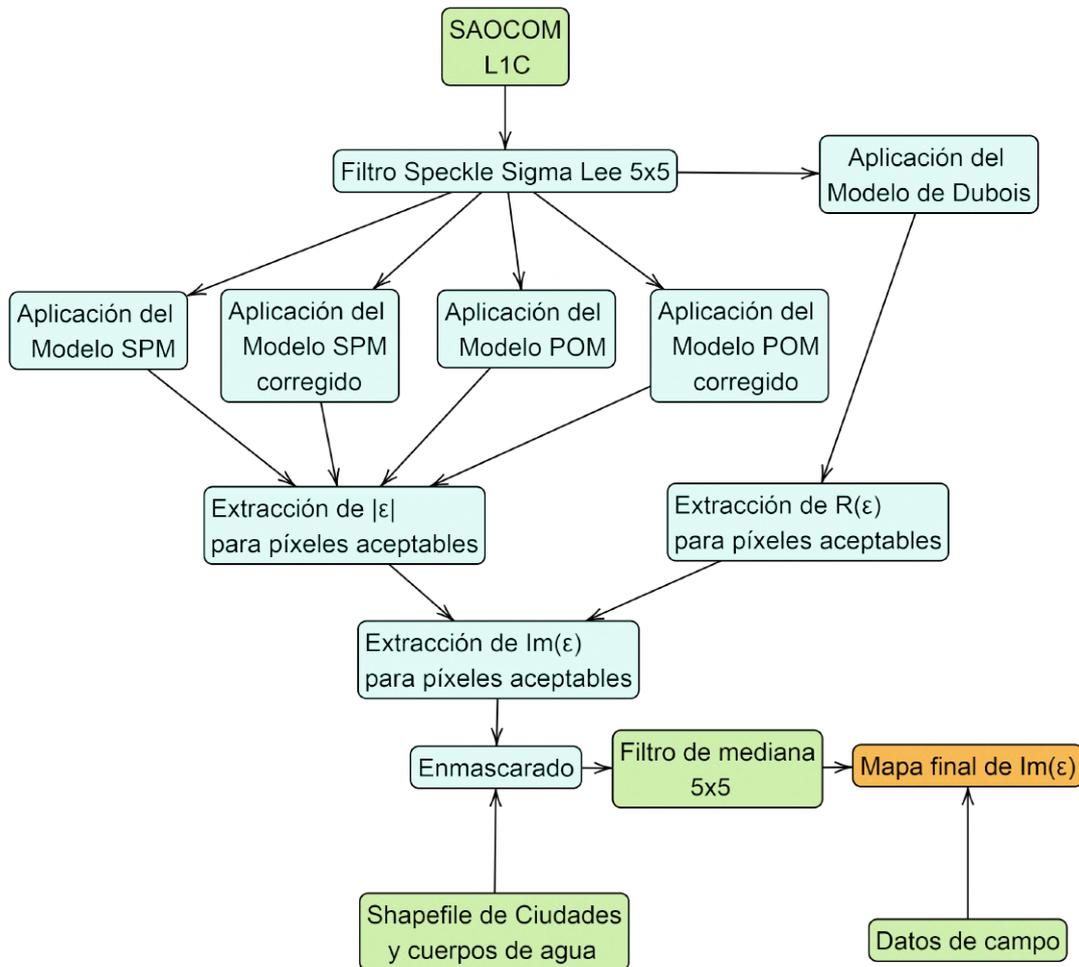
**Tabla 4.6:** Características de la imagen SAOCOM empleada.

Características	
Fecha de Adquisición	13/10/2019
Modo del Instrumento	StripMap
Polarización	Quad-Pol
Orientación de la observación	Derecha
Dirección de la pasada	Descendiente
Posición del Haz	S8
Nivel Procesamiento	L1C
Ángulo de rango cercano	31.2
Ángulo de rango lejano	33.0
Satélite	SAOCOM-1A

<sup>1</sup>Disponible en <https://catalog.saocom.conae.gov.ar/catalog/>

### 4.3.2. Metodología

Para el caso de las imágenes SAOCOM, la metodología empleada es básicamente la misma que la presentada en el análisis con imágenes COSMO-SkyMed, como se muestra en la Figura 4.5. La diferencia principal radica en la utilización de otro modelo para la estimación de la magnitud de la constante dieléctrica, el modelo de POM (Physical Optics Model).



**Figura 4.5:** Metodología utilizada para la imagen en banda L (SAOCOM)

Este modelo es una derivación del modelo de Kirchhoff bajo una aproximación escalar [99], que es válido cuando el radio de curvatura es grande, la rugosidad superficial con su parámetro RMS es pequeño relativo a la longitud de onda, y el ángulo de incidencia es menor a  $35^\circ$ . La formulación del ratio co-polarizado de retrodispersión fue desarrollado en [64], expresado en la Ecuación 4.15.

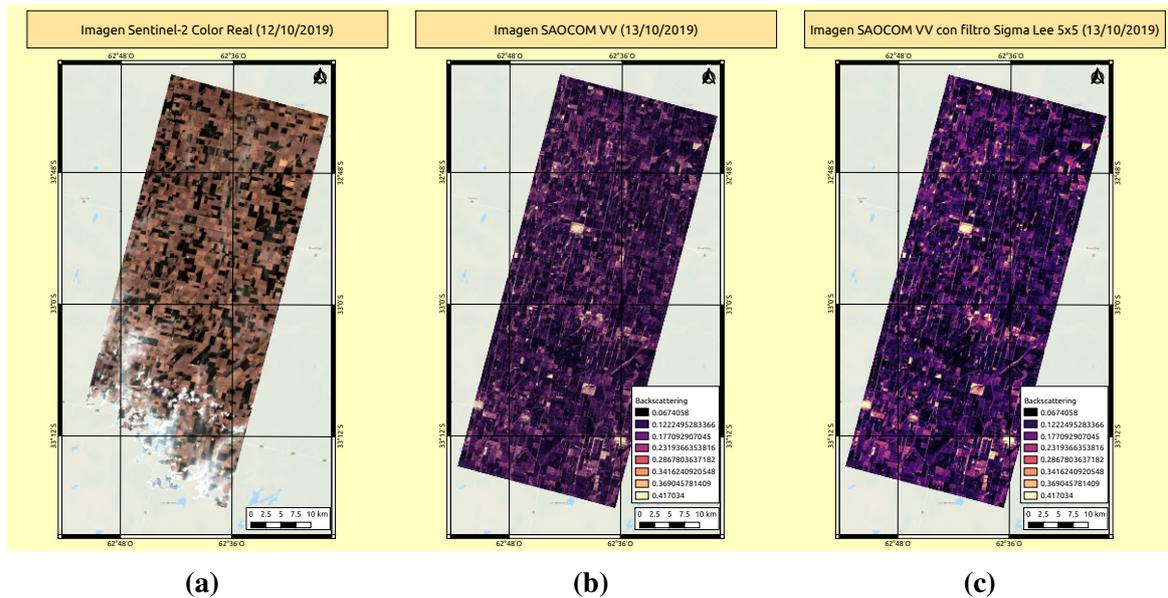
$$\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0} = \frac{(\epsilon \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})^4}{(\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})^4 (\epsilon \cos^2 \theta_i - \sin^2 \theta_i)^2} \quad (4.15)$$

Aparte de los ratio co-polarizados  $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$  una corrección empírica para áreas con píxeles mixtos de suelo desnudos y vegetación para ambos modelos SPM y POM fue también calculada, tal como es expresado en [64], en la forma de  $(\sigma_{hh}^0 - 3\sigma_{hv}^0)/(\sigma_{vv}^0 - 3\sigma_{hv}^0)$ . Dicha

corrección no es aplicada al modelo de Dubois debido a que este modelo es más robusto frente a estas áreas semi pobladas de vegetación.

### 4.3.3. Pre-procesamiento de las imágenes

Las imágenes fueron descargadas en nivel L1C directamente del catálogo Web de la misión SAOCOM, aplicándole un filtro Sigma-Lee con una ventana de 5x5 para reducir la influencia del ruido *speckle* presente.



**Figura 4.6:** Imágenes preprocesadas a) Sentinel 2 color real b) SAOCOM VV c) SAOCOM VV con filtro Sigma Lee 5x5.

### 4.3.4. Procesamiento

Las tablas de búsquedas para invertir los modelos de SPM y POM, tanto corregidos empíricamente como no, se restringieron a valores que van de 1 a 100, usando un paso de 0.01, para estimar la magnitud de la constante dieléctrica, tal como aplicó a su análisis Bell *et. al* [64] en su trabajo. También análogamente al análisis con COSMO-SkyMed, algunas consideraciones fueron realizadas en ciertos parámetros para esta primera aproximación del problema (Tabla 4.7).

**Tabla 4.7:** Lista de los valores de parámetros usados para el procesamiento.

	Valores
Frecuencia	1,275 GHz
RMS	0,7 cm
Ángulo de Incidencia	32,1 grados

El valor de la frecuencia usada en valor de la frecuencia central del instrumento SAOCOM; el valor de RMS es un valor típico de rugosidad para la práctica de siembra directa [95], considerando que ésta práctica se encuentra distribuida en el área de estudio y es representativa

de la condición del suelo. Con respecto al ángulo de incidencia, la media entre el ángulo de rango cercano y lejano fue tomada como el valor usado para las simulaciones.

## 4.4. Datos de campo: Red telemétrica de medición

Los datos *in-situ* son recolectados a través de una red de sensores Hydraprobe distribuidos en la zona de estudio, que miden temperatura, humedad y conductividad eléctrica del suelo junto con la constante dieléctrica asociada. Estos sensores basan sus mediciones en la física y comportamiento de una onda de radio electromagnética reflejada en el suelo para determinar así la constante dieléctrica compleja, y a partir de ella estimar los demás parámetros usando algoritmos patentados.

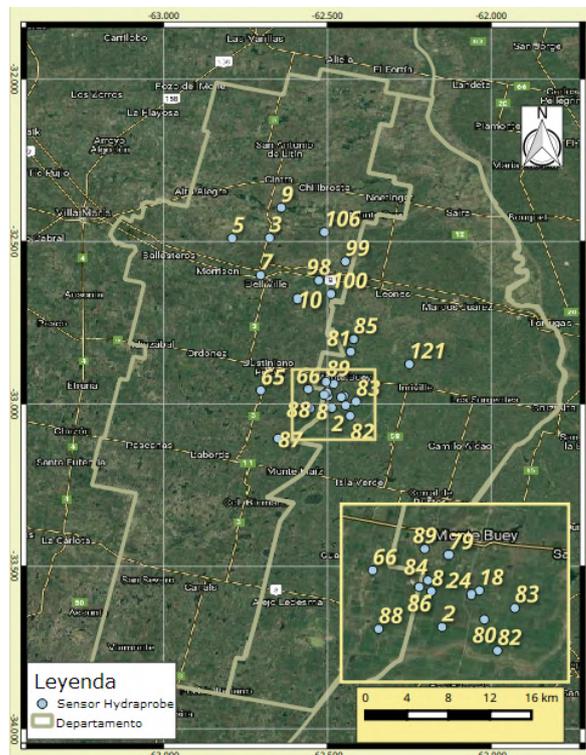


Figura 4.7: Localización de los sensores Hydraprobe en el área de estudio.

### 4.4.1. Humedad del suelo

Los sensores Hydraprobe proveen medidas de humedad de suelo precisas, en unidades de fracción de agua por volumen ( $m^3 * m^{-3}$ ) o *humedad volumétrica*. Dicha unidad de fracción de agua por volumen fue elegida para estos sensores debido a que la física asociada a la medición de la humedad del suelos determina una respuesta que se encuentra más relacionada con el contenido volumétrico del suelo. Segundo, sin conocimiento específico del suelos, uno no puede convertir la humedad volumétrica en otras unidades; por último la unidad elegida permite la comparación directa entre lecturas en diferentes suelos.

### 4.4.2. Conductividad eléctrica

Los sensores Hydraprobe miden la conductividad eléctrica in situ en unidades de Siemens/metro (S/m), el cual puede ser usado como indicativo de sólidos, sales y fertilizantes disueltos. La conductividad eléctrica del suelo es calculada de la parte imaginaria de la constante dieléctrica corregida por temperatura  $\epsilon''_{TC}$  por la siguiente expresión matemática:

$$CE = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon''_{TC} \quad (4.16)$$

Donde CE es la conductividad eléctrica, f la frecuencia (50 MHz para los sensores) y  $\epsilon_0$  la constante dieléctrica del vacío.

### 4.4.3. Análisis de los datos medidos

La red telemétrica de CONAE está diseñada principalmente para la medición de humedad de suelo en parcelas seleccionadas con el objetivo de realizar validaciones de campo dónde también se recogen datos de conductividad eléctrica del medio.

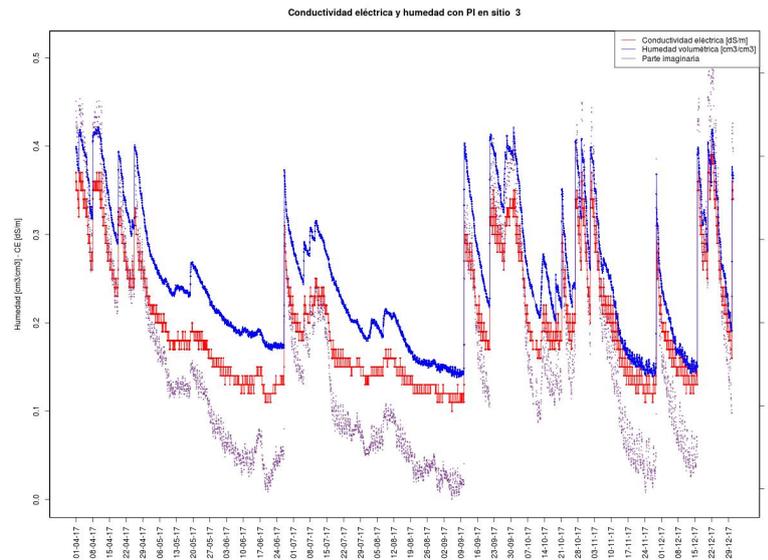
En la sección Anexos A se encuentran presentes los gráficos con las mediciones de humedad de suelo en  $cm^3/cm^3$  y conductividad del suelo en dS/m especificados para cada sitio en cuestión. Como aclaración, uno debe ser cuidadoso de no leer la conductividad aparente directamente como salinidad, debido a que la evaluación de salinidad del suelo se realiza a partir de la conductividad aparente en condiciones de suelos saturados por acuerdo internacional (Sección 2.3).

Una de las características encontradas en este conjunto de mediciones, tomadas en 2017, es que básicamente todos los sensores se encuentran instalados en suelos no salinos, con algunos casos particulares de un incremento temporal de la conductividad eléctrica, que puede ser asumido como un incremento temporal de la salinidad, decreciendo rápidamente tiempo después.

Por ejemplo, en la Figura 4.8 uno puede ver el comportamiento típico de la conductividad eléctrica en un suelo no salino, la cual se encuentra principalmente influenciada por la humedad presente en el suelo, marcada por la misma tendencia en tanto la humedad volumétrica (en azul) como en la conductividad aparente del suelo (en rojo). Éste comportamiento es observado en prácticamente todos los sitios sensados.

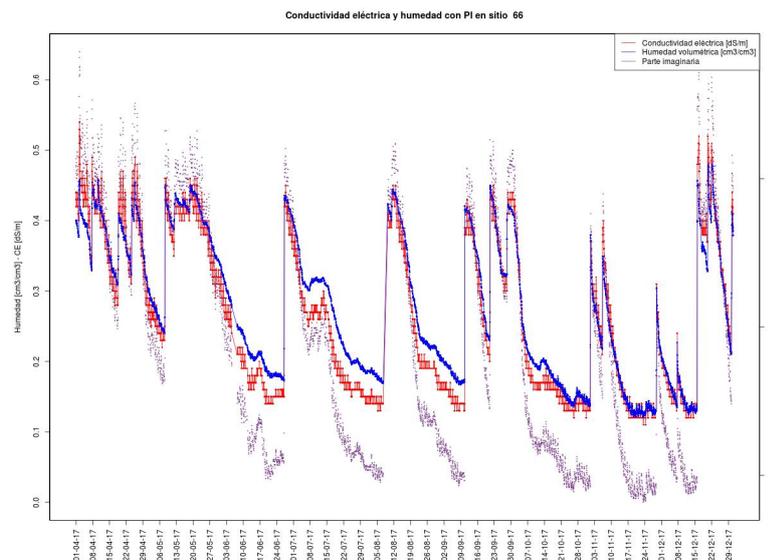
La suposición de que los suelos en cuestión son considerados no salinos sin las mediciones específicas de extractos saturados de las muestras viene de analizar la conductividad eléctrica a niveles de humedad en el rango de  $0.4-0.5 cm^3/cm^3$ , valores indicativos de condiciones de saturación. En justamente en ésta situación que uno puede directamente usar la conductividad como *proxy* para la clasificación de la salinidad, usando la clasificación de Richards [17], expresada en la Tabla 2.1, donde la casi totalidad de las mediciones no excede el umbral de 2 dS/m, que separa suelos no salinos de ligeramente salinos.

Sin embargo existen algunas excepciones con la ocurrencia de suelos no salinos. Por ejemplo, en la Figura 4.9 se puede observar el comportamiento esperado de un suelo no salino excepto en Enero, donde se encuentra un súbito incremento de la conductividad eléctrica. La magnitud de este cambio puede ser atribuido a un incremento de la concentración de sales en el suelo, dado que para niveles de humedad similares meses antes la conductividad eléctrica se comporta como es esperado de un suelo no salino.



**Figura 4.8:** Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 3.

En su pico máximo la conductividad eléctrica llega a aproximadamente 3.0 dS/m en niveles de humedad volumétrica próximos a saturación ( $\sim 0,5\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), asumiendo que en esta ventana temporal el sitio 66 puede ser clasificado como ligeramente salino.



**Figura 4.9:** Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 66.

Esta red telemétrica fue usada para el análisis en las fechas de 2017 y 2019, fecha de las imágenes SAR de banda X (COSMO-SkyMed) y banda L (SAOCOM), donde la evolución de cada uno de estos sensores en el transcurso de ese año se muestran en los Anexos A y B, respectivamente.

### 5.1. Resultados con imágenes ópticas: Sentinel-2

En esta Sección se exponen los resultados obtenidos utilizando imágenes ópticas con el objetivo de un estudio previo exploratorio del problema. Tal como es explicado en la Sección 4.1.2, para este apartado se calcularon los índices de salinidad descritos en la Tabla 4.1 utilizando imágenes Sentinel-2 del 09/06/2017.

Se eligió la zona sur a la Laguna Mar Chiquita porque representa un ambiente salino rodeados de zonas agrícolas, útil para una primera aproximación del estudio con sensores ópticos. Para ello se analizaron las distribuciones de los valores de estos índices de salinidad en las dos zonas de interés, áreas *salinas* y *no salinas* donde se establece el umbral empírico de separación como el cruce de los histogramas de las dos zonas. Los histogramas analizados se muestran en la Figuras 5.1 y 5.2, mientras que los umbrales calculados se expresan en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Umbrales obtenidos de los distintos índices utilizados.

Índice	Umbral calculado
NDSI	-0,152
BI	0,335
$SI_1$	0,126
$SI_2$	0,149
$SI_3$	0,364
$SI_4$	0,214
$SI_7$	0,238
$SI_9$	0,312
CRSI	0,749
Aster-1	0,0179
Aster-2	0,251

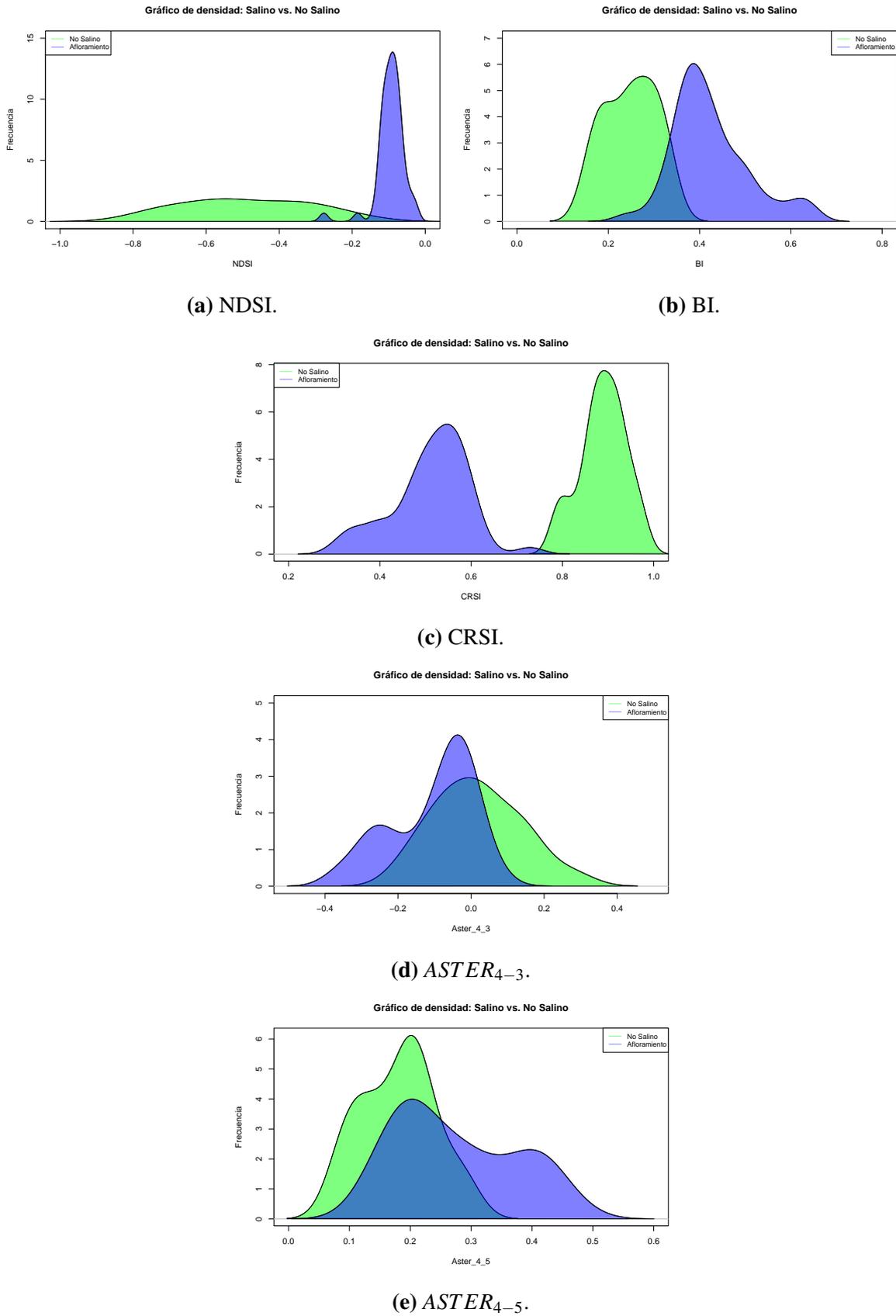
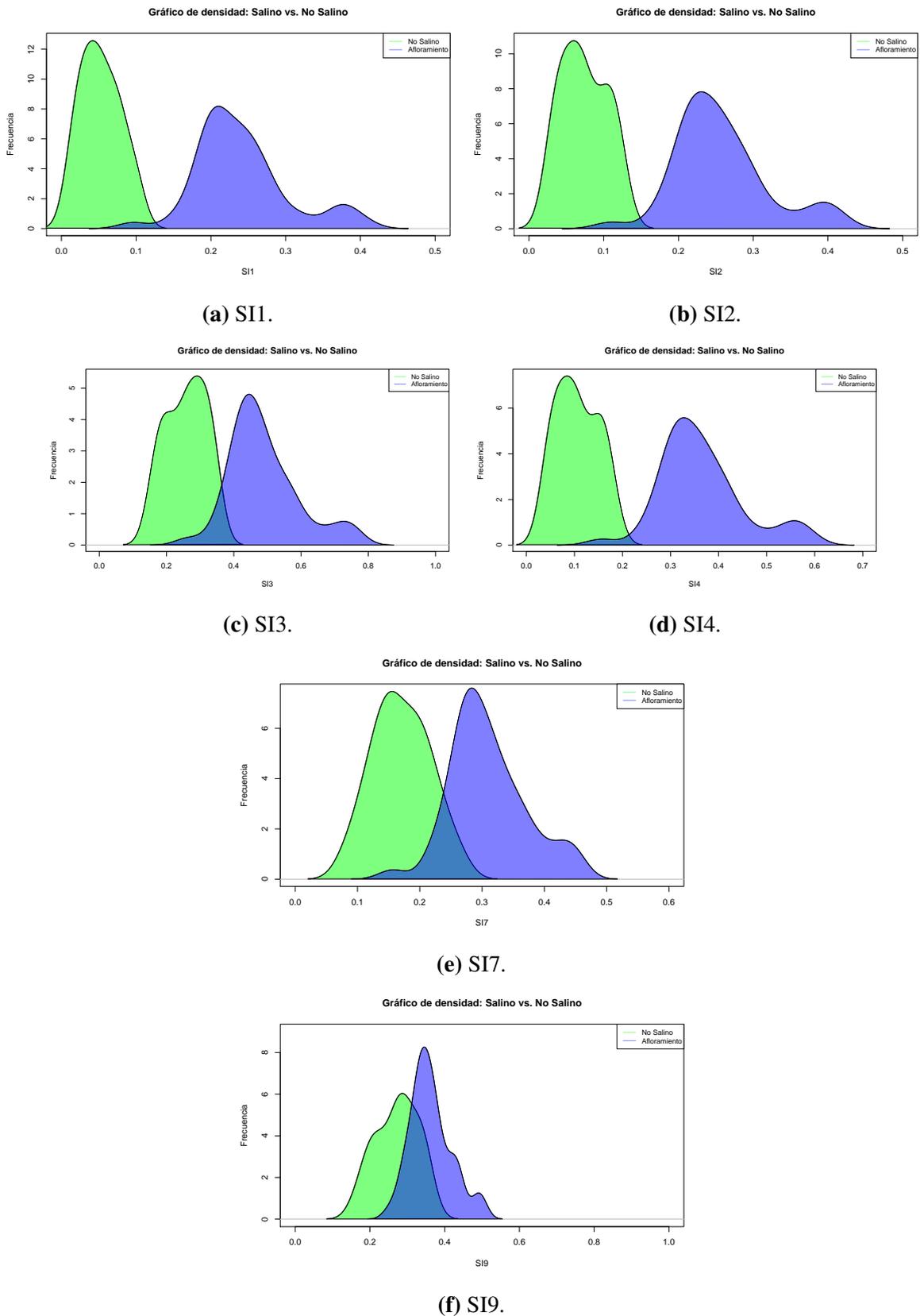


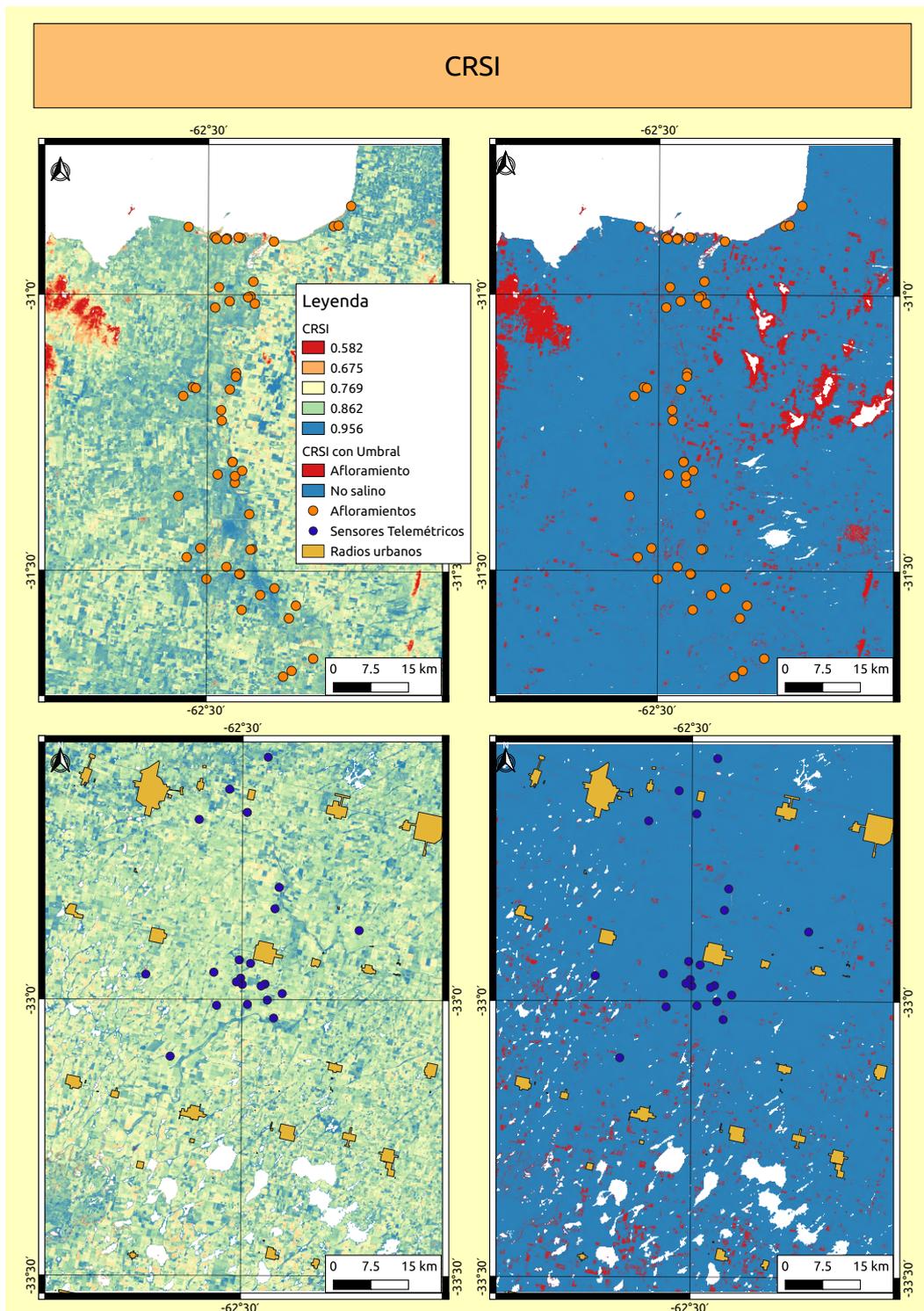
Figura 5.1: Histogramas de los distintos índices ópticos analizados según afloramientos y suelos no salinos.



**Figura 5.2:** Histogramas de los distintos índices ópticos analizados según afloramientos y suelos no salinos (Continuación).

Analizando la distribución de los valores de los índices para las dos regiones consideradas - suelos no salinos y afloramientos- se observa que el rendimiento para cada índice es distinto. Por un lado se observa que para los índices *NDSI*, *CRSI*, *SI1*, *SI2*, *SI4* la separabilidad entre

los histogramas es apreciable a simple vista, pudiendo establecer valores de umbral para la clasificación de cada cobertura analizada en el área de estudio considerada.



**Figura 5.3:** CRSI (izq.) y clasificación con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio.

Para ejemplificar se muestran los resultados obtenidos con el índice CRSI, uno de los índices que muestra más separabilidad a simple vista. Para este caso se muestra a la izquierda la aplicación del índice en la imagen, primero en la zona de Mar Chiquita con los puntos salinos marcados, y luego en el zona del área de estudio donde se encuentran situados los sensores telemétricos, respectivamente. A la derecha se muestra la clasificación de la imagen tomando en cuenta el umbral calculado (Tabla 5.1), haciendo una clasificación binaria entre

afloramiento salino y suelo no salino. Para ello se enmascaran las zonas urbanas mostrando los radios urbanos descargados de los servicio WFS de la provincia de Córdoba, y los cuerpos de agua presentes utilizando el índice MNDWI para determinar estas áreas, principalmente el mayor de cuerpo de agua presente: la laguna Mar Chiquita.

## 5.2. Resultados con imágenes SAR COSMO-SkyMed: Banda X

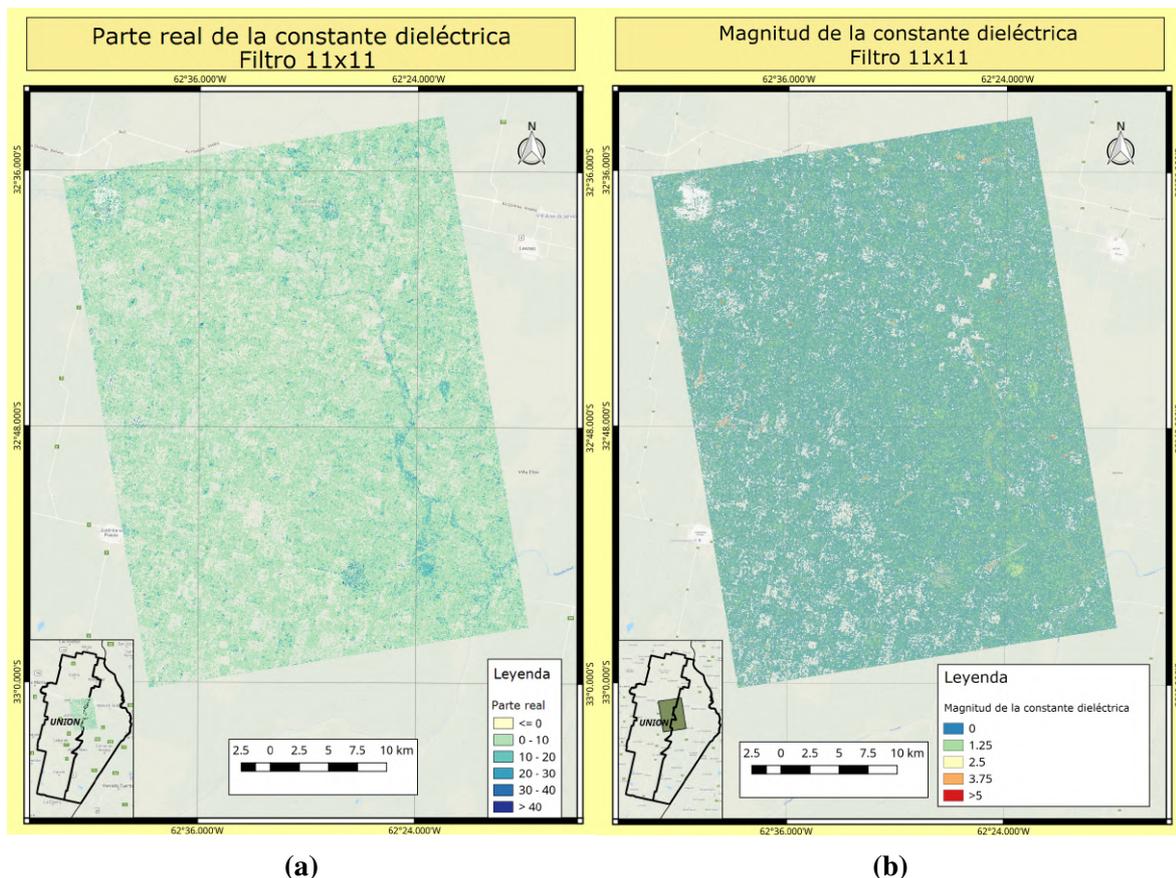


**Figura 5.4:** Resultados de la inversión sin filtro - COSMO-SkyMed: a) Parte real b) Magnitud c) Parte imaginaria de la constante dieléctrica

La primera iteración del trabajo fue realizado sin aplicar filtros de reducción de ruido speckle a las imágenes SAR, donde la magnitud como la parte real e imaginaria fueron extraídas usando los modelos y metodologías descritas anteriormente. Como resultado de una imagen SAR demasiado ruidosa, inherente del modo PING-PONG, los resultados no fueron considerados satisfactorios.

## Resultados con filtrado

El uso de una frecuencia alta (banda X, para el caso de las imágenes COSMO-SkyMed) no es lo óptimo para el estudio de la salinidad. A esta limitación se suma la adquisición PING-PONG, adquisición necesaria para poder realizar la inversión de los modelos, que como dicho anteriormente es inherentemente ruidosa. Para mitigar el problema del uso de esta imagen un filtro de speckle Sigma-Lee fue aplicado a la imagen considerando tres tipos de ventanas diferentes (5x5, 9x9 y 11x11) inicialmente. Los mejores resultados fueron obtenidos con una ventana de 11x11, a pesar de la pérdida de resolución radiométrica, como se muestra en la Figura 5.5 para la parte real y la magnitud de la constante dieléctrica.



**Figura 5.5:** a) Parte real y b) magnitud de la constante dieléctrica - Imagen COSMO Sky-Med Filtro 11x11 .

Para ello se utilizó la imagen COSMO-SkyMed de la fecha 09/06/2017, que coincide con la fecha de adquisición de la imagen óptica en el análisis previo, a la que se aplicaron la inversión de los modelos de Dubois y del modelo SPM para la obtención de la parte real y la magnitud de la constante dieléctrica respectivamente. Una mejora cualitativa significativa se aprecia a simple vista con respecto a las imágenes filtradas en lo correspondientes a píxeles válidos con respecto a las imágenes no filtradas, con una mayor proporción de píxeles en lo

que respecta a la magnitud. En lo que corresponde a la parte real el trazado de los cursos de agua junto con campos irrigados es fácilmente detectable, debido a la dirección directa entre esta variable y la humedad de suelo.

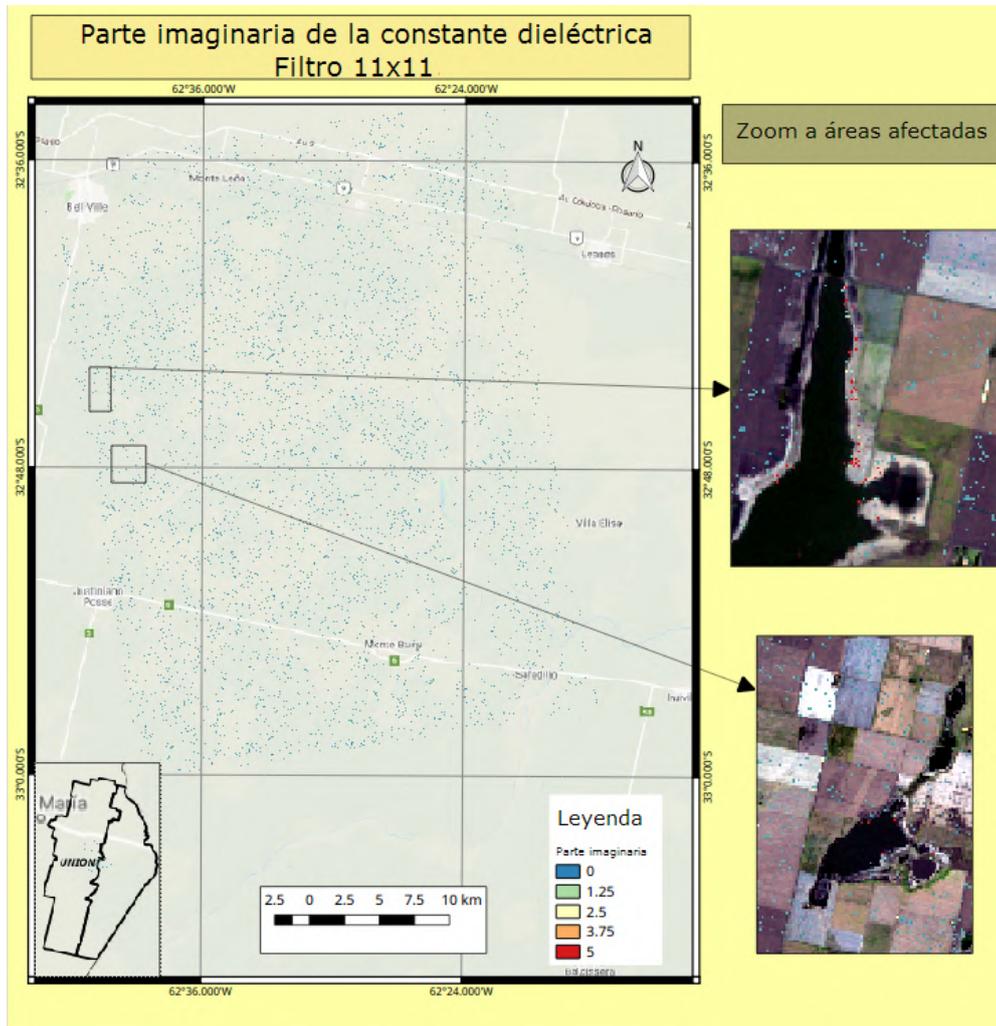


Figura 5.6: Parte imaginaria de la constante dieléctrica - Imagen COSMO Sky-Med Filtro 11x11.

Analizando la parte imaginaria existe un acuerdo entre lo que se esperaba de la zona de estudio, área predominantemente no salina, y lo obtenido. Aunque la validación del resultado no es realizada debido al insuficiente número de píxeles válidos y a la falta de correspondencia de estos píxeles con los puntos de la red telemétrica, se puede demostrar que la mayoría de los píxeles válidos se corresponden a la parte baja de la escala, siendo un indicador de la baja concentración de sales en el suelo.

La parte superior de la escala de la parte imaginaria de la constante dieléctrica es encontrada principalmente alrededor de cuerpos de agua, particularmente de aquellos de carácter temporario, donde la dinámica presente de evaporación y/o drenaje deja sedimentos de sales detrás, comportamiento típico explicado en la Sección 3.2.

### 5.3. Resultados con imágenes SAR SAOCOM: Banda L

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al ejecutar los modelos para la obtención de los tres parámetros (parte real, magnitud y parte imaginaria de la constante dieléctrica) usando como novedad una imagen SAOCOM de la fecha 13/10/2019. Como etapa de post-procesamiento se aplicó a los resultados un filtro de mediana con una ventana de 5x5 para reducir la influencia del ruido presente en los datos obtenidos.

Con respecto al enmascaramiento, en esta etapa se decidió solo enmascarar los *radios urbanos* descargados desde el servicio WFS del IDECOR. Para el caso de la *vegetación*, como la frecuencia es mucho menor se tiene una mayor penetración al suelo, disminuyendo los efectos de la vegetación sobre la señal de retrodispersión. Además como se utiliza la corrección empírica para zonas con presencia de vegetación, se decidió no enmascarar estas zonas para evaluar su rendimiento. En lo correspondiente a *cuerpos de agua* se aplican las máscaras de cuerpos de agua descargadas del IDECOR para el análisis.

En los mapas expuestos se muestran los resultados obtenidos de la imagen entera, junto con una ampliación en dos áreas características: áreas fuertemente salinas y áreas moderadamente salinas. Estas áreas fueron descargas del geoportal IDE de la provincia de Córdoba en la sección limitantes del suelo <sup>1</sup>.

Con respecto a los datos de campo para la validación de resultados se tiene una limitación de faltantes de datos para un análisis fehaciente. La pisada de la imagen SAOCOM de la fecha elegida solo contiene 6 sensores, de los cuales sólo 4 tienen lecturas válidas para la fecha en cuestión. Por esta razón la comparación de resultados se realiza en la forma de *scatterplot*, o gráfico de dispersión, con línea 1:1, las medias de los datos medidos y estimados, y la recta de la regresión lineal que mejor ajusta los datos.

Para el caso de los datos estimados se tomó un buffer de 50 metros tomando como centro los sensores del sitio y realizando una media para compararlo con los datos medidos. Como referencia se exponen los datos en la Tabla 5.2:

**Tabla 5.2:** Datos de sensores telemétricos en el área de estudio.

Sensor	Latitud	Longitud	Parte real de la CD	Parte imag. de la CD	Conductividad [dS/m]	Humedad volumétrica [ $cm^3/cm^3$ ]
65	-32.955	-62.705	NA	NA	NA	NA
66	-32.951	-62.560	NA	NA	NA	NA
86	-32.968	-62.512	11.938	9.174	0.26	0.198
87	-33.103	-62.653	20.384	14.335	0.4	0.313
88	-33.011	-62.554	12.983	8.912	0.25	0.214
89	-32.93	-62.506	12.412	6.622	0.18	0.205

#### 5.3.1. Parte real de la constante dieléctrica

Para la obtención de la parte real se aplica la inversión del modelo de Dubois, tal como es explicado en la Sección 2.6.1, y se obtiene el siguiente mapa:

<sup>1</sup>Disponible en <https://www.mapascordoba.gob.ar/>

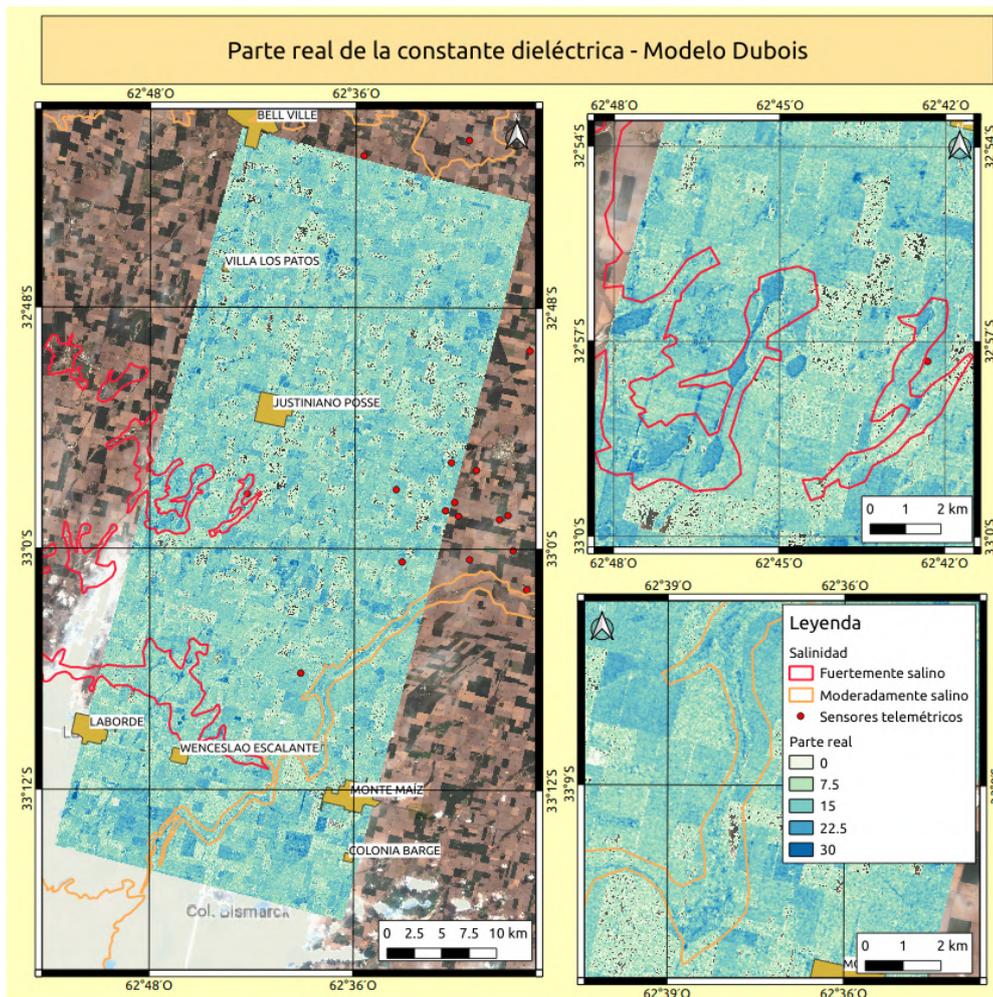


Figura 5.7: Parte real de la constante dieléctrica usando imagen SAOCOM - Modelo Dubois.

Un análisis cualitativo de la Figura 5.7 muestra que se observa una correspondencia con lo esperado, los valores se encuadran dentro del rango esperado, y se delimitan los campos irrigados. Cuantitativamente se comparan los datos de la parte real con los datos del sensor en un *scatterplot*, donde se observa una buena correlación, sin embargo la escasez de datos no permite una caracterización estadística de los resultados:

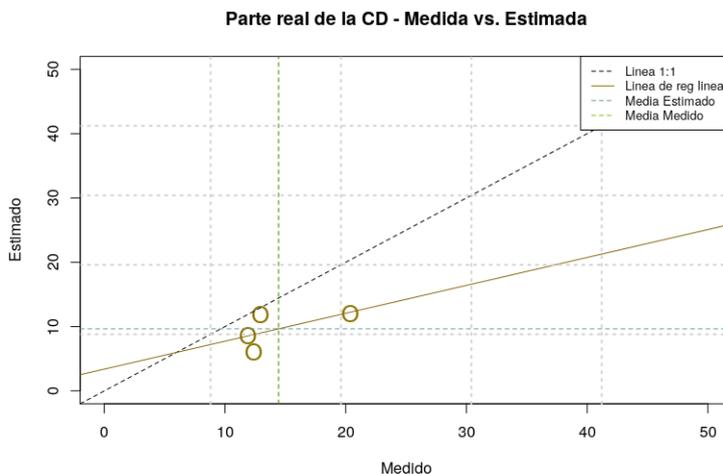


Figura 5.8: Valor medido vs. valor estimado de la parte real usando imagen SAOCOM.

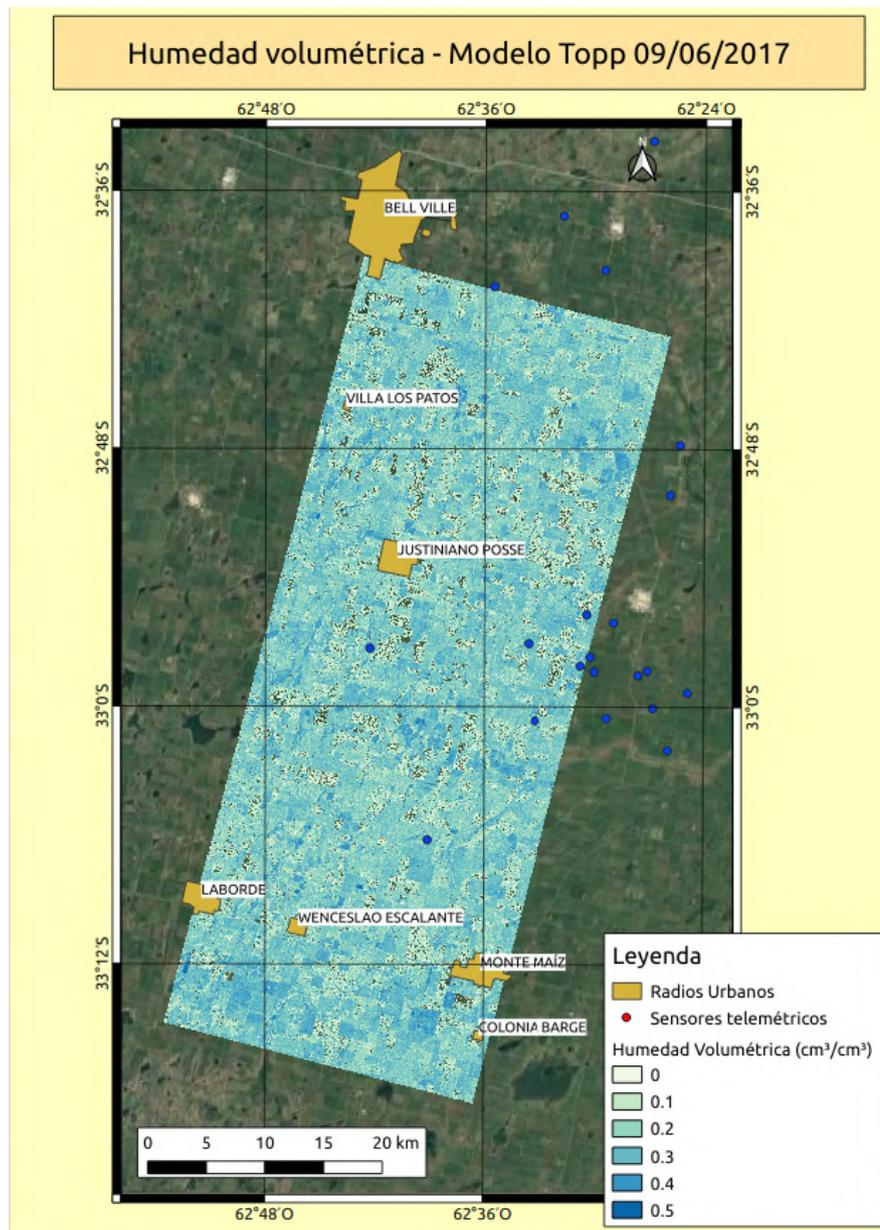
## Humedad volumétrica

Con la estimación de la parte real se puede estimar la humedad del suelo usando la ecuación empírica de Topp [100], porque el contenido de humedad es uno de los principales factores que afectan a la parte real de la constante dieléctrica (ver Sección 2.4).

La ecuación empírica de Topp expresa la humedad volumétrica del suelo medida en  $\theta [cm^3/cm^3]$  a partir de la permitividad o parte real de la constante dieléctrica como:

$$\theta = -5,3 * 10^{-2} + 2,92 * 10^{-2} \epsilon - 5,5 * 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 * 10^{-6} \epsilon^3 \quad (5.1)$$

Aplicando esta fórmula al mapa de la parte real de la constante dieléctrica generado por la inversión del modelo de Dubois (Figura 5.7) se obtiene el siguiente mapa:



**Figura 5.9:** Mapa de la humedad volumétrica [ $cm^3/cm^3$ ] usando imagen SAOCOM - Modelo Topp.

El modelo de Topp parece aproximarse bien a las mediciones realizadas por los sensores, mostrando una tendencia positiva, tal como se observa en la Figura 5.10.

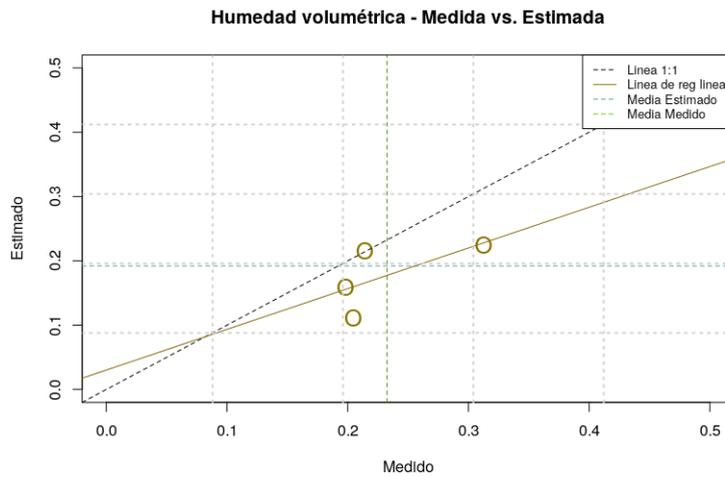


Figura 5.10: Valor medido vs. valor estimado de la humedad volumétrica usando imagen SAOCOM.

### 5.3.2. Magnitud de la constante dieléctrica

Para obtener la magnitud de la constante dieléctrica se realizaron las inversiones de ambos modelos SPM y POM, junto con la corrección empírica propuesta por Bell [64]. Los resultados de dichas inversiones se muestran en la siguientes figuras.

#### Inversión con modelo SPM

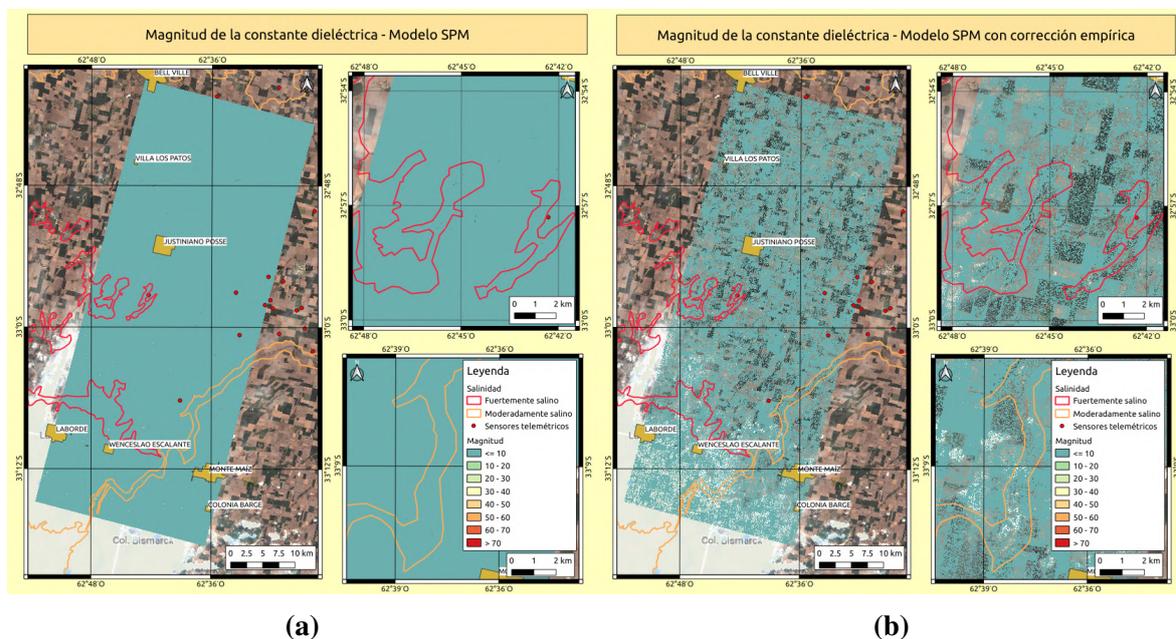
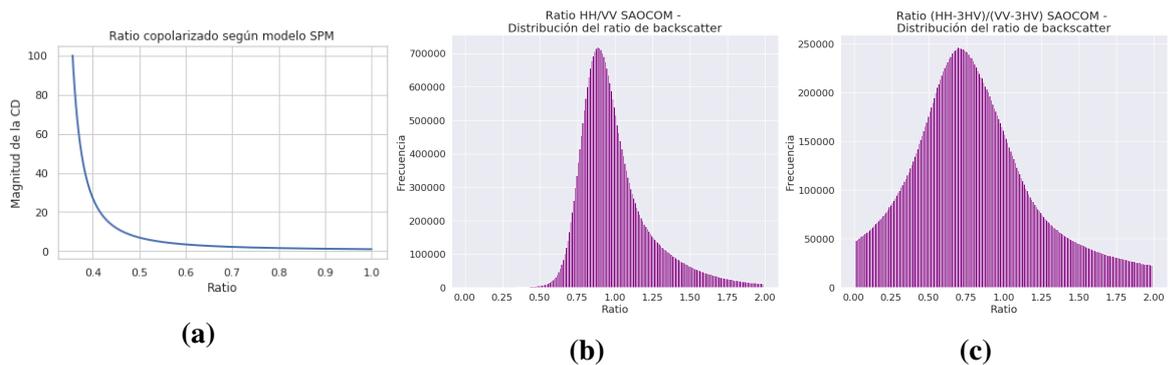


Figura 5.11: Magnitud de la constante dieléctrica: a) Modelo SPM. b) Modelo SPM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM.

La inversión del modelo SPM (Figura 5.11a) no alcanza a caracterizar la variabilidad de la magnitud de la constante dieléctrica en el área, siendo la mayoría de sus datos muy bajos para ser considerados representativos de la realidad.

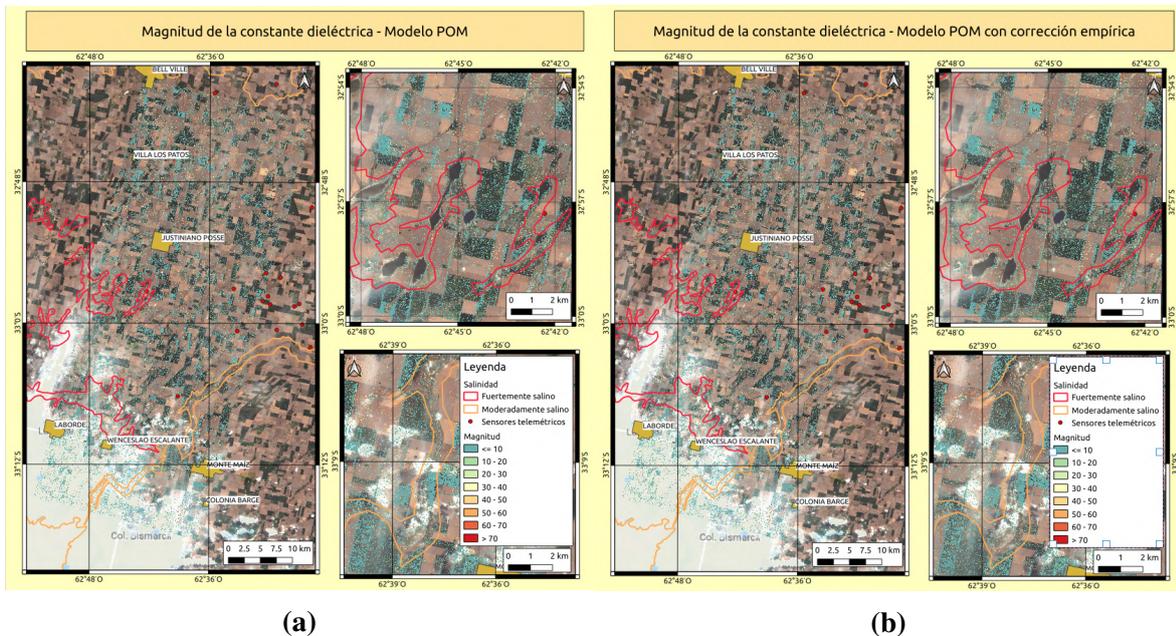
La situación mejora aplicando la corrección empírica, pero se sigue teniendo el problema de valores demasiado bajos para ser considerado un resultado satisfactorio. Comparando los histogramas del ratio y del ratio corregido se observa que la mayoría de los valores son mayores al valor de 0.6 que corresponden a un valor de magnitud cercano a cero imposibilitando la discriminación fehaciente de la magnitud de la constante dieléctrica.

Principalmente esto es debido a la aplicación del modelo para un ángulo de incidencia menor a 35 grados, fuera del dominio de validez. No obstante la razón de incluir la aplicación de este modelo es debido a la experiencia de Taylor [9] en aplicar modelos cuyos rangos de validez no se cumplían estrictamente pero arrojaban resultados coherentes con la realidad.



**Figura 5.12:** Análisis del ratio copolarizada SAOCOM: a) Ratio copolarizado según modelo SPM b) Histograma del ratio copolarizado SAOCOM c) Histograma del ratio copolarizado corregido empíricamente SAOCOM.

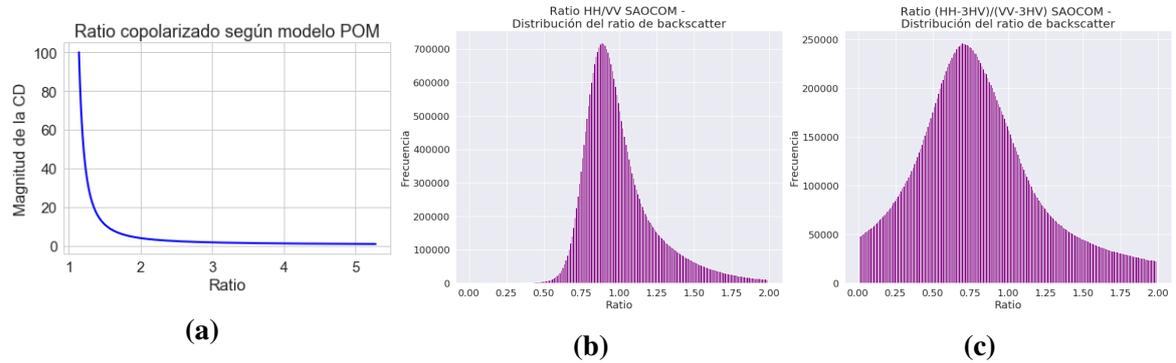
### Inversión con modelo POM



**Figura 5.13:** Magnitud de la constante dieléctrica: a) Modelo POM. b) Modelo POM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM.

Analizando la inversión del modelo POM se tienen resultados mejores debido en parte a que la gran parte del rango de ratio cae dentro de los valores de la tabla de búsqueda, y que el

ángulo de incidencia es menor a los 35 grados, por ende se tiene un modelo operando dentro de su rango de validez. Asimismo la corrección empírica devuelve valores muchos menores de magnitud sobre áreas con vegetación, hecho que se condice con lo esperado.

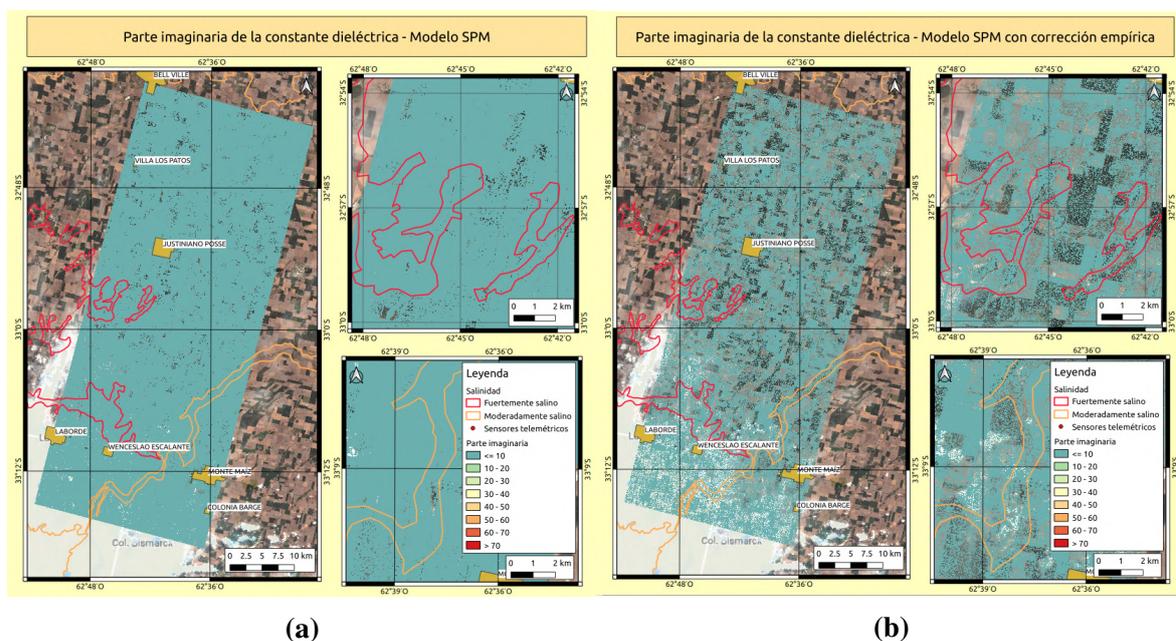


**Figura 5.14:** Análisis del ratio copolarizado SAOCOM corregido empíricamente: a) Ratio copolarizado según modelo POM b) Histograma del ratio copolarizado SAOCOM c) Histograma del ratio copolarizado corregido empíricamente SAOCOM.

### 5.3.3. Parte imaginaria de la constante dieléctrica

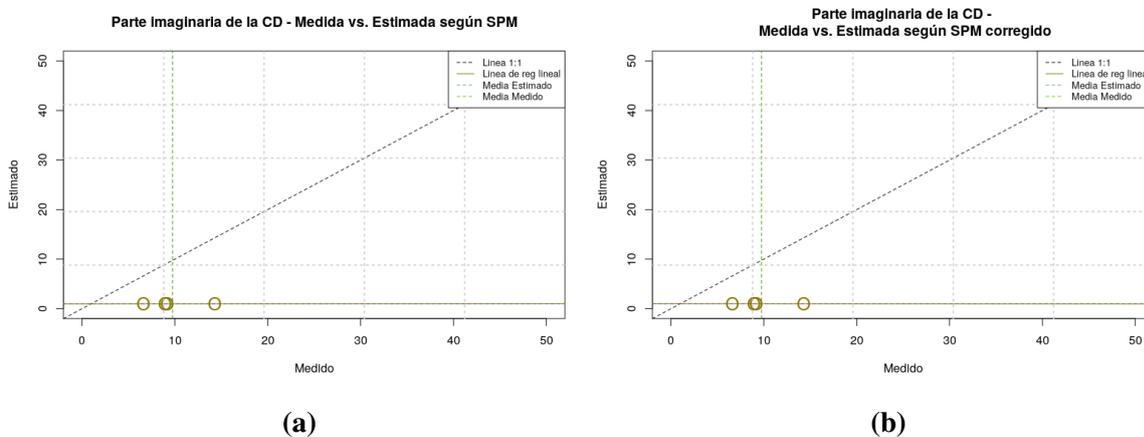
Para obtener la parte imaginaria de la constante dieléctrica el modelo combinado es aplicado teniendo como entrada la parte real de la constante dieléctrica y la magnitud de la misma. A continuación se muestran los cuatros resultados de haber calculado la parte imaginaria con los modelos SPM y POM junto con la respectiva corrección empírica para superficies con cobertura vegetativa.

Asimismo en la aplicación del modelo combinado, para aquellos valores donde la parte real es mayor a la parte imaginaria, se consideró que la parte imaginaria no tiene influencia significativa en la magnitud y se le asigna el valor simbólico de 1.0.



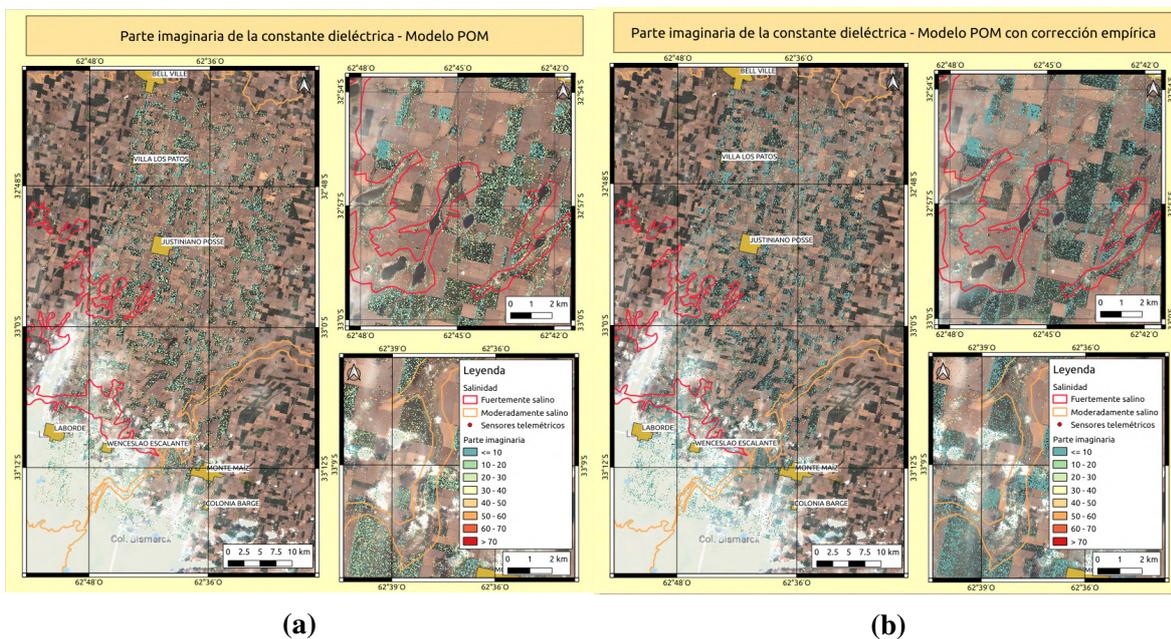
**Figura 5.15:** Parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo SPM. b) Modelo SPM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM.

Como es de esperarse, la mayoría de los valores de parte imaginaria con el modelo SPM son por defecto de valor 1.0 debido a que los valores de magnitud son en general menores a los valores de permitividad para el mismo píxel. Esta situación se refleja en el *scatterplot* asociado, cuyos valores de 1.0 muestran la no correspondencia del modelo con la realidad, tanto para el modelo estándar como para aquel corregido empíricamente.



**Figura 5.16:** Valor medido vs. estimado de la parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo SPM. b) Modelo SPM corregido usando imagen SAOCOM.

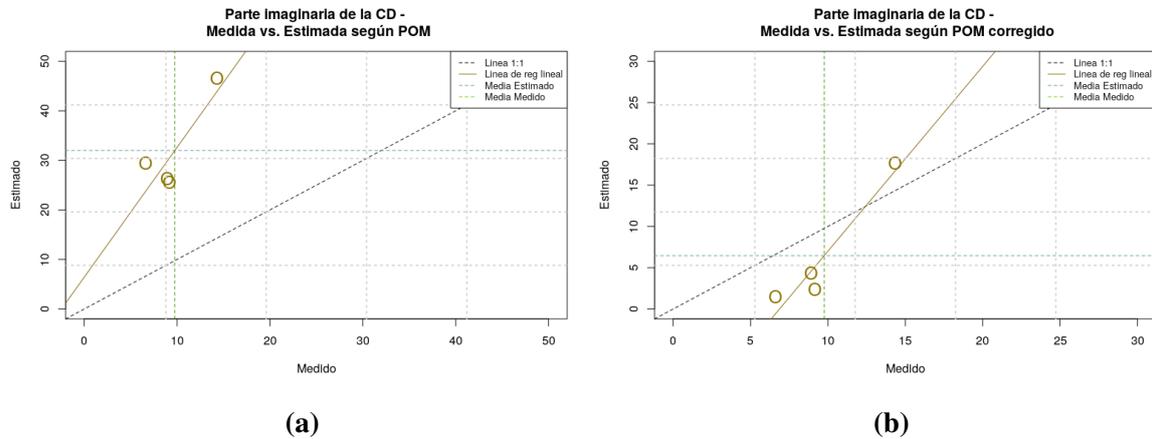
### Modelo POM



**Figura 5.17:** Parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo POM. b) Modelo POM corregido por vegetación usando imagen SAOCOM.

Con respecto al modelo POM si se observa una discriminación de valores y una mayor sensibilidad a los datos obtenidos por el sensor SAOCOM. En general la mayoría de los píxeles se encuentran en zonas no salinas y los valores devueltos por el modelo coinciden con esta condición, con valores en el rango inferior de la parte imaginaria modelada. También se observa que en zonas cubiertas con vegetación en el modelo POM sin corrección se tienen

valores más altos que los esperados de áreas no salinas generalmente, situación que mejora con la corrección empírica al modelo.



**Figura 5.18:** Valor medido vs. estimado de la parte imaginaria de la constante dieléctrica: a) Modelo POM. b) Modelo POM corregido usando imagen SAOCOM

Se observa la tendencia de que el modelo POM tiende a sobrevalorar los valores de la parte imaginaria de la constante dieléctrica, mientras que el modelo POM corregido tiende a mejorar esta situación. Principalmente es debido a una mejor estimación del modelo con respecto de la magnitud de la parte imaginaria.

Para resumir los resultados obtenidos se compilan los datos de los gráficos de dispersión en la siguiente tabla:

**Tabla 5.3:** Valores medidos versus estimados según los modelos analizados usando imagen SAOCOM.

Sensor ID	PR medida	Mv	PI medida
86	11.938	0.198	9.174
87	20.384	0.313	14.335
88	12.983	0.214	8.912
89	12.412	0.205	6.622

PR Dubois	Mv Topp	PI SPM	PI SPM corregido	PI POM	PI POM corregido
8.587	0.159	1	1	25.509	2.351
12.035	0.224	1	1	46.646	17.711
11.883	0.215	1	1.06	26.372	4.311
6.111	0.111	0.991	0.995	29.486	1.497

**PR:**Parte real, **Mv:** Humedad volumétrica, **PI:** Parte imaginaria

## CAPÍTULO 6

---

### Conclusiones

---

Este trabajo consiste en una primera aproximación al estudio de la salinidad utilizando imágenes SAR polarimétricas. Para ello se realizó un estudio exploratorio con imágenes ópticas usando los índices más habituales según la literatura, un análisis con imágenes SAR Cosmo Sky-Med en banda X, y finalmente un análisis con las recientes imágenes SAOCOM, satélite argentino lanzado en 2018, en banda L.

El estado del arte indica que el estudio de la salinidad usando imágenes radar es mejor discriminado en suelos húmedos y a bajas frecuencias, especialmente en banda L. Esto es debido a la influencia de la humedad del suelo en la conductividad del medio, que a bajas frecuencias es la pérdida dominante en la parte imaginaria de la constante dieléctrica.

Aunque el estudio del fenómeno usando imágenes ópticas tiene un gran potencial, dicho análisis sólo puede detectar salinidad superficial y en condiciones atmosféricas sin nubosidad dificultando el seguimiento de la problemática. Con el uso de imágenes SAR la nubosidad representa un problema menor, como así dependiendo de la frecuencia se tiene una mayor penetración al suelo a menores frecuencias, ayudando a identificar mejor el problema.

El área de estudio elegida es un área de productividad agrícola por excelencia, siendo principalmente áreas no salinas, con problemas de salinidad localizados alrededor de las vías de escurrimiento superficial representativo de la zona, y alrededor de lagunas donde la deposición y evaporación de aguas puede llevar a una acumulación de sales en el suelo.

Asimismo es importante destacar que en el desarrollo entero de este trabajo se trabajó exclusivamente con herramientas de procesamiento de imágenes y datos libres y gratuitas, entre ellas, *Python*, *SNAP*, y *QGIS*.

La aplicación de modelos electromagnéticos para definir la relación entre los coeficientes de retrodispersión y las distintas componentes de la constante dieléctrica fueron realizadas en esta primera instancia con imágenes individuales en dos frecuencias distintas, banda X y banda L. Para ello se aplicó el modelo de Dubois para la obtención de la parte real, el modelo SPM/POM para la obtención de la magnitud de la constante dieléctrica, y finalmente el modelo combinado para obtener la parte imaginaria, parámetro íntimamente relacionado con la conductividad del suelo y con la salinidad presente.

Los resultados obtenidos en banda X usando imágenes Cosmo Sky-Med arrojaron resultados limitados para lo esperado con esta zona, pero sirvió como prueba piloto para los algoritmos a emplear para las imágenes SAOCOM, cuya frecuencia es más indicada para el estudio.

Para el análisis de las imágenes SAOCOM se presentan resultados para la parte real de la constante dieléctrica, magnitud usando ambos modelos SPM y POM junto con una corrección empírica por vegetación, propuesto por [64]. Con ambos parámetros se calcula la parte imaginaria y se compararon la parte real y la parte imaginaria medida por la red telemétrica de la misión SAOCOM en el área de estudio, y en particular en la pisada de la imagen.

La validación de los resultados se realizó con un gráfico de dispersión debido a la poca cantidad de datos disponibles en la fecha y zona de estudio. También como la parte real de la constante dieléctrica se encuentra íntimamente relacionada con la humedad de suelo, se aplicó la fórmula de Topp para estimar la humedad de suelo y compararlo con las mediciones de campo.

Los resultados obtenidos con la parte real, la humedad volumétrica, y la parte imaginaria con el modelo POM y POM con corrección empírica muestran resultados promisorios, mientras que la aplicación del modelo SPM junto con su corrección mostraron resultados insatisfactorios. Los resultados obtenidos con el modelo POM (Modelo de Física Óptica) corregido empíricamente con datos SAOCOM muestran los mejores resultados, con valores de la parte imaginaria de la constante dieléctrica en los sitios de validación no salinos en el rango de 4,497 a 17,711. Debido a los pocos datos presentes no se puede afirmar con nivel de significancia los resultados obtenidos, pero la tendencia muestra potencialidad a esta técnica. Una campaña posterior con énfasis en suelos salinos permitirá validar esta técnica en lugares afectados por sales.

Cabe destacar que ningún modelo describe la totalidad del rango de los ratios extraídos de la imagen, particularmente hablando de imágenes SAOCOM. Para mejorar esta técnica una inversión bayesiana en vez de una inversión teórica puede ser implementado, tal como es descrito en [43] en humedad de suelo.

También la aplicabilidad de los modelos depende de los ángulos de incidencia, donde Taylor sugiere que a ángulos mayores a 40 grados se tiene una mejor sensibilidad a suelos salinos. Adicionalmente mejores modelos tales como IEM (Integral Equation Model) para la estimación de la permitividad puede ser aplicado para una mejora en la precisión.

Nuevas líneas de trabajo también se han empezado a explorar, tal como el análisis de los coeficientes de retrodispersión [101] como el uso de distintos clasificadores utilizando inteligencia artificial [71], o el uso de descriptores polarimétricos [68, 70] para la caracterización de suelos afectados por sales, hecho potencialmente explotable dado el carácter full-polarimétrico de las imágenes SAOCOM.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] A. Allbed and L. Kumar, “Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review,” *Advances in Remote Sensing*, 2013.
- [2] J. Farifteh, A. Farshad, and R. George, “Assessing Salt-affected Soils using Remote Sensing, Solute Modelling, and Geophysics,” *Geoderma*, vol. 130, pp. 191–206, feb 2006.
- [3] R. Chhabra, *Soil Salinity and Water Quality*. CRC Press, 1996.
- [4] G. Metternicht and J. Zinck, “Remote Sensing of Soil Salinity: Potentials and Constraints,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, pp. 1–20, apr 2003.
- [5] E. Scudiero, D. L. Corwin, R. G. Anderson, and T. H. Skaggs, “Moving Forward on Remote Sensing of Soil Salinity at Regional Scale,” *Frontiers in Environmental Science*, vol. 4, no. October, pp. 1–5, 2016.
- [6] A. Zinck, “Monitoring Soil Salinity from Remote Sensing Data,” *Deposits and Geoenvironmental Models For Resources Exploitation and Environmental Security II*, p. 28, 2002.
- [7] R. M. Sánchez, L. Dunel Guerra, and M. Scherger, *Evaluación de las Áreas bajo Riego Afectadas por Salinidad y/o Sodicidad en Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 2015.
- [8] CONAE, “Comisión Nacional de Actividades Espaciales-Misiones Satelitales.” <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/saocom/objetivos>. (Accessed on 05/11/2018).
- [9] G. R. Taylor, A. H. Mah, F. A. Kruse, K. S. Kierein-Young, R. D. Hewson, and B. A. Bennett, “Characterization of Saline Soils using Airborne Radar Imagery,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 57, pp. 127–142, sep 1996.
- [10] K. Sreenivas, L. Venkataratnam, and P. N. Rao, “Dielectric Properties of Salt-Affected Soils,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, no. 4, pp. 641–649, 1995.

- [11] Y. Lasne, P. Paillou, A. Freeman, T. Farr, K. C. McDonald, G. Ruffie, J.-M. Malezieux, B. Chapman, and F. Demontoux, “Effect of Salinity on the Dielectric Properties of Geological Materials: Implication for Soil Moisture Detection by Means of Radar Remote Sensing,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008.
- [12] Y. Lasne, P. Paillou, A. Freeman, T. Farr, K. McDonald, G. Ruffié, J. M. Malézieux, and B. Chapman, “Study of Hypersaline Deposits and Analysis of their Signature in Airborne and Spaceborne SAR data: Example of Death Valley, California,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 8, pp. 2581–2598, 2009.
- [13] R. van Dam, R. L. van Dam, B. Borchers, and J. M. H. Hendrickx, “Methods for Prediction of Soil Dielectric Properties: A Review,” *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets X, March 28, 2005 - April 1, 2005*, vol. 5794, no. 1, pp. 188–197, 2005.
- [14] FAO, “Nociones Ambientales Básicas para Profesores Rurales y Extensionistas.” <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm>. (Accessed on 28/05/2019).
- [15] R. Vargas, E. I. Pankova, S. Balyuk, P. Krasilnikov, and G. Khasankhanova, *Handbook for Saline Soil Management*. FAO/LMSU, 2018.
- [16] L. Bernstein, “Effects of Salinity and Sodidity on Plant Growth,” *Annual review of phytopathology*, vol. 13, no. 1, pp. 295–312, 1975.
- [17] L. A. Richards, *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, vol. 78. LWW, 1954.
- [18] E. Bresler, B. L. McNeal, and D. L. Carter, *Saline and Sodic Soils: Principles-Dynamics-Modeling*, vol. 10. Springer Science & Business Media, 2012.
- [19] I. Daliakopoulos, I. Tsanis, A. Koutroulis, N. Kourgialas, A. Varouchakis, G. Karatzas, and C. Ritsema, “The Threat of Soil Salinity: A European Scale Review,” *Science of The Total Environment*, vol. 573, pp. 727–739, dec 2016.
- [20] B. R. Hanson, S. R. Grattan, and R. Fulton, “Agricultural Salinity and Drainage,” *Water management Series*, pp. 1–164, 1993.
- [21] S. A. Shahid, M. A. Abdelfattah, S. A. S. Omar, H. Harahsheh, Y. Othman, and H. Mahmoudi, “Mapping and Monitoring of Soil Salinization Remote Sensing, GIS, Modeling, Electromagnetic Induction and Conventional Methods – Case Studies,” *Proceedings of the International Conference on Soils and Groundwater Salinization in Arid Countries*, vol. 97, pp. 59–97, 2010.
- [22] F. Visconti and J. M. de Paz, “Electrical Conductivity Measurements in Agriculture: the Assessment of Soil Salinity,” *New Trends and Developments in Metrology*, pp. 100–119, 2016.
- [23] J. Rhoades and F. Chanduvi, *Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements*, vol. 57. Food & Agriculture Org., 1999.
- [24] B. Murray and M. McBride, “Environmental chemistry of soils,” *Oxford Univ Press, In: Saini RS, Chahal DS, and Sharma BD (1995)(eds) Distribution of different forms of iron in arid zone soils of Punjab. Arid Soil Res Rehab*, vol. 9, pp. 177–86, 1994.

- [25] J. Rhoades, P. Raats, and R. Prather, “Effects of Liquid-Phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 40, no. 5, pp. 651–655, 1976.
- [26] K. R. Sheets and J. M. Hendrickx, “Noninvasive Soil Water Content Measurement using Electromagnetic Induction,” *Water resources research*, vol. 31, no. 10, pp. 2401–2409, 1995.
- [27] J. Rhoades and D. Corwin, “Soil Electrical Conductivity: Effects of Soil Properties and Application to Soil Salinity Appraisal,” *Communications in soil science and plant analysis*, vol. 21, no. 11-12, pp. 837–860, 1990.
- [28] K. Sudduth, S. Drummond, and N. Kitchen, “Accuracy Issues in Electromagnetic Induction Sensing of Soil Electrical Conductivity for Precision Agriculture,” *Computers and electronics in agriculture*, vol. 31, no. 3, pp. 239–264, 2001.
- [29] J. P. Molin and G. D. C. Faulin, “Spatial and Temporal Variability of Soil Electrical Conductivity related to Soil Moisture,” *Scientia Agricola*, vol. 70, no. 1, pp. 01–05, 2013.
- [30] S. P. Friedman, “Soil Properties influencing Apparent Electrical Conductivity: A Review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, no. 1-3 SPEC. ISS., pp. 45–70, 2005.
- [31] J. Rhoades, N. Manteghi, P. Shouse, and W. Alves, “Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 53, no. 2, pp. 433–439, 1989.
- [32] Y. Shao, Q. Hu, H. Guo, Y. Lu, Q. Dong, and C. Han, “Effect of Dielectric Properties of Moist Salinized Soils on Backscattering Coefficients extracted from RADAR-SAT Image,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 8, pp. 1879–1888, 2003.
- [33] Y. Wu, W. Wang, S. Zhao, and S. Liu, “Dielectric Properties of Saline Soils and an Improved Dielectric Model in C-band,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 1, pp. 440–452, 2015.
- [34] H. Gong, Y. Shao, B. Brisco, Q. Hu, and W. Tian, “Modeling the Dielectric Behavior of Saline Soil at Microwave Frequencies,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2013.
- [35] Y. Y. Li, K. Zhao, J. H. Ren, Y. L. Ding, and L. L. Wu, “Analysis of the Dielectric Constant of Saline-Alkali Soils and the Effect on Radar Backscattering Coefficient: A Case Study of Soda Alkaline Saline Soils in western Jilin Province using RADARSAT-2 Data,” *Scientific World Journal*, 2014.
- [36] F. F. Sabins, *Remote Sensing: Principles and Applications*. Waveland Press, 2007.
- [37] D. P. Lusch, “Introduction to Microwave Remote Sensing,” *Center for Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University*, 1999.
- [38] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar*, vol. 396. John Wiley & Sons New York, NY, USA:, 1991.

- [39] E. Chuvieco Salinero, *Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra desde el Espacio*. 2008.
- [40] M. P. Zénere, "Focalización de imágenes sar utilizando el algoritmo omega-k. simulación y validación", Master's thesis, 2012.
- [41] R. Bamler and B. Schättler, "SAR Data Acquisition and Image Formation," *SAR geocoding: data and systems*, pp. 53–102, 1993.
- [42] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing*, vol. 7. New York: Wiley, 1999.
- [43] R. Solorza, "Estimación de la Humedad Superficial del Suelo mediante el Uso Combinado de Modelos Electromagnéticos y el Enfoque Bayesiano. Estudio Exploratorio en Imágenes SARAT," Master's thesis, 2013.
- [44] J. A. Richards *et al.*, *Remote Sensing with Imaging Radar*, vol. 1. Springer, 2009.
- [45] G. Franceschetti and R. Lanari, "Synthetic Aperture Radar Processing," *CRC Press*, vol. 13, p. 17, 1999.
- [46] F. M. Henderson and A. J. Lewis, "Principles and Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing: Volume 2," 1998.
- [47] S. A. Seppi, "Uso de Interferometría Diferencial para monitorear Deformaciones de Terreno en la Comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia," Master's thesis, 2016.
- [48] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data," *Artech house*, vol. 1, no. 3, 2005.
- [49] P. Euillades, L. Euillades, M. Blanco, G. Cabrera, J. Witte, and J. Bergamasco, "Aplicación de Modelos Digitales de Elevación basados en Imágenes SAR en el Estudio de la Geología Estructural," *Petrotecnia*, 01 2005.
- [50] J. A. Richards and X. Jia, "Remote Sensing Digital Image Analysis," *Remote Sensing Digital Image Analysis, An Introduction. 4th ed.*, p. 197, 2006.
- [51] R. M. Edrosa, "Aplicación de la Teledetección para el Monitoreo de Eventos Hídricos Superficiales mediante Imágenes CosmoSkyMed," Master's thesis, 2011.
- [52] A. I. Flores-Anderson, K. E. Herndon, R. B. Thapa, and E. Cherrington, "The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation," 2019.
- [53] F. Ulaby, R. Moore, and A. Fung, "Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. III, Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications," *Inc., Dedham, Massachusetts*, pp. 1797–1848, 1986.
- [54] M. Barber, F. Grings, P. Perna, C. Bruscantini, and H. Karszenbaum, "Análisis de las Mediciones de Rugosidad del Centro Espacial Teófilo Tabanera," tech. rep., Córdoba. Technical report, CONAE-IAFE, 2011.
- [55] B. W. Barrett, E. Dwyer, and P. Whelan, "Soil Moisture Retrieval from Active Spaceborne Microwave Observations: An Evaluation of Current Techniques," *Remote Sensing*, vol. 1, no. 3, pp. 210–242, 2009.

- [56] F. Ulaby and D. Long, *Microwave radar and radiometric remote sensing*. Artech House, 2015.
- [57] R. Dwivedi, *Remote Sensing of Soils*. Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [58] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, “An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces,” *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 370–381, 1992.
- [59] P. C. Dubois, J. Van Zyl, and T. Engman, “Measuring Soil Moisture with Imaging Radars,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp. 915–926, 1995.
- [60] J. Shi, J. Wang, A. Y. Hsu, P. E. O’Neill, and E. T. Engman, “Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter using L-band SAR Image Data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 5, pp. 1254–1266, 1997.
- [61] L. Wang, X. Quan, B. He, M. Yebra, M. Xing, and X. Liu, “Assessment of the Dual Polarimetric Sentinel-1A Data for Forest Fuel Moisture Content Estimation,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 13, p. 1568, 2019.
- [62] T. Neusch and M. Sties, “Application of the Dubois Model using Experimental Synthetic Aperture Radar Data for the Determination of Soil Moisture and Surface Roughness,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, no. 4, pp. 273–278, 1999.
- [63] M. Sikdar and I. Cumming, “A Modified Empirical Model for Soil Moisture Estimation in Vegetated Areas using SAR Data,” in *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 2, pp. 803–806, IEEE, 2004.
- [64] D. Bell, C. Menges, W. Ahmad, and J. van Zyl, “The Application of Dielectric Retrieval Algorithms for Mapping Soil Salinity in a Tropical Coastal Environment Using Airborne Polarimetric SAR,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, pp. 375–384, mar 2001.
- [65] M. Sikdar, *Soil Moisture Estimation using SAR Polarimetry*. PhD thesis, University of British Columbia, 2005.
- [66] Z. Aly, F. Bonn, and R. Magagi, “Modelling the Backscattering Coefficient of Salt-Affected Soils: Applications to Wadi el Natrun bottom, Egypt,” in *EARSel Proceedings*, vol. 3, pp. 372–381, Citeseer, 2004.
- [67] Z. Aly, F. J. Bonn, and R. Magagi, “Analysis of the Backscattering Coefficient of Salt-Affected Soils using Modeling and RADARSAT-1 SAR Data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007.
- [68] I. Nurmemet, V. Sagan, J. L. Ding, Ü. Halik, A. Abliz, and Z. Yakup, “A WFS-SVM Model for Soil Salinity Mapping in Keriya Oasis, Northwestern China using Polarimetric Decomposition and fully PolSAR Data,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 4, 2018.
- [69] M. M. Taghadosi, M. Hasanlou, and K. Eftekhari, “Soil Salinity Mapping using Dual-polarized SAR Sentinel-1 Imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 00, no. 00, pp. 1–16, 2018.

- [70] B. Cheng and H. H. Zhang, “Information Extraction of Saline-alkali Soil in the West of Jilin Province Based on Fully Polarimetric SAR - a Case Study in Qian An County,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering*, p. 128, ACM, 2018.
- [71] P. V. Hoa, N. V. Giang, N. A. Binh, L. V. H. Hai, T. D. Pham, M. Hasanlou, and D. T. Bui, “Soil Salinity Mapping using SAR Sentinel-1 Data and Advanced Machine Learning Algorithms: A Case Study at Ben Tre Province of the Mekong River Delta (Vietnam),” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 2, pp. 0–21, 2019.
- [72] M. Thibeault, J. M. Cáceres, D. Dadamia, A. G. Soldano, M. U. Quirno, J. M. Guerrieri, R. Edrosa, M. Palomeque, L. Romaldi, J. Pucheta, *et al.*, “Spatial and Temporal Analysis of the Monte Buey SAOCOM and SMAP Core Site,” in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 969–971, IEEE, 2015.
- [73] Agencia Córdoba Ambiente-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA, “Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: Los Suelos, Nivel de Reconocimiento 1: 500.000,” 2006.
- [74] J. Cisneros, A. Degioanni, J. J. Cantero, and A. Cantero, “Caracterización y Manejo de Suelos Salinos en el Área Pampeana Central,” *La salinización de suelos en Argentina: Su impacto en la producción agropecuaria*, 2008.
- [75] J. Gorgas and M. Bustos, “Dinámica y Evaluación de los Suelos de Córdoba con Problemas de Drenaje, Salinidad y Alcalinidad,” *La salinización de suelos en la Argentina: su impacto en la producción agropecuaria*. (Eds E Taleisnik, K Grunberg, G Santa María) pp, pp. 47–62, 2008.
- [76] J. A. Gorgas, J. L. Tassile, E. F. Lovera, and F. Moore, “Panorama Edafológico de Córdoba: Inventario de los Suelos y de algunos Caracteres Edáficos de la Provincia por Departamentos y Pedanías,” tech. rep., MAGyRR-Plan Mapa de suelosINTA, 1993.
- [77] G. Metternicht and A. Zinck, *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management*. CRC Press, 2008.
- [78] S. A. Panah and R. Goossens, “Relationship between the Landsat TM, MSS Data and Soil Salinity,” *J. Agric. Sci*, vol. 3, pp. 21–31, 2001.
- [79] B. Rao, R. Dwivedi, L. Venkataratnam, T. Ravishankar, S. Thammappa, G. Bhargawa, and A. Singh, “Mapping the Magnitude of Sodicity in part of the Indo-Gangetic Plains of Uttar Pradesh, Northern India using Landsat-TM Data,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no. 3, pp. 419–425, 1991.
- [80] A. Singh and R. Dwivedi, “Delineation of Salt-Affected Soils through Digital Analysis of Landsat MSS Data,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 1, pp. 83–92, 1989.
- [81] A. El-Battay, A. Bannari, N. Hameid, and A. Abahussain, “Comparative Study among different Semi-Empirical Models for Soil Salinity Prediction in an Arid Environment using OLI Landsat-8 Data,” *Adv. Remote Sens*, vol. 6, pp. 23–39, 2017.
- [82] L. Bai, C. Wang, S. Zang, Y. Zhang, Q. Hao, and Y. Wu, “Remote Sensing of Soil Alkalinity and Salinity in the Wuyu'er-Shuangyang River Basin, Northeast China,” *Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, p. 163, 2016.

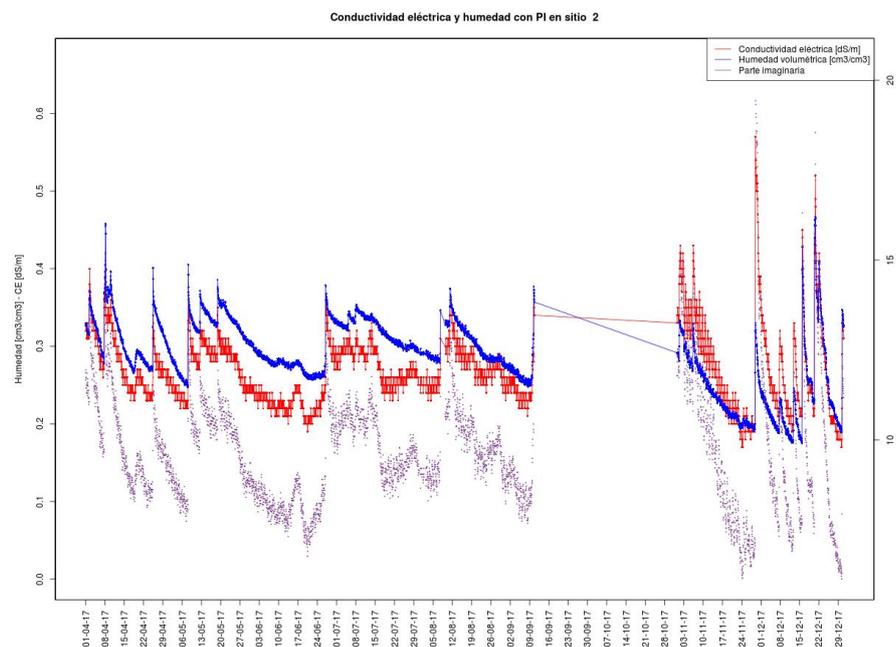
- [83] I. Melendez-Pastor, J. Navarro-Pedreño, M. Koch, and I. Gómez, “Applying Imaging Spectroscopy Techniques to map Saline Soils with ASTER Images,” *Geoderma*, vol. 158, no. 1-2, pp. 55–65, 2010.
- [84] F. Al-Khaier, “Soil Salinity Detection using Satellite Remote Sensing,” ITC, 2003.
- [85] A. Bannari, A. El-Battay, R. Bannari, and H. Rhinane, “Sentinel-MSI VNIR and SWIR Bands Sensitivity Analysis for Soil Salinity Discrimination in an Arid Landscape,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 6, p. 855, 2018.
- [86] E. Davis, C. Wang, and K. Dow, “Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI in Soil Salinity Detection: a Case Study of Agricultural Lands in Coastal North Carolina,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 40, no. 16, pp. 6134–6153, 2019.
- [87] V. Poenaru, A. Badea, S. M. Cimpeanu, and A. Irimescu, “Multi-temporal Multi-spectral and Radar Remote Sensing for Agricultural Monitoring in the Braila Plain,” *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 6, pp. 506–516, 2015.
- [88] E. Scudiero, T. H. Skaggs, and D. L. Corwin, “Regional Scale Soil Salinity Evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA,” *Geoderma Regional*, vol. 2, pp. 82–90, 2014.
- [89] M. Ibrahim, “Modeling Soil Salinity and Mapping using Spectral Remote Sensing Data in the Arid and Semi-Arid Region,” *International Journal of Remote Sensing Applications*, vol. 6, pp. 76–83, 2016.
- [90] A. E. K. Douaoui, H. Nicolas, and C. Walter, “Detecting Salinity Hazards within a Semiarid Context by Means of combining Soil and Remote-Sensing Data,” *Geoderma*, vol. 134, no. 1-2, pp. 217–230, 2006.
- [91] ESA, *SENTINEL-2 User Handbook*. European Space Agency, 2015.
- [92] U. Mueller-Wilm, O. Devignot, and L. Pessiot, “Sen2Cor Configuration and User Manual,” *Telespazio VEGA Deutschland GmbH: Darmstadt, Germany*, 2016.
- [93] F. Covelto, F. Battazza, A. Coletta, E. Lopinto, C. Fiorentino, L. Pietranera, G. Valentini, and S. Zoffoli, “COSMO-SkyMed an Existing Opportunity for Observing the Earth,” *Journal of Geodynamics*, vol. 49, no. 3-4, pp. 171–180, 2010.
- [94] ASI, *COSMO-SkyMed Mission and Products Description*. Italian Space Agency, 2016.
- [95] CONAE, “Comisión Nacional de Actividades Espaciales -Misiones Satelitales.” [https://catalogos2.conae.gov.ar/cosmo\\_prod\\_srm/descripcionProducto.aspx](https://catalogos2.conae.gov.ar/cosmo_prod_srm/descripcionProducto.aspx), 2019. (Accessed on 11/09/2019).
- [96] S. Gillies *et al.*, “Rasterio: Geospatial Raster I/O for Python programmers.” <https://github.com/mapbox/rasterio>, 2013–.
- [97] I. Hajnsek, E. Pottier, and S. R. Cloude, “Inversion of Surface Parameters from Polarimetric SAR,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 4, pp. 727–744, 2003.

- [98] IDECOR, “Trabajando con el Catastro y demás Datos Provinciales en tu Aplicación Desktop o Web. Cómo usar los Servicios WFS de IDECOR.” <https://idecor.cba.gov.ar/trabajando-con-el-catastro-y-demas-datos-provinciales-en-tu-aplicacion-desktop-o-web-como-usar-los-servicios-wfs-de-idecor/>, 2019. (Accessed on 04/09/2019).
- [99] J. Shi, J. V. Soares, L. Hess, E. T. Engman, and J. J. Vanzyl, “Soil Moisture Measurements from Airborne SAR,” 1991.
- [100] G. C. Topp, J. Davis, and A. P. Annan, “Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines,” *Water resources research*, vol. 16, no. 3, pp. 574–582, 1980.
- [101] W. Wu, A. S. Muhaimed, W. M. Al-Shafie, and A. M. Al-Quraishi, “Using l-band radar data for soil salinity mapping—a case study in central iraq,” *Environmental Research Communications*, vol. 1, no. 8, p. 081004, 2019.

# **Anexos**

## Conductividad eléctrica y humedad de suelo in-situ 2017

En este Anexo se presentan los resultados obtenidos de la red telemétrica de SAOCOM de las distintas estaciones disponibles en el área de estudio. Para ello se muestra la evolución de los datos tomando como ventana temporal el año 2017 de la parte real y la parte imaginaria sensada para cada sensor en particular. Para la localización de cada sensor, referirse a la Figura 4.7.



**Figura A.1:** Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 2

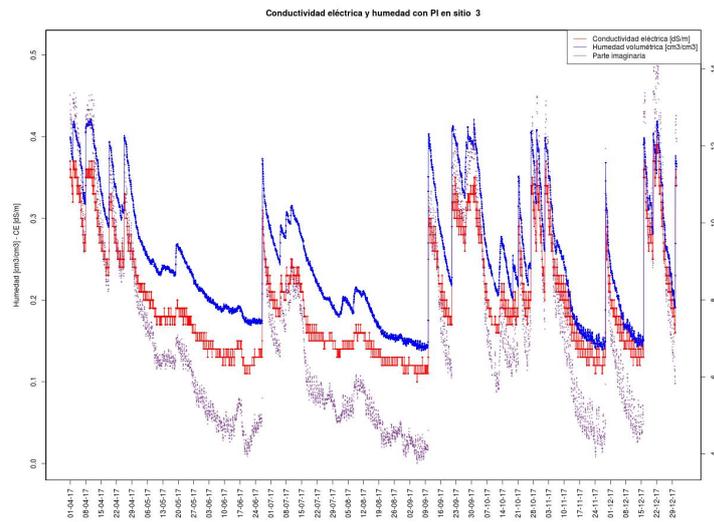


Figura A.2: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 3

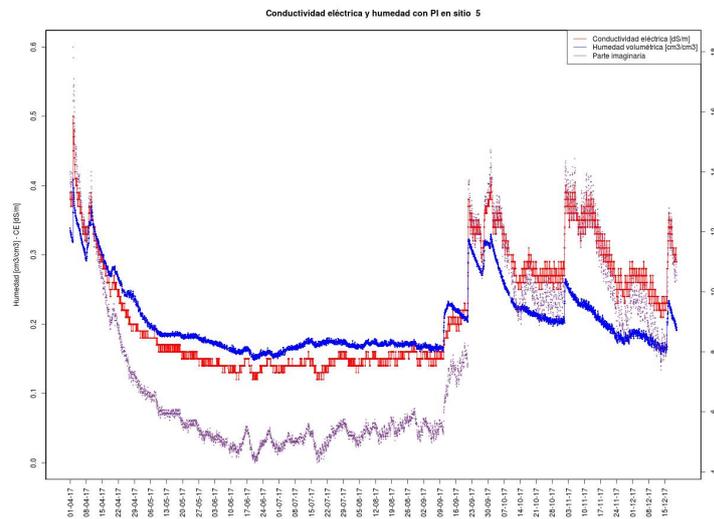


Figura A.3: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 5

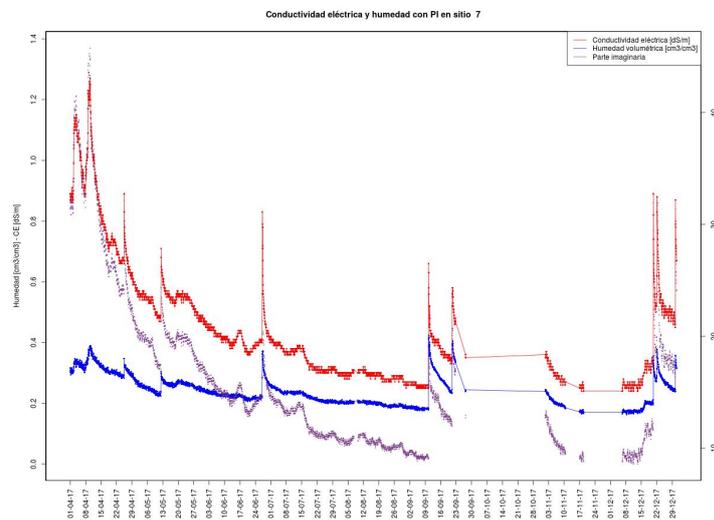


Figura A.4: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 7

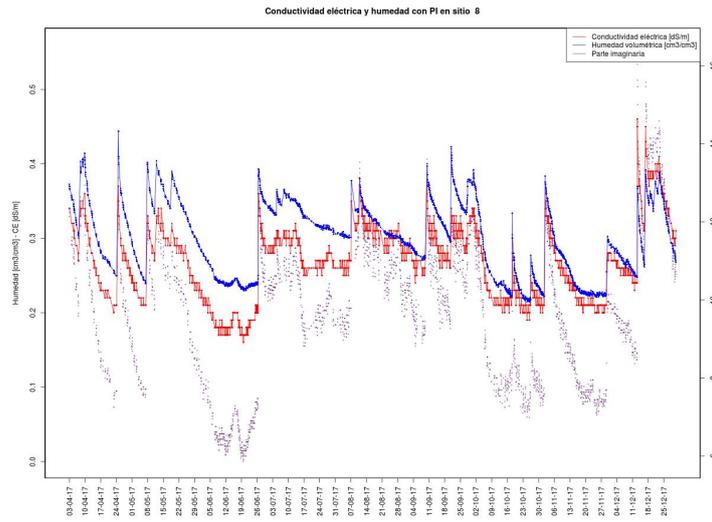


Figura A.5: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 8

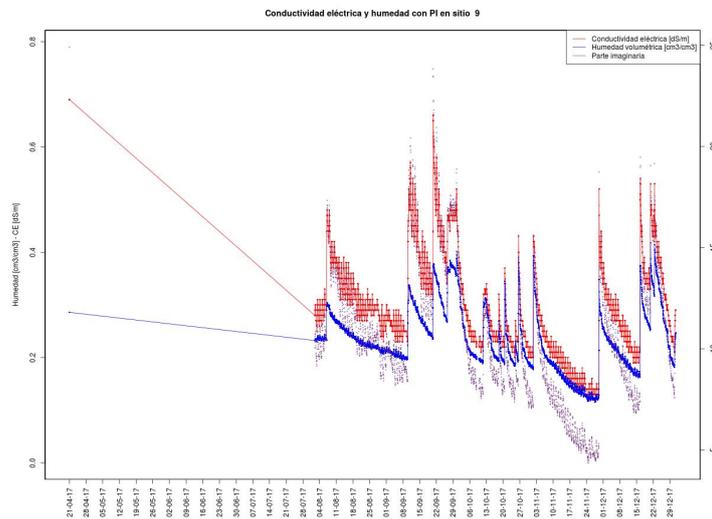


Figura A.6: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 9

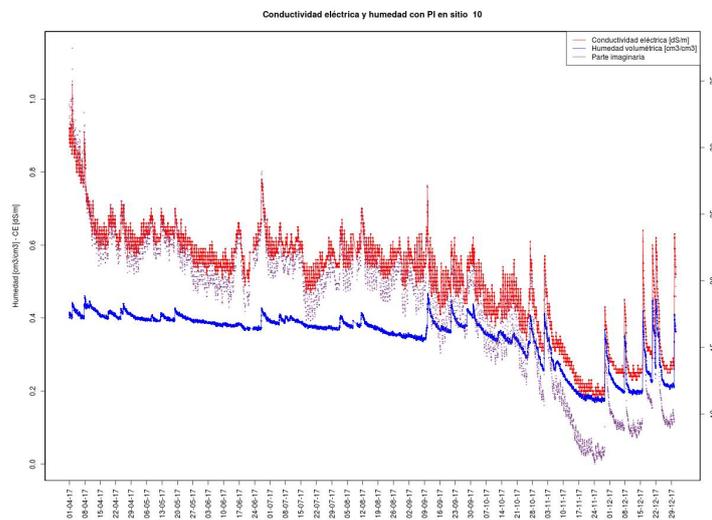


Figura A.7: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 10

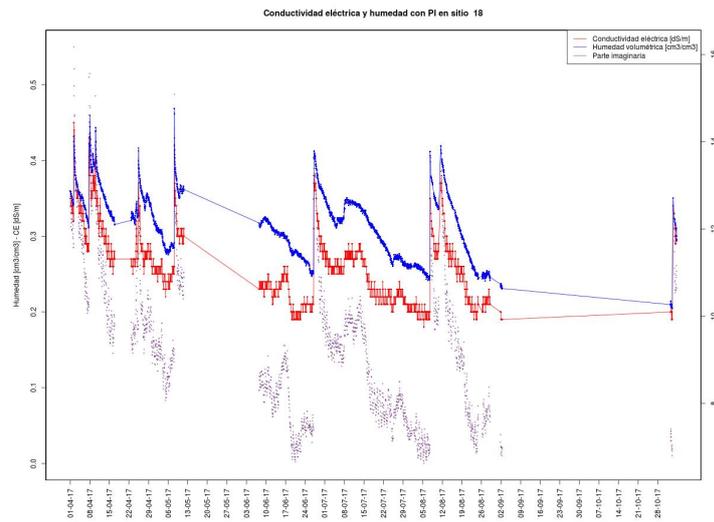


Figura A.8: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 18

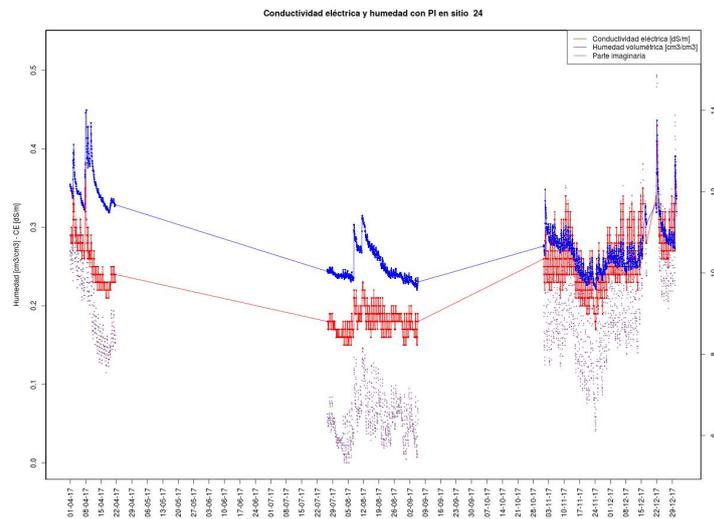


Figura A.9: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 24

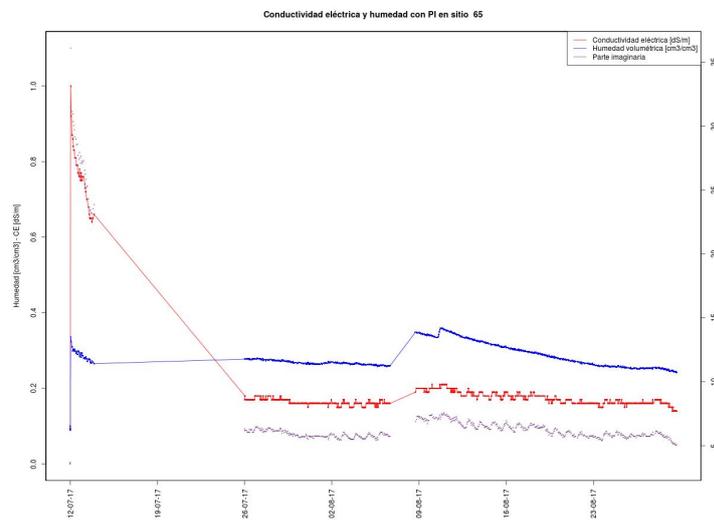


Figura A.10: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 65

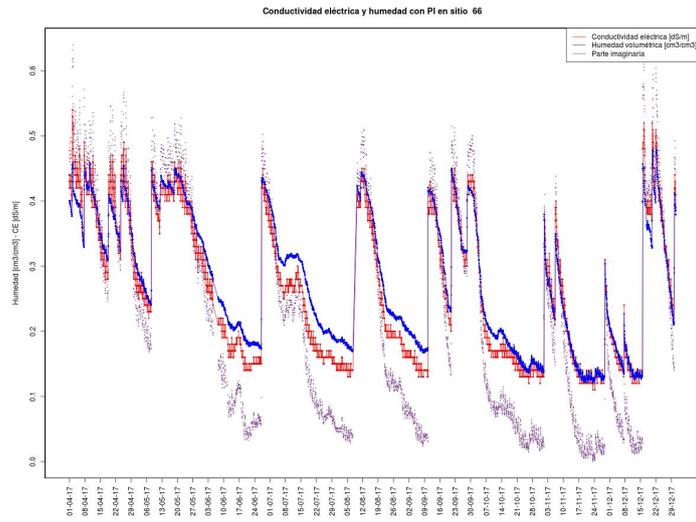


Figura A.11: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 66

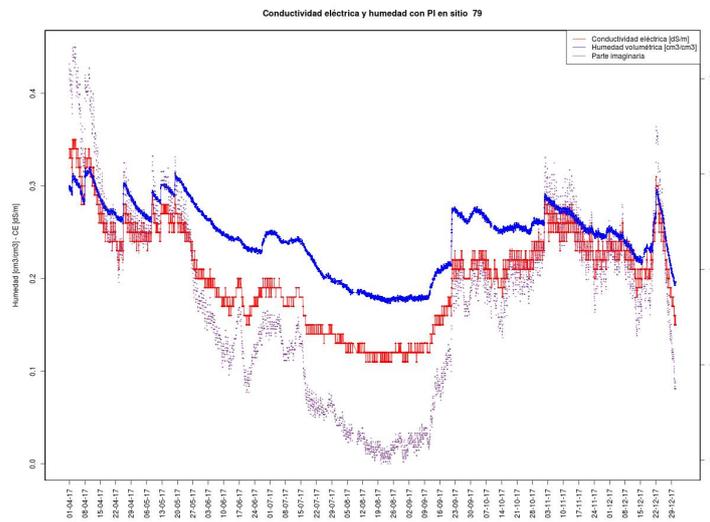


Figura A.12: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 79

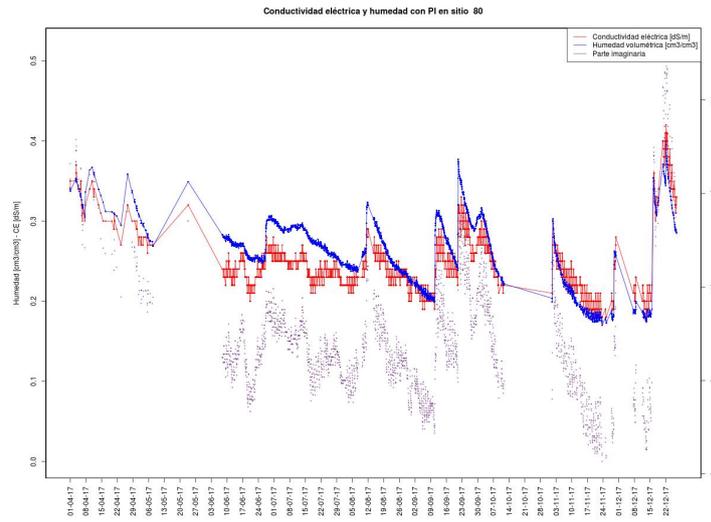


Figura A.13: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 80

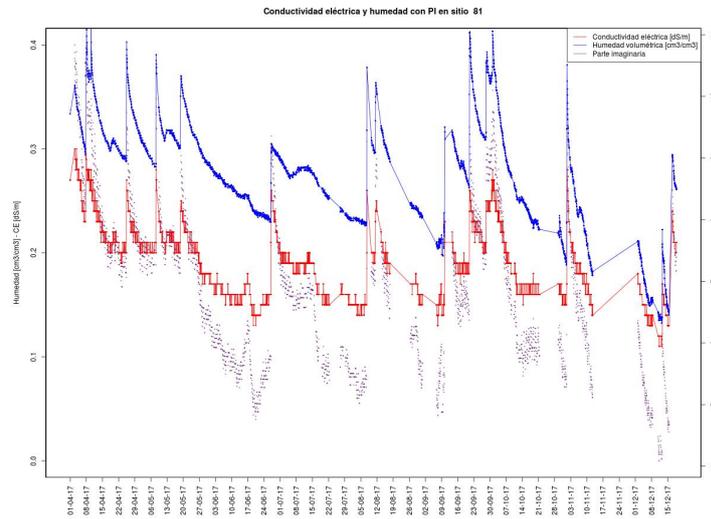


Figura A.14: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 81

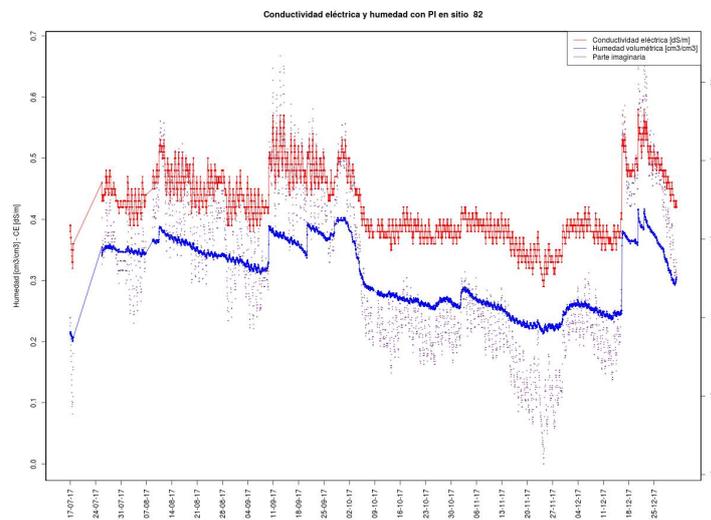


Figura A.15: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 82

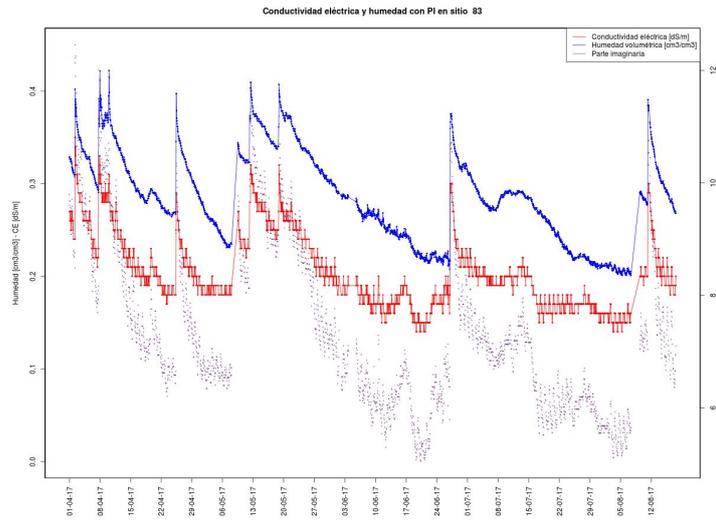


Figura A.16: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 83

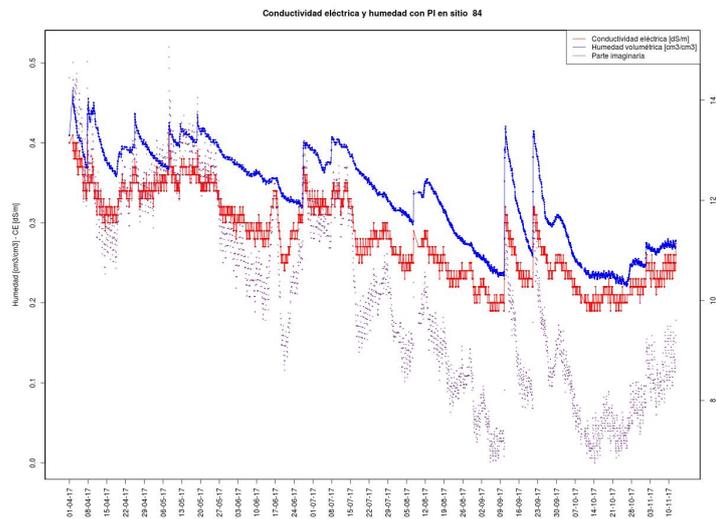


Figura A.17: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 84

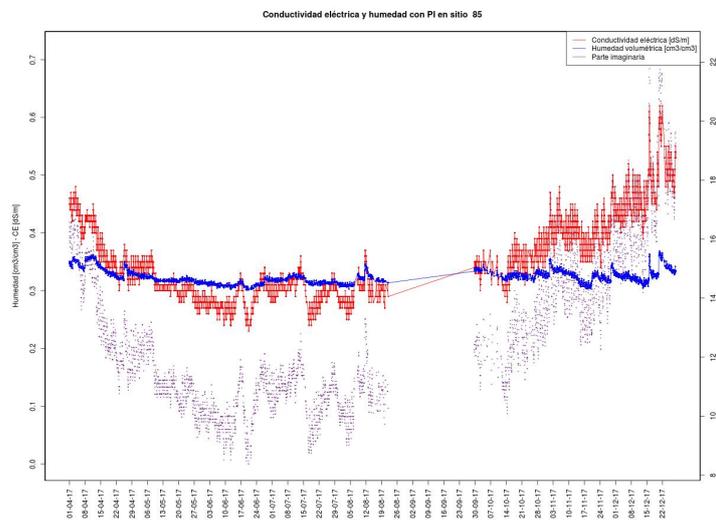


Figura A.18: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 85

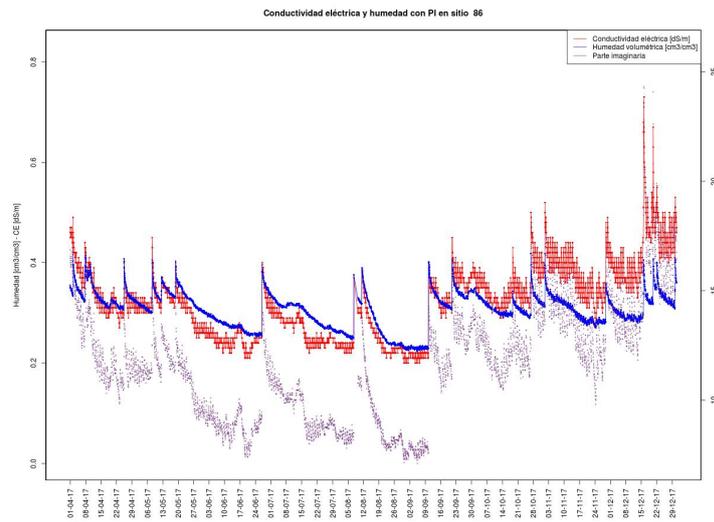


Figura A.19: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 86

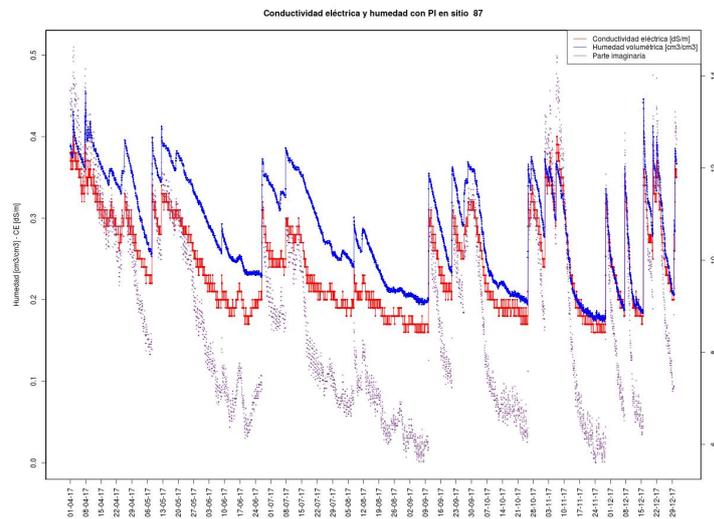


Figura A.20: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 87

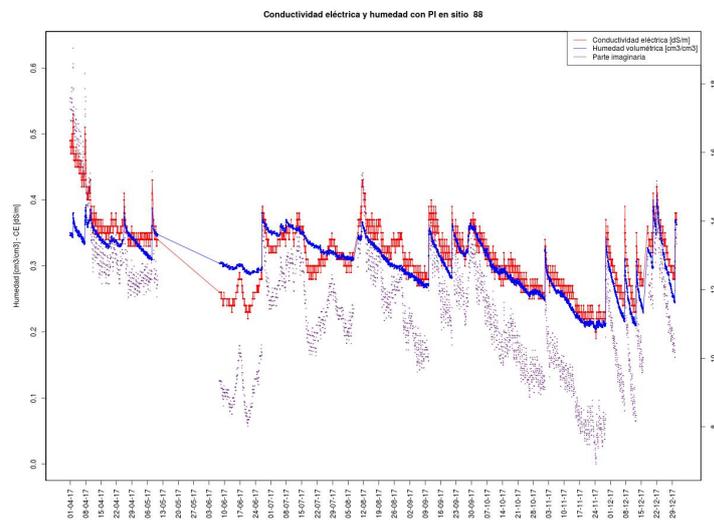


Figura A.21: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 88

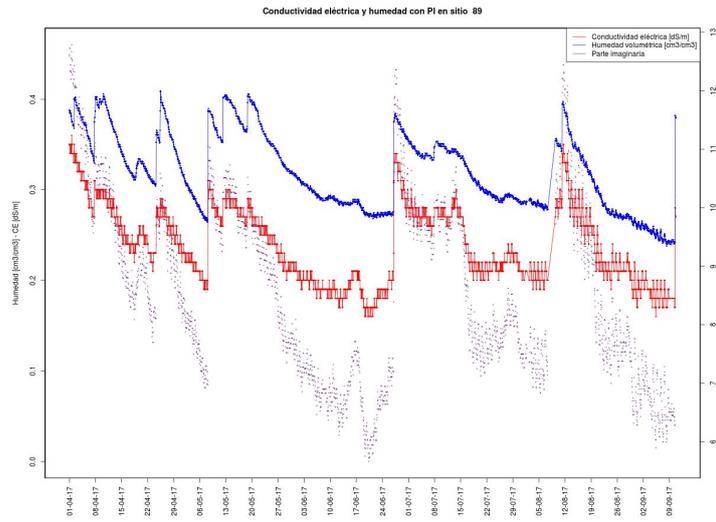


Figura A.22: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 89

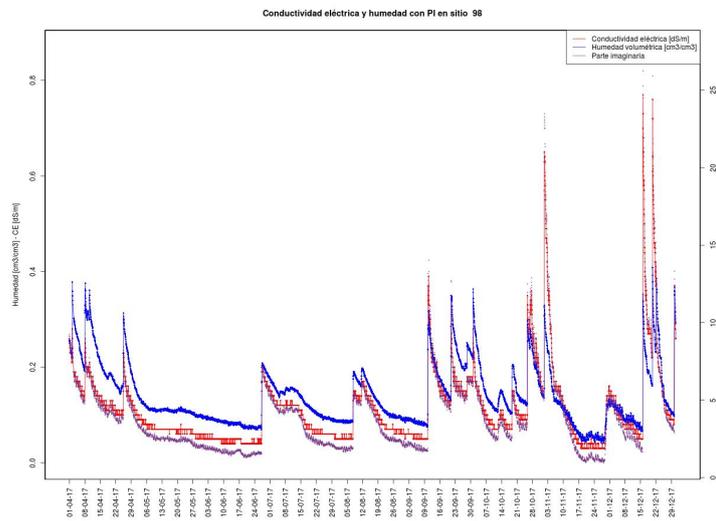


Figura A.23: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 98

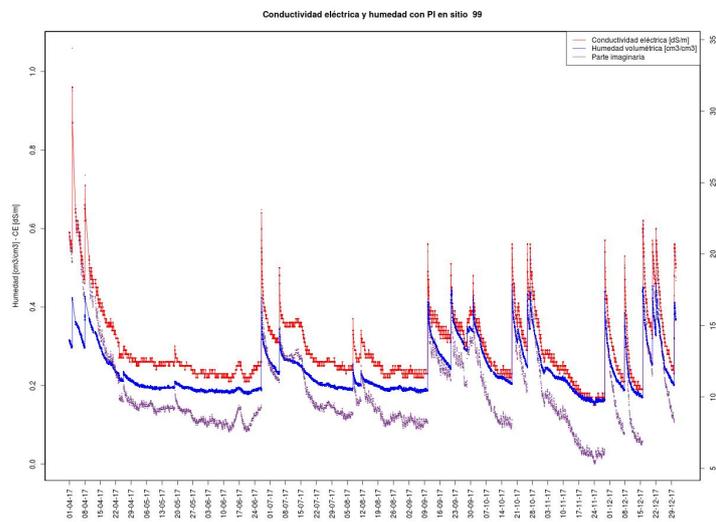


Figura A.24: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 99

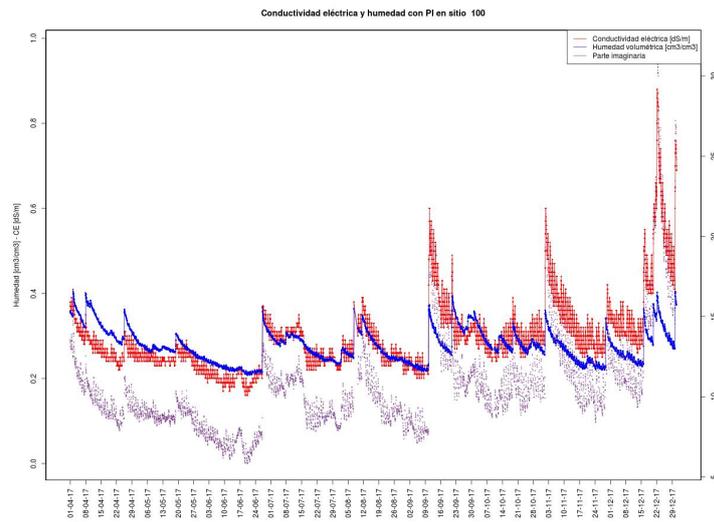


Figura A.25: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 100

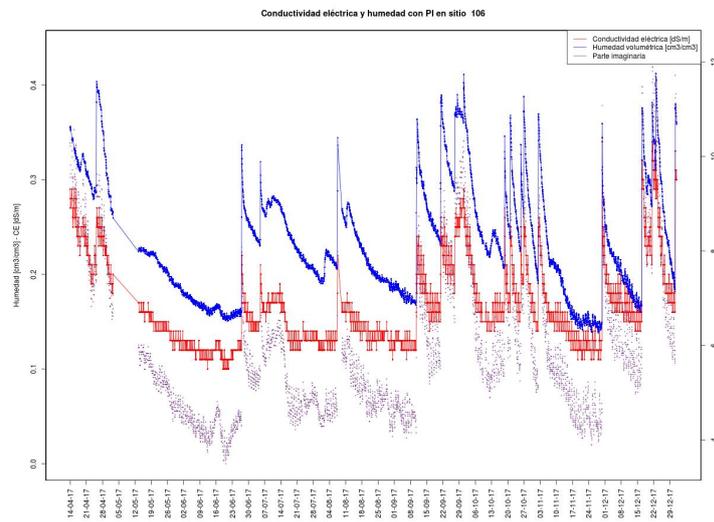


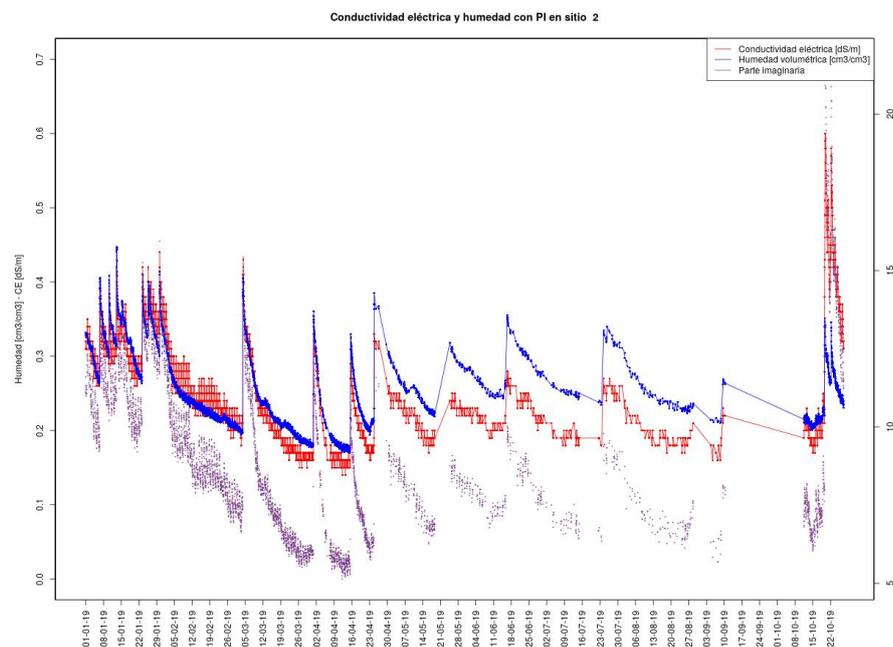
Figura A.26: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 106

---

## Conductividad eléctrica y humedad de suelo in-situ 2019

---

En este Anexo se presentan los resultados obtenidos de la red telemétrica de SAOCOM de las distintas estaciones disponibles en el área de estudio. Para ello se muestra la evolución de los datos tomando como ventana temporal el año 2019 de la parte real y la parte imaginaria sensada para cada sensor en particular, datos de validación usado para el análisis del procesamiento SAOCOM. Para la localización de cada sensor, referirse a la Figura 4.7.



**Figura B.1:** Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 2

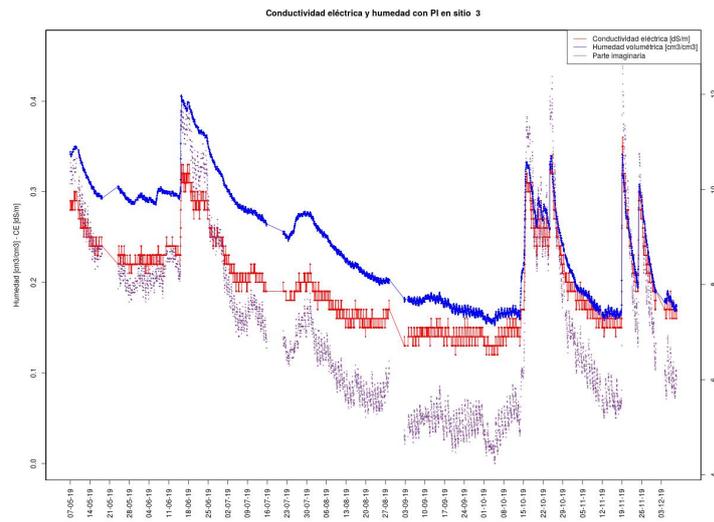


Figura B.2: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 3

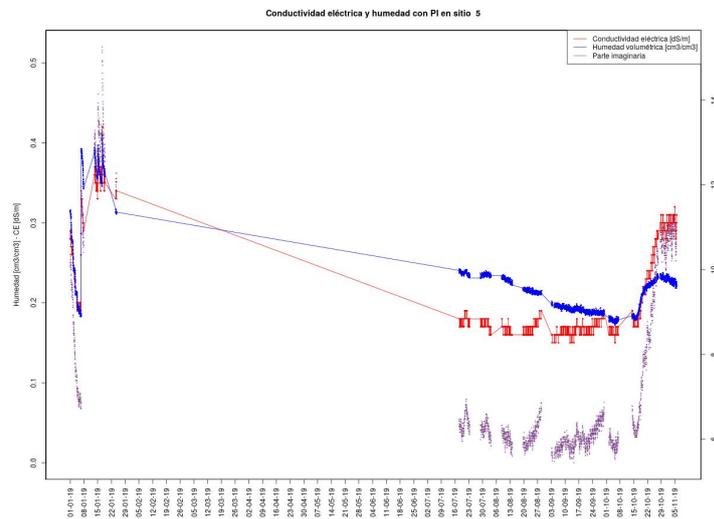


Figura B.3: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 5

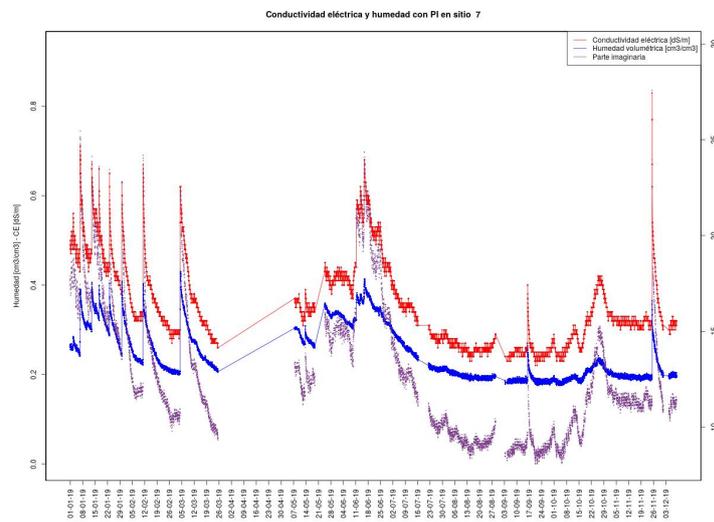


Figura B.4: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 7

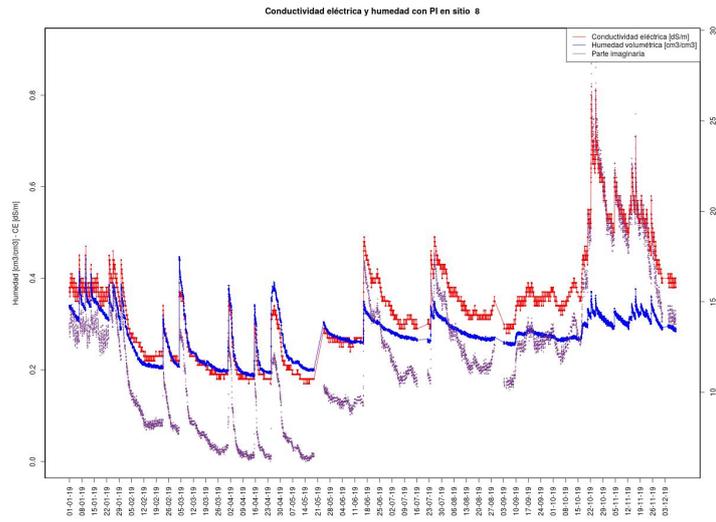


Figura B.5: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 8

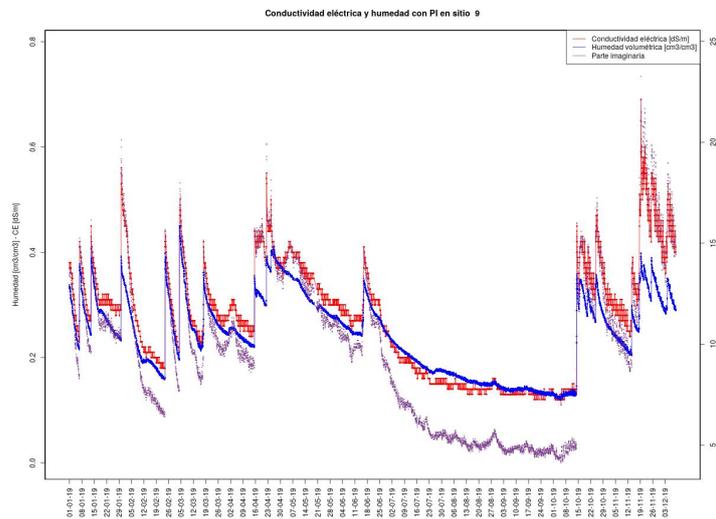


Figura B.6: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 9

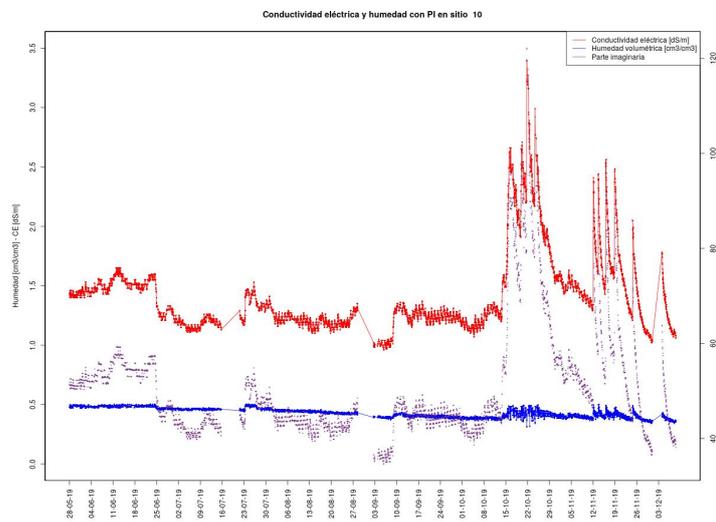


Figura B.7: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 10

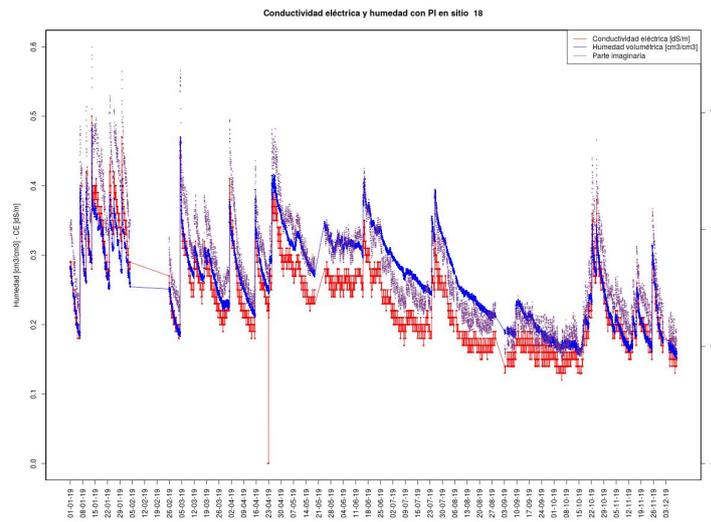


Figura B.8: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 18

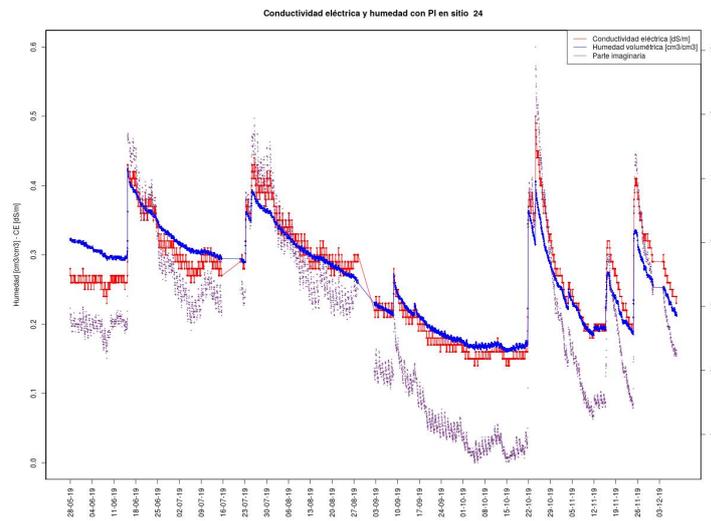


Figura B.9: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 24

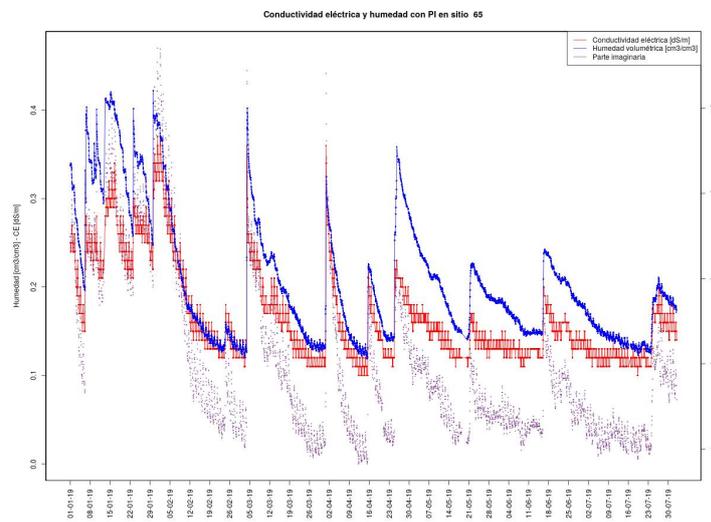


Figura B.10: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 65

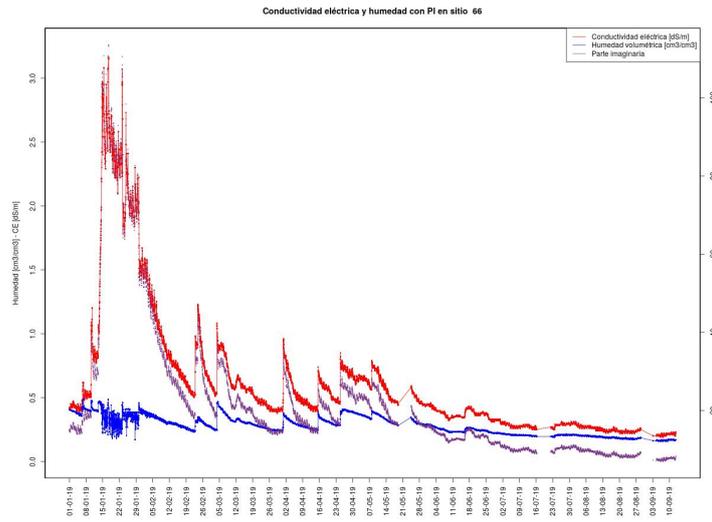


Figura B.11: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 66

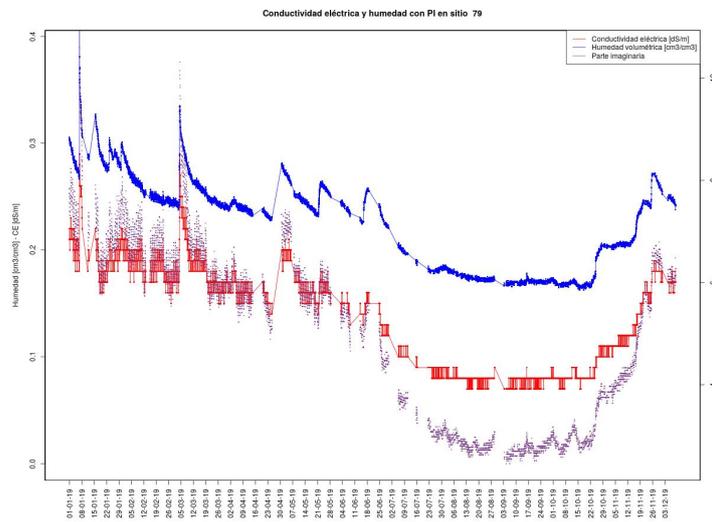


Figura B.12: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 79

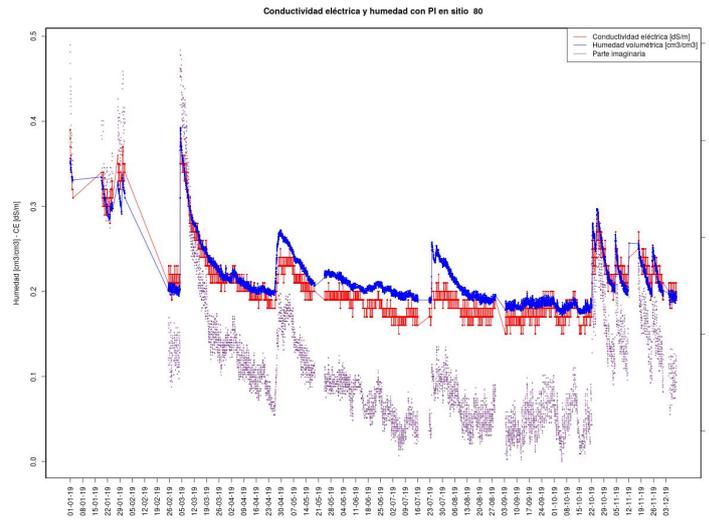


Figura B.13: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 80

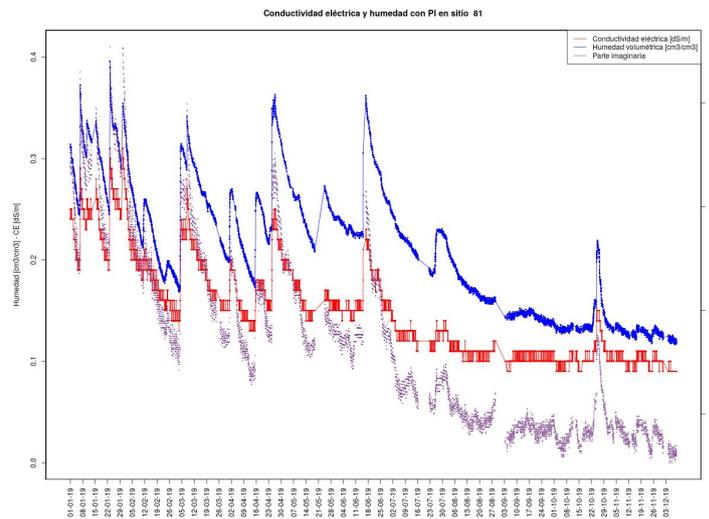


Figura B.14: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 81

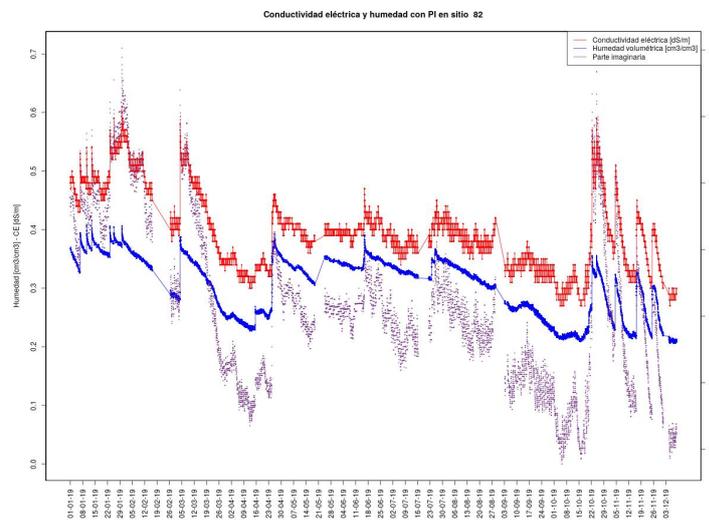


Figura B.15: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 82

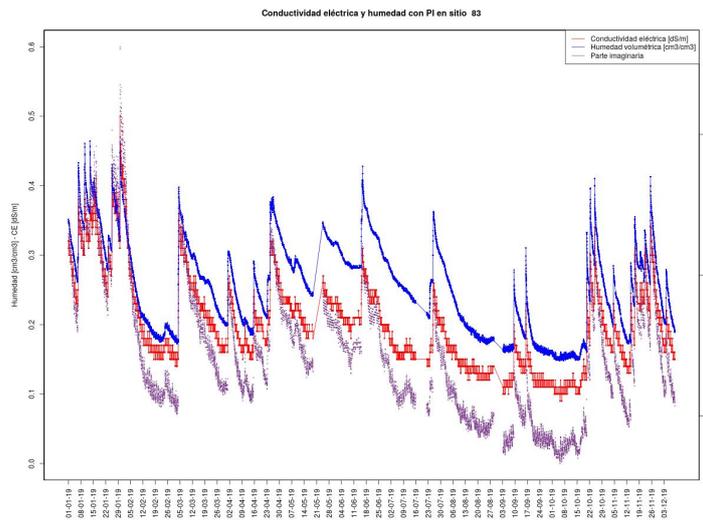


Figura B.16: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 83

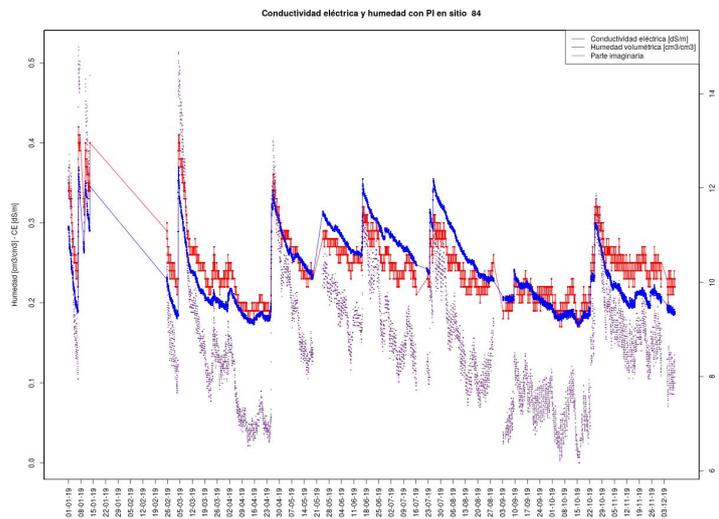


Figura B.17: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 84

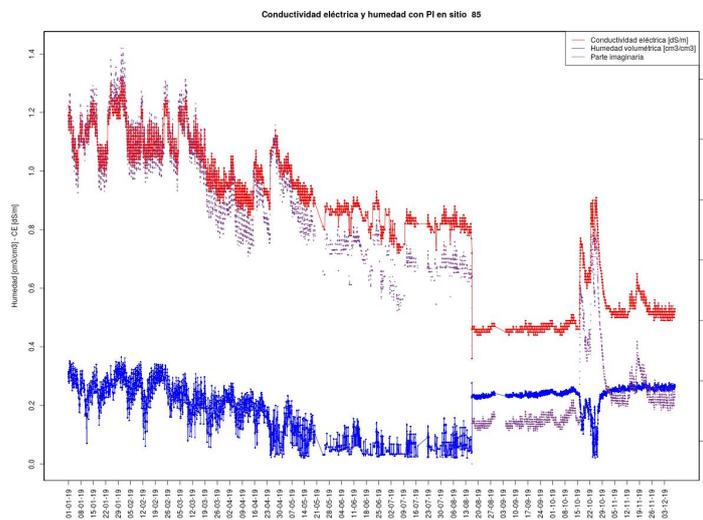


Figura B.18: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 85

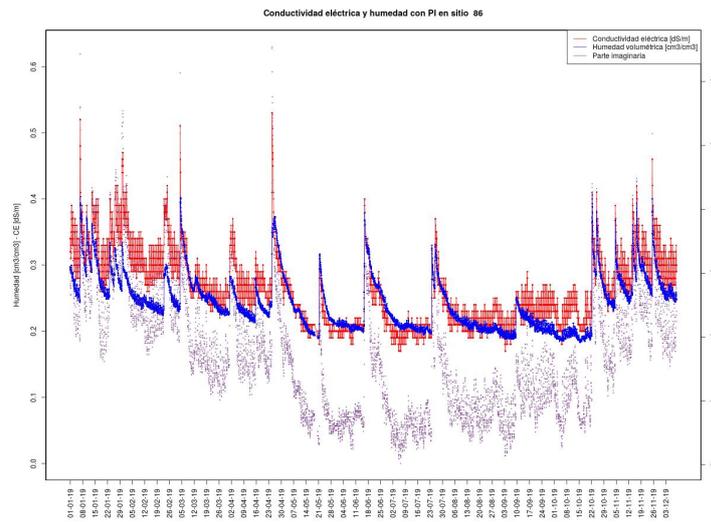


Figura B.19: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 86

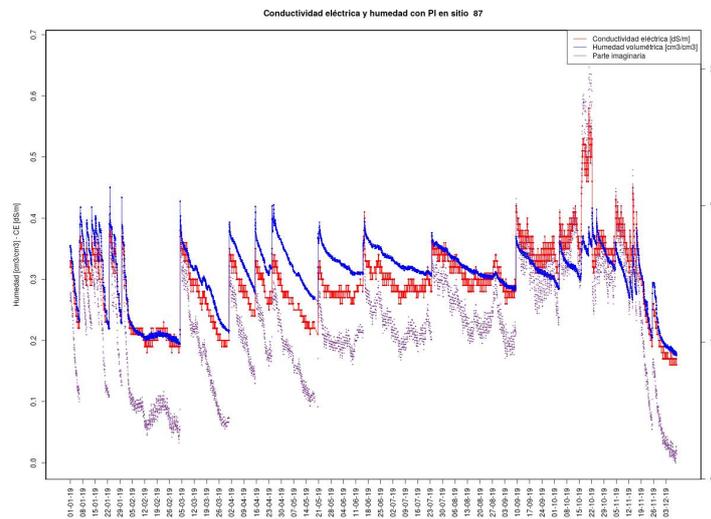


Figura B.20: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 87

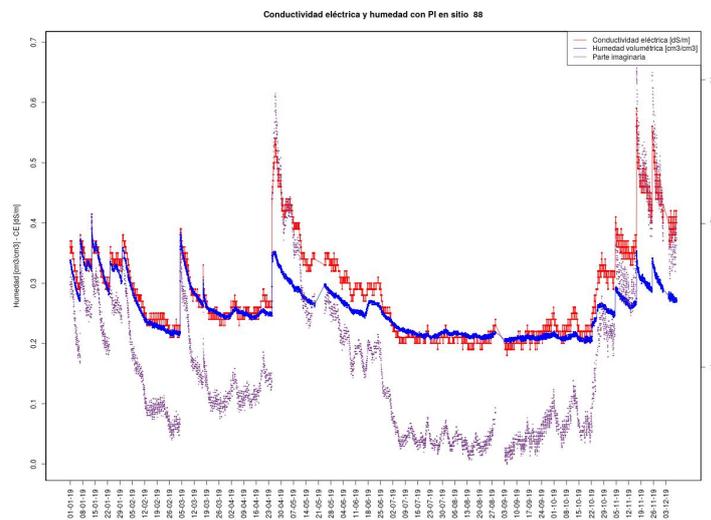


Figura B.21: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 88

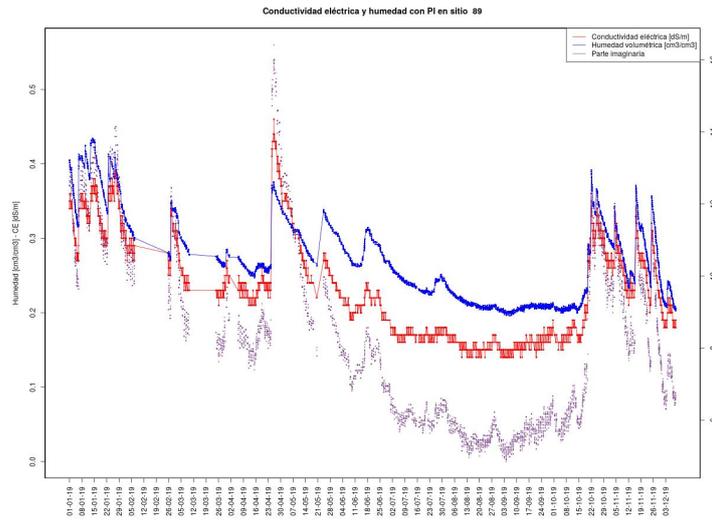


Figura B.22: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 89

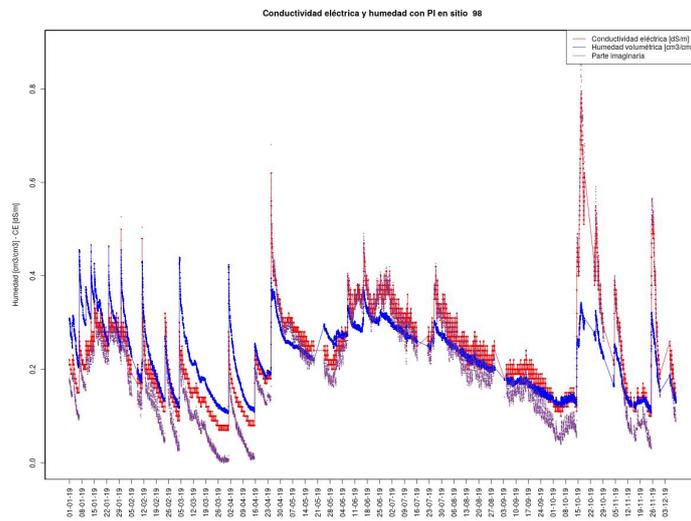


Figura B.23: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 98

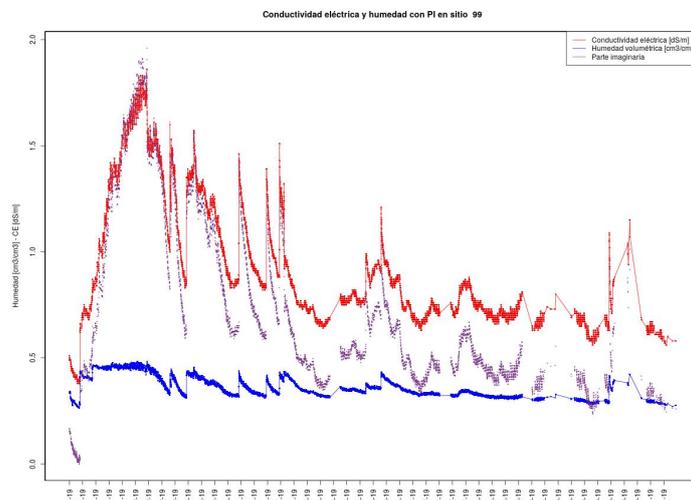


Figura B.24: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 99

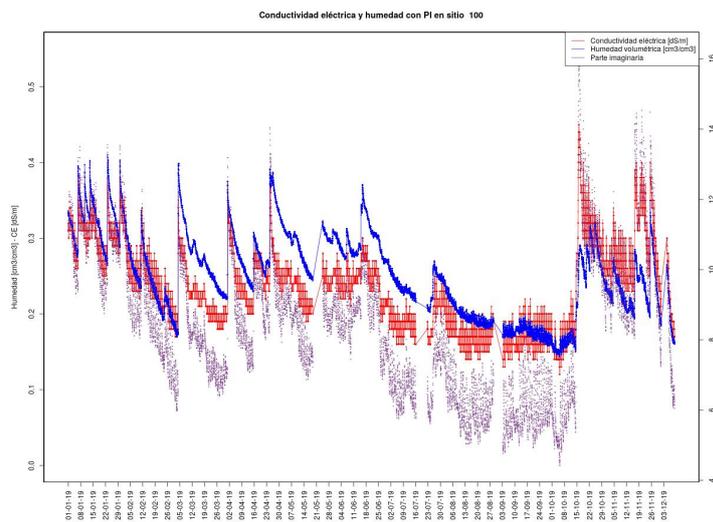


Figura B.25: Conductividad eléctrica y humedad de suelo en el sitio 100

## Mapas obtenidos con índices ópticos y clasificación con umbrales

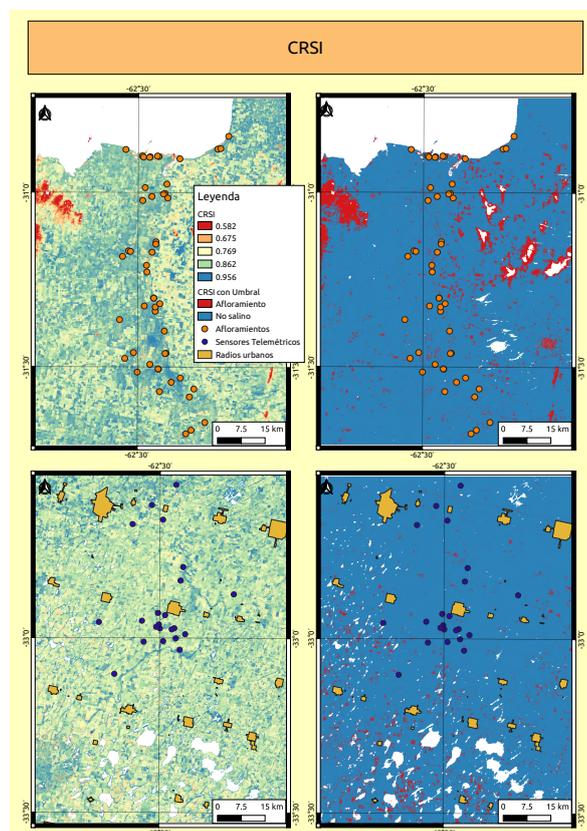


Figura C.1: CRSI (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio



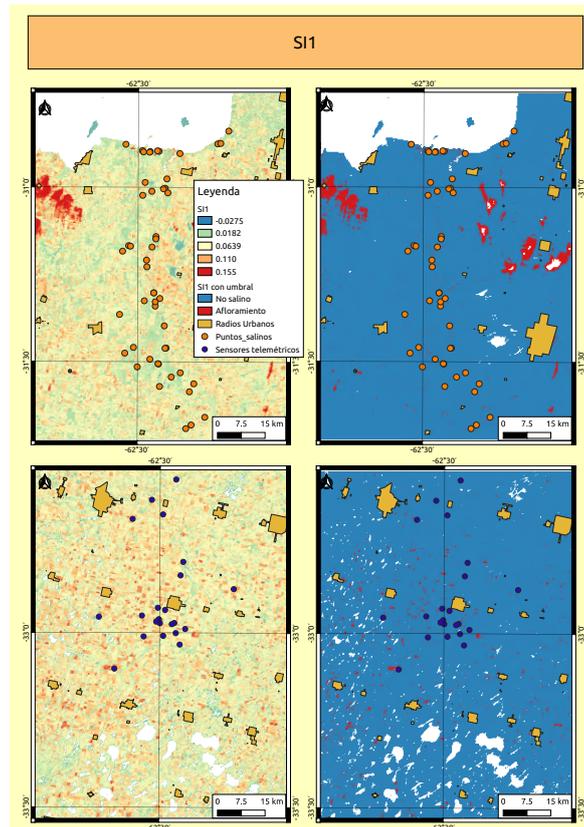


Figura C.4: SI1 (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

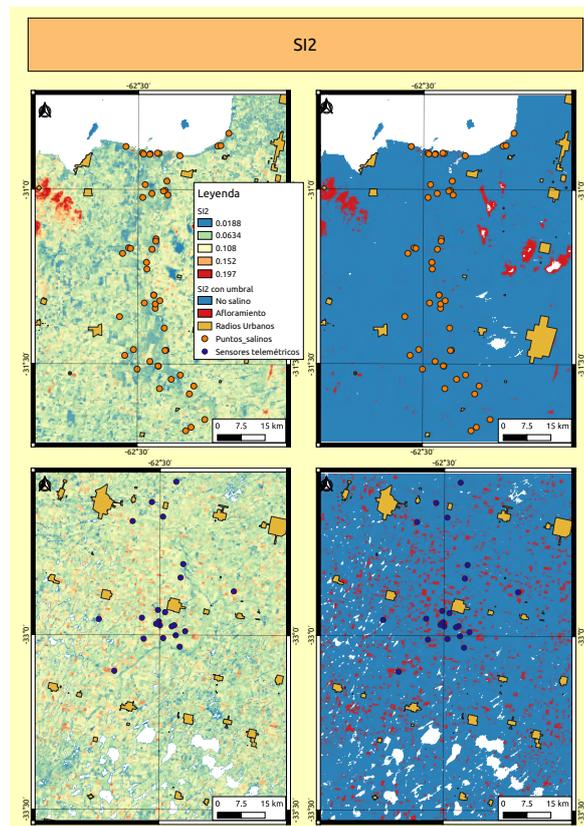


Figura C.5: SI2 (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

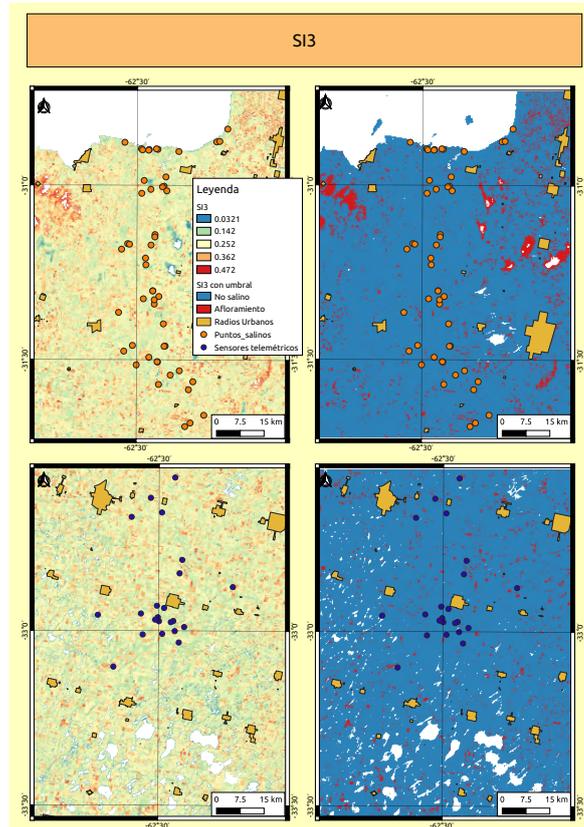


Figura C.6: SI3 (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

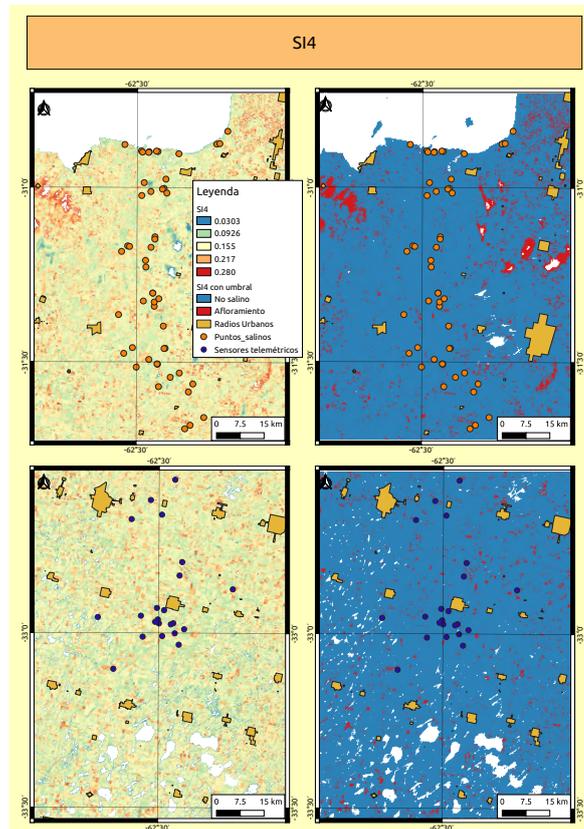


Figura C.7: SI4 (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

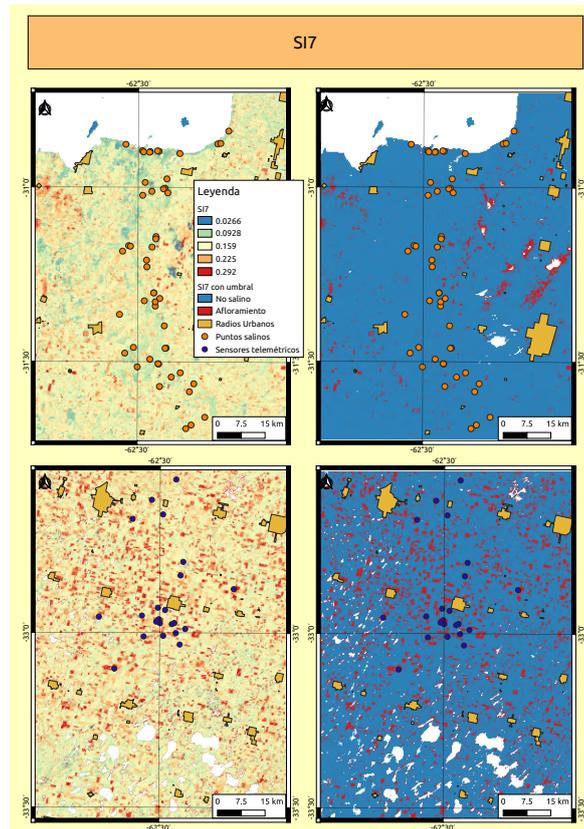


Figura C.8: SI7 (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

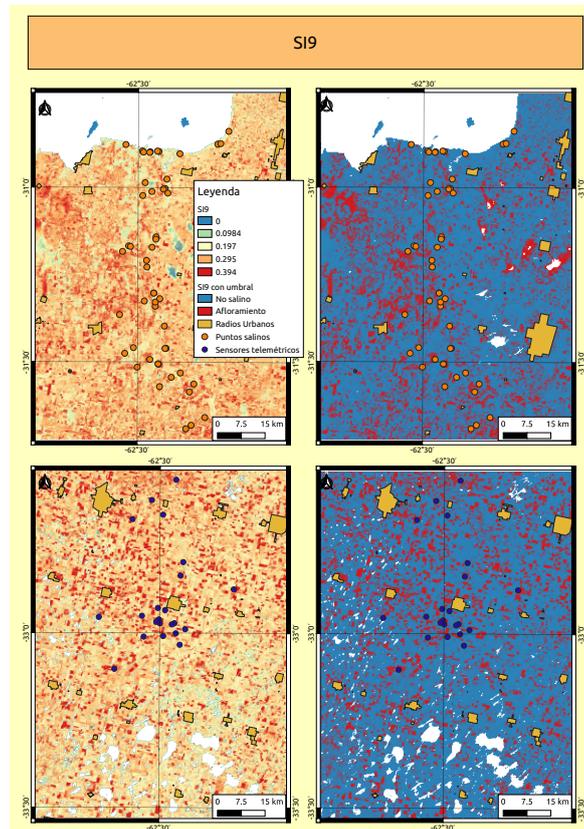


Figura C.9: SI9 (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

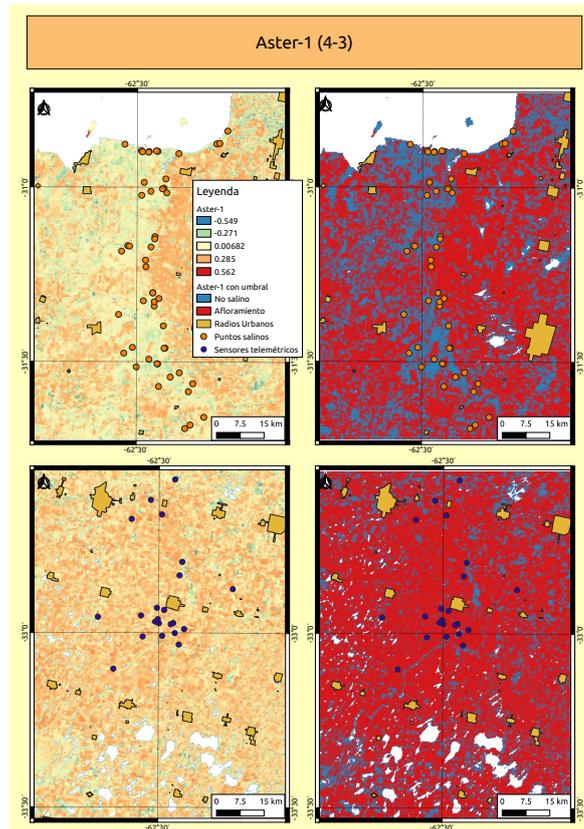


Figura C.10:  $Aster_1$  (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio

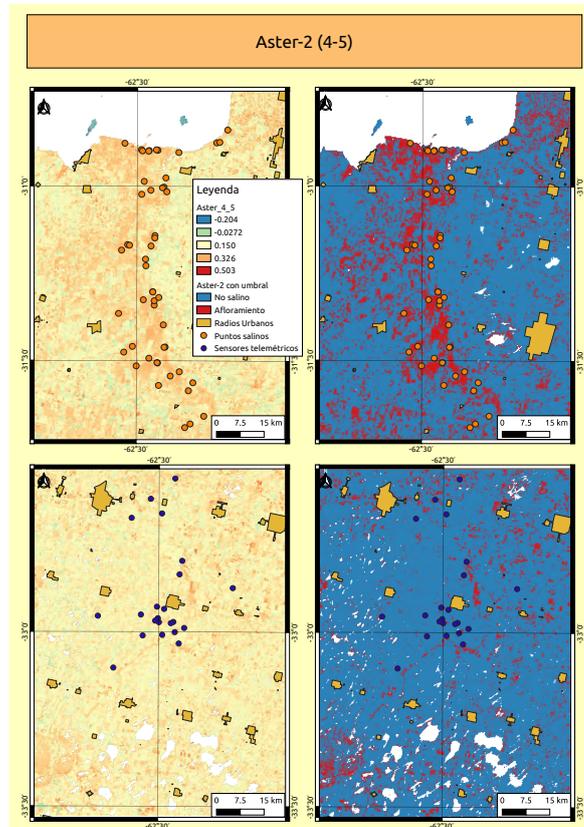


Figura C.11:  $Aster_2$  (izq.) y mapa con umbrales en inmediaciones de Mar Chiquita y área de estudio