

# “ANÁLISIS AMBIENTAL DE LA CUENCA DEL RÍO SALADO DE LA PROVINCIA DE SANTIAGO DEL ESTERO”

Por *Mariangel Arias Ferreyra*

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

**MAGÍSTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Septiembre, 2018

©IG - CONAE/UNC 2016

©FaMAF - UNC

Directora: ***Dra. Claudia Notarnicola***

Co-director: **Dr. Marcelo Scavuzzo**



Análisis ambiental de la Cuenca del Río Salado de la provincia de Santiago del Estero. Por: Mariangel Arias Ferreyra. Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



**PALABRAS CLAVES:** Cuenca, índice, degradación, teledetección, cambio de uso del suelo, territorio.

## **RESUMEN**

La Cuenca del Río Salado tiene importantes funciones tanto ambientales como humanas en la provincia de Santiago del Estero, y abarca gran parte del territorio provincial. Uno de los mayores impactos que ha venido sufriendo el territorio es la agricultura de gran escala e intensiva. En el presente trabajo se integran metodologías para un diagnóstico de carácter expeditivo a fin de tener una aproximación de los procesos que generan la degradación de la cuenca mediante herramientas de geoproceso.

Entre 1984 y 2014 se perdieron 1.310.660 has de bosques, con un promedio anual de 45.000 hectáreas. La integración de los datos ha sido realizada a través de índices de sensibilidad ambiental a la degradación, mediante el cruzamiento de mapas de distintas base de datos, para lo cual se definieron diferentes grados de sensibilidad relativa a factores de calidad del suelo, climáticos, de vegetación y de uso del suelo. Se exploraron los datos SAR – SCANSAR – Hige Region de Cosmo SkyMed para determinar los cuerpos de agua durante los meses de febrero a mayo del año 2014. En comparación con los datos ópticos, los datos SAR permitieron una adecuada discriminación entre las coberturas agua – superficie terrestre.

## **ABSTRACT**

The Rio Salado Basin has important environmental and human functions in the province of Santiago del Estero, and covers a large part of the provincial territory. Large scale and intensive agriculture is one of the greatest impacts that the territory has suffered. In the present work, methodologies for an expeditious diagnosis are integrated in order to have an approximation of the processes that generate the degradation of the basin through geoprocess tools.

Between 1984 and 2014, 1,310,660 hectares of forests were lost, with an annual average of 45,000 hectares. The integration of the data has been done through environmental sensitivity indexes to degradation, through the crossing of maps of different data bases, for which different degrees of sensitivity were defined relative to soil quality, climatic, vegetation and land use. The SAR - SCANSAR - Hige Region of Cosmo SkyMed data was explored to determine the bodies of water during the months of February to May of the year 2014. In comparison with the optical data, the SAR data allowed an adequate discrimination between the water - surface coverage land.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la casa de estudio MARIO GULICH por haberme permitido ser parte de esta maravillosa comunidad, me he sentido como en casa... A las instituciones que me brindaron la posibilidad de dar este paso tan importante en mi vida: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y la Agencia Espacial Italiana (ASI).*

*A Marcelo Scavuzzo, "mi querido profesor", el profe cuya calidez humana es incomparable, mil gracias por confiar en mí, por guiarme hasta el último momento. Llevaré en mi corazón por siempre tus chistes, tu calidez y tu bondad...*

*A mi directora Claudia Notarnicola por guiar mis pasos, por tu simpleza y por acompañarme en todos los aspectos durante mi estadía en Italia.*

*A mis compañer@s y herman@s MAREADOS-2012 gracias por estos maravillosos años de aventuras, gracias por enseñarme tanto, y sobre todo gracias por ser la familia que necesitábamos con Nico.*

*A mi hijo Nicolas, que una vez más me has acompañado en esta travesía para nada fácil... pero hoy estamos aquí. Gracias por tu incondicionalidad, nada hubiese sido posible sin tu compañía, sin tu amor.*

*A mi amada madre por no soltarme la mano.*

**Gracias!**

# INDICE GENERAL

	N° Pág.
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Fundamentación de la elección del tema de estudio.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Organización de la tesis.....	7
1.5. Caracterización general del área de estudio.....	8
1.5.1. Aspectos hidrológicos.....	10
1.5.1.1. Humedales presentes en la cuenca.....	12
1.5.2. Geomorfología.....	15
1.5.3. Suelos.....	17
1.5.4. Formaciones vegetales.....	20
1.5.5. Usos del suelo.....	23
1.5.6. Clima.....	24
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	25
2.1. INTRODUCCIÓN.....	25
2.2. OBJETIVOS ABORDADOS EN EL CAPÍTULO.....	26
2.3. MARCO TEÓRICO.....	26
2.3.1. La teledetección en el monitoreo terrestre.....	26
2.3.2. Las imágenes Landsat.....	27
2.3.2.1. Landsat-5.....	28
2.3.2.2. Landsat-8.....	29
2.3.3. Conceptos empleados en la metodología.....	30
2.3.3.1. Técnicas de detección de cambio.....	30
2.3.3.2. Requisitos previos para el análisis multitemporal.....	31
2.3.3.3. Clasificación digital.....	32
2.3.3.3.1. Fase de entrenamiento.....	33
2.3.3.3.2. Fase de asignación.....	33
2.3.3.3.3. Fase de verificación.....	34
2.3.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada.....	35
2.4. METODOLOGÍA.....	37
2.4.1. Procesamiento.....	38

2.4.1.1. Descarga de las imágenes Landsat.....	38
2.4.1.2. Verificación geométrica y homogeneización radiométrica.....	40
2.4.1.3. Eliminación del background.....	40
2.4.1.4. Eliminación de nubes y sombras.....	40
2.4.2. Procesamiento digital de las imágenes Landsat.....	41
2.4.2.1. Fase de entrenamiento.....	42
2.4.2.2. Fase de asignación.....	43
2.4.2.3. Fase de verificación.....	44
2.4.3. Mapas temáticos para la detección de cambios.....	45
2.4.3.1. Mapas temáticos de deforestación.....	45
2.4.3.2. Mapas temáticos de uso agrícola – Detección de cambios.....	45
2.4.3.3. Mapa temático de NDVI.....	46
2.5. RESULTADOS.....	48
2.5.1. Deforestación en la Cuenca del Salado.....	48
2.5.2. Uso del suelo: Desmonte para agricultura.....	51
2.5.3. Mapa del índice de NDVI.....	53
2.6. DISCUSIONES.....	56
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	59
3.1. INTRODUCCIÓN.....	59
3.2. OBJETIVOS ABORDADOS EN EL CAPÍTULO.....	60
3.3. MARCO TEÓRICO.....	60
3.3.1. Los SIG en el análisis ambiental.....	60
3.3.2. El análisis de la degradación como forma de abordar la C. Amb.....	63
3.3.3. Indicadores como instrumentos de medición ambiental.....	64
3.3.4. Indicadores claves para la evaluación de la calidad ambiental.....	66
3.4. METODOLOGÍA.....	68
3.4.1. Índice de Sensibilidad a la Degradación (ISD).....	69
3.4.2. Índice de Sitios Prioritarios de Conservación (ISPC).....	73
3.4.3. Procesamiento metodológico utilizada en los indicadores.....	74
3.4.3.1. Indicadores del ISD.....	74
3.4.3.1. a) Indicadores de la Calidad del Suelo.....	74
3.4.3.1. b) Indicadores de la Calidad del Clima.....	75
3.4.3.1. c) Indicadores de la Calidad de la vegetación.....	80
3.4.3.1. b) Indicadores de la Calidad de manejo.....	81

3.4.3.2. Indicadores del ISPC.....	81
3.5. RESULTADOS.....	84
3.5.1. Índice de Sensibilidad a la Degradación (ISD).....	84
3.5.2. Índice “Sitios prioritarios de conservación” (ISPC).....	89
3.6. DISCUSIONES.....	93
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	96
4.1. INTRODUCCIÓN.....	96
4.2. Objetivos abordados en el capítulo.....	97
4.3. MARCO TEÓRICO.....	97
4.3.1. Los sistemas RADAR: propiedades de las imágenes.....	97
4.3.2. Radar de Apertura Sintética – SAR.....	100
4.3.3. COSMO-SkyMed.....	103
4.4. METODOLOGÍA.....	105
4.4.1. Características de las imágenes utilizadas.....	105
4.4.2. Procesamiento de las imágenes COSMO SkyMed.....	106
4.5. RESULTADOS.....	113
4.5.1. Comparación de los datos SAR y ópticos Landsat.....	114
4.5.2. Análisis de los cuerpos de agua en las imágenes Radar.....	115
4.5.3. Análisis de la imagen Sur del mes de febrero.....	117
4.6. DISCUSIONES.....	122
<b>CAPITULO 5</b> .....	124

## INDICE DE FIGURAS

	N° Pág.
1.1. Ubicación de la Cuenca del Río Salado.....	8
1.2. Área de Estudio.....	9
1.3. Mapa de cursos artificiales – canales de riego en la Cuenca del Río Salado.....	10
1.4. Paleocauces dentro de la Cuenca del Río Salado.....	11
1.5. Humedales presentes en la Cuenca del río Salado.....	14
1.6. Subunidades geomorfológicas de la Cuenca del Río Salado.....	16
1.7. Clasificación de suelos en la Cuenca del Río Salado.....	19
2.1. Espectro electromagnético.....	27
2.2. Comportamiento de la vegetación en la región del visible.....	36
2.3. Diagrama metodológico.....	37
2.4. Sitio de descarga de imágenes LANDSAT USGS – Earth Explorer.....	38
2.5. Path/Row de imágenes LANDSAT, comunes para los sensores TM y OLI.....	39
2.6. Aplicación del método de Kong.....	41
2.7. Diagrama explicativo de las fases de clasificación.....	42
2.8. Ejemplo del procedimiento para la efectividad de las muestras.....	43
2.9. Ejemplo del uso del clasificador de Máxima verosimilitud en ENVI.....	44
2.10. Detección de umbrales de NDVI, mediante curvas de nivel vectoriales.....	47
2.11. Superficies boscosas correspondientes a cada año.....	49
2.12. Mapas de las coberturas boscosas de los años: 1984, 1990, 2000, 2010 y 2014.....	50
2.13. Cambio de uso del suelo. Cultivos durante el período 1984-2014.....	51
2.14. Proporciones de las superficies cultivadas entre 1984 y 2014.....	52
2.15. Secuencia de imágenes que muestran la persistencia de las áreas quemadas.....	53
2.16. Tipos de coberturas asociadas al nivel de verdor (NDVI).....	54
2.17. Desmontes en regiones cuyos valores de NDVI son mayores.....	55
3.1. Representación del modelo vectorial: puntos, líneas y polígonos.....	61
3.2. Representación, vectorial (a) y ráster (b).....	61
3.3. Capas temáticas, división vertical de un SIG.....	62
3.4. Band Math. Índice de calidad del suelo.....	75
3.5. Banda de frecuencia de inundaciones.....	76
3.6. Mapa resultante del proceso de interpolación de bandas TRMM.....	77
3.7. Mosaico DEM – SRTM 30 m. Cuenca del Río Salado.....	78



3.8. Índice de aridez de Martone.....	79
3.9. Resultado del producto Red de drenaje.....	83
3.10. Mapas de los indicadores confeccionados para determinar el índice ISA.....	85
3.11. Cartografía de los índices de calidad parciales para el suelo, el clima y la vegetación...	86
3.12. Mapa de sensibilidad a la degradación medioambiental.....	87
3.13. Proporciones de los resultados de las superficies ISA.....	88
3.14. Mapa del índice ISPC.....	90
3.15. Sistema de drenaje.....	92
4.1. Funcionamiento de la señal de los sistemas activos de radar.....	97
4.2. Magnitudes del coeficiente de Backscattering y la distribución de sus datos.....	98
4.3. Diferentes formas de polarizaciones.....	99
4.4. Ejemplo de un histograma de una imagen COSMO-SkyMed.....	100
4.5 Ejemplo de la geometría de vuelo de un SAR.....	102
4.6. Modo de adquisición COSMO SkyMed.....	103
4.7. Cobertura de las imágenes Huge Region, modo ScanSAR.....	105
4.8. Esquema del Proceso metodológico utilizado.....	107
4.9. Calibración de las imágenes con el Software SANP.....	108
4.10. Aplicación del filtro “Refined Lee”.....	109
4.11. Conversión a dB mediante el módulo Band Math.....	109
4.12. Extracción del background.....	110
4.13. Procedimiento para la detección de cuerpos de agua.....	112
4.14. Resultados de una imagen calibrada. Conversión de potencia a $\sigma^0$ .....	113
4.15. Aplicación del filtro Lee.....	114
4.16. Comparación entre una imagen Landsat y Radar.....	114
4.17. Comparación de los valores de reflectancia en dB. Valores “agua” y “tierra”.....	115
4.18. Visualización de un cuerpo de agua en una imagen radar y en una imagen óptica.....	115
4.19. Mapas de cuerpos de agua presentes durante los meses febrero.....	116
4.20. Primer recuadro: Mapa ilustrativo de las órbitas descendentes y ascendentes.....	117
4.21. Cuerpos de agua en el Sureste de la provincia de Santiago del Estero.....	119
4.22. Frecuencia de anegamientos.....	120
4.23. Interpretación y comparación de las áreas anegadas en las imágenes SAR.....	121

## INDICE DE TABLAS

	N° Pág.
1.1. Campaña agrícola 2013-2014. Cultivos extensivos de verano.....	23
1.2. Campaña agrícola 2014. Cultivos extensivos de invierno.....	24
2.1. Información general del satélite LANDSAT-5.....	28
2.2. Información general del satélite LANDSAT-8.....	30
2.3. Matriz de confusión.....	34
2.4. Bandas intervinientes en la clasificación digital de imágenes Landsat.....	43
2.5. Período del mapa de detección de cambios.....	46
2.6. Deforestación – período 1984-2014.....	48
3.1. Clases y pesos asignados al cálculo del Índice ISD.....	71
3.2. Características de las fuentes utilizadas en la confección del índice ISD.....	72
3.3. Clases y pesos asignados al índice de sitios prioritarios de conservación.....	73
3.4. Características de las fuentes utilizadas en la confección del índice ISPC.....	74
3.5. Criterios utilizados en base a los períodos de tiempo.....	81
4.1. Características generales de las imágenes Scan SAR / Huga Region – COSMO SkyMed..	105
4.2. Nominación de las imágenes SAR COSMO SKYMed utilizados.....	106

# CAPÍTULO 1

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La vida cambia y ha cambiado mucho desde sus orígenes. Nuestro planeta tiene una historia demasiado agitada en cuanto a evolución. Los ambientes evolucionan cuando las perturbaciones se dan de manera natural, o cambian por acción antrópica. La historia y los estudios de las actividades humanas en los ambientes, arrollan y enmascaran a los procesos naturales debido a su mayor frecuencia y por ende su intensidad (Forman & Collinge, 1997). Con el auge de la revolución industrial, se han desencadenado a escala global profundos cambios en los sistemas naturales. FAO (2012); Cabido & Zak (2010); Carr *et al.* (2008); Ramankutty *et al.* (2008); Geist & Lambin (2002), indican que la agricultura a gran escala es una de las principales causas que ha generado y genera las mayores tasas de cambio en el uso del suelo sobre los sistemas naturales para la demanda mundial de alimentos. La evolución del agro en América Latina responde a la transformación de la economía mundial de fines del siglo XX como parte integral del proyecto de globalización, impulsada con la denominada “Revolución Verde” (Preda, 2010). En Argentina, este proceso se hizo visible más profusamente con la apertura comercial y la desregulación del Estado en la década de los 1990 (Bisang y Gutman, 2003); tal es así, que se instala en el país un nuevo modelo agrario, cuyo paquete innovador consistió en siembra directa y semillas de alto rendimiento sobre amplias regiones del país, forzando una adaptación mediante biotecnología, fertilizantes, agroquímicos, y maquinaria de última generación (Reboratti, 2011; Azcuy Ameghino, 2008). Esta actividad ha generado un incremento tan notorio en las divisas al país que ha ocasionado, dentro de la pampa húmeda el desplazamiento del uso tradicional del suelo (Reboratti, 2007); y la expansión de la frontera agrícola hacia otros horizontes, como lo es la región Chaqueña. De ésta manera, se ha impuesto una “pampeanización” en el norte argentino sin tener en cuenta las características ambientales, principalmente climáticas y edafológicas de dicha región (Salizzi, 2013).

El Chaco Argentino, representa la región forestal de mayor extensión del país. Dentro de la fitogeografía que caracteriza al Gran Chaco, se encuentra el Distrito Chaqueño Occidental (Chaco Semiárido), que integra completamente a la provincia de Santiago del Estero, reuniendo la mayor superficie boscosa del Norte Argentino (REDAF, 1999; UMSEF, 2005; Cabrera, 1976); comprendiendo una de las pocas áreas del mundo en donde la transición de

los trópicos hacia las zonas templadas no consiste en ambientes de desierto, sino que se encuentran formadas por esplendorosos bosques semiáridos y sabanas de alta complejidad (Morello & Adámoli, 1968).

Históricamente, el territorio provincial ha sobrellevado diferentes procesos de utilización del suelo, definidos como “pulsos de ocupación humana” (Morello *et al.*, 2012), comprendidos en: etnias locales, fronterizos y meleros, puestos ganaderos, durmiente y postes, primera taninera, colonia algodонера, exploración y explotación petrolera, agriculturización, segunda taninera, y pampeanización. Estos diez pulsos antrópicos han tenido diferentes impactos, desde el punto de vista de los reemplazos ecosistémicos: la de “puestos ganaderos” ha consolidado uno de los cambios de estado sucesionales más importante como la arbustización de pastizales. La etapa de “durmientes y postes” y “taninera” presionaron los bosques de maderas duras, cambiando las pirámides de edades de las especies demandadas, en este caso el quebracho blanco que constituye la especie climática. En la etapa petrolera se diseñaron corredores de usos múltiples y se contribuyó a la expansión de la cosecha en áreas vírgenes. La “colonia algodонера” fue un lento proceso de creación de pequeñas celdas de paisajes de 10 a 20 ha. La “agriculturización” fue una etapa corta (1975-1995) con cambios tecnológicos, de tamaño de unidad productiva y de diseño de paisaje rural que preanunciaron la llegada de la “sojización” y la “ganaderización” del monte, donde la soja no entra.

Por último, la “pampeanización” es decir la imposición del modelo industrial agrícola pampeano en la Ecorregión, es el modelo actual y quizás uno de los más intensivos en cuanto a la transformación del paisaje rural.

## **La influencia del cambio de cobertura y uso del suelo en ambientes de cuenca hídricas**

Una cuenca hidrográfica responde a la visión de sistema, de unidad territorial y física, cuyo tratamiento integrado permite la planificación y gestión del territorio, determinada por un río principal, sus afluentes y por un área colectora de las aguas cuyo drenaje es de carácter natural. En ella se puede representar fácilmente la noción de sistemas de funcionalidades entre un conjunto natural (agua, suelo, flora y fauna) y las actividades humanas, cuya modificación se deben a las interacciones de los subsistemas sociales y económicos que intervienen (Gaspari et al. 2009; Dunne y Leopold, 1978). El enfoque integral y conocimiento sistémico de una cuenca tiene su importancia a la hora de proyectar un uso sustentable de carácter regional, así como también el impacto ambiental que generan las actividades humanas (Bruno, 2000).

La vegetación cumple una función imprescindible en los ambientes de cuenca, una de la más importante es la función protectora para la estabilidad estructural del suelo, aumentando la capacidad de infiltración, retardando el flujo superficial, limitando su escurrimiento (López Cadenas del Llano, 1998; Linsley *et al.*, 1993); amortiguando la fuerza del viento y previniendo la erosión eólica e hídrica. Un suelo descubierto acelera la escorrentía, incrementa la evaporación local por aumentar la transferencia de calor hacia el suelo (Matteucci & Colma, 1997).

Es reconocido que los cambios de cobertura y uso del suelo son una de las principales causas del deterioro ambiental, favoreciendo la degradación del suelo, la disminución de la biodiversidad, afectando la fragilidad de los sistemas ambientales y por ende la pérdida de territorio de cuenca (Guichón *et al.*, 1999; Dunne y Leopold, 1978).

En la provincia de Santiago del Estero, la Cuenca del Río Salado abarca gran parte del territorio provincial y forma parte de la gran Cuenca del Plata. Su escaso relieve, hace que los suelos se asocien a ambientes de interfluvios, antiguos paleocauces y de disturbios, determinando las heterogeneidades en la vegetación (Hueck, 1978). Su lecho poco profundo forma esteros, bañados y lagunas, y una diversidad de ambientes importantes, cumpliendo con funciones vitales, ya sea almacenando agua, recargando aguas subterráneas, mejorando su calidad al actuar como filtros, y proporcionando un gran número de hábitats para la fauna (Steven & Toner, 2004).

Santiago del Estero, fue y sigue siendo uno de los territorios más afectados por la pérdida de bosque nativo resultado de la expansión de monocultivos agrícolas (FAUBA, 2016; SAyDS, 2009; Zerda & Moreira, 2006). Según Volante *et al.* (2005), los cultivos como la soja, tuvieron un aumento del tipo exponencial y una prevalencia en las áreas cultivadas de la provincia, principalmente en los departamentos del Este (Moreno, Ibarra y Gral. Taboada). Santiago del Estero, junto a la provincia de Salta, representaron los mayores incrementos de áreas cultivadas del NOA durante la década del 2000; éstas altas tendencias continuaron para el año 2014 (INTA- PRORENOA, 2015).

Cuando las características de los ambientes es de semiaridéz determinadas por las bajas precipitaciones, procesos como la agricultura intensiva generan consecuencias negativas al producir desequilibrios en los balances hídricos y energéticos de los ecosistemas (Boletta *et al.* 2006; Boletta, 2001). La velocidad e intensidad con que se desarrollan los cambios de coberturas y uso del suelo requieren de información eficiente, precisa y rápida, en un contexto que posibilite su monitoreo e integración de los datos en ambientes tan extensos como las cuencas hidrográficas. En este contexto, los sensores remotos representan una alternativa eficaz y económicamente viable, de cobertura global y exhaustiva, con observación multiescala y multitemporal (Sacristan, 2006; Chen, 2002; Chuvieco, 2002). Disponer de información digital de la superficie terrestre, permite disponer de estudios temporales en el ámbito hidrológico, lo que supone un aspecto clave para las tareas de gestión y planificación hidrológica (Pérez y García, 2006).

## **1.2. FUNDAMENTACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA DE ESTUDIO**

Las actividades humanas interfieren en la evolución natural de los ambientes de cuencas, provocando cambios en las interrelaciones de sus componentes, y modificando su equilibrio original. Las cuencas hidrográficas son entidades vivientes, por lo tanto la gestión de los recursos naturales debe ser evaluada de manera integral para inducir a políticas sostenibles. Es necesario abarcar estudios de índoles holísticos, brindando información de las evoluciones que producen los cambios en las coberturas y usos del suelo en el espacio temporal, como potencial aporte al ordenamiento territorial de las cuencas.

La información existente de la cuenca del Río Salado es escasa y fragmentada, y en muchos casos antigua. El hecho de tener la posibilidad de integrar información mediante técnicas de teledetección, permitirá avanzar en generar y confluir información en ambientes tan extensos, diversos y complejos como lo son las cuencas hidrográficas. Para ello es fundamental tener una aproximación integral de la misma, y monitorear su evolución en el tiempo. En este sentido, se orienta a una búsqueda de metodologías expeditivas y confiables que aporten a la detección de alertas tempranas a las emergencias en la Cuenca del Río Salado.

### **1.3. OBJETIVOS**

En el presente trabajo, el objetivo principal se orienta a realizar un análisis ambiental de la cuenca del Río Salado, ubicado en la provincia de Santiago del Estero, mediante la integración de datos satelitales.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar espacial y temporalmente los cambios de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Salado de la provincia de Santiago del Estero, entre las décadas de 1980 y 2014.
- Analizar la calidad ambiental de la cuenca del Río Salado, mediante el desarrollo y la aplicación de indicadores ambientales a través de Sistemas de Información geográfica.
- Detectar los cuerpos de agua presentes en la cuenca del río Salado con datos SCANSAR - Hugel Región de Cosmo SkyMed, durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo del año 2014.



## 1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el **capítulo 1**, se describen los rasgos ambientales más sobresalientes de la cuenca del río Salado. En el capítulo 2, se presentan los cambios relacionados a la pérdida de bosque nativo desde la década de 1980 hasta el año 2014. En el **capítulo 3** se analiza la calidad de la cuenca por medio de dos índices ambientales, el índice de Sensibilidad a la Degradación (ISD) y el Índice de Sitios Prioritarios de Conservación. El **capítulo 3** aborda la identificación de los cuerpos de agua con imágenes RADAR - COSMO SkyMed. Por último, en el **capítulo 5**, se analizan distintos aportes del trabajo en el área de estudio, conclusiones y recomendaciones respectivamente.

## 1.5. CARACTERIAZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

El complejo hídrico Cuenca del Plata se abre en forma de abanico a partir de la desembocadura, y se despliega dentro de la jurisdicción de cinco países: Brasil, Bolivia, Uruguay, Paraguay y Argentina, conformando así una de las cuencas más extensas del mundo. Allí se encuentra la denominada Cuenca del Río Pasaje o Juramento, enmarcada dentro del Sistema Río Paraná, de la cual se desprende el territorio objeto de estudio en la provincia de Santiago del Estero, denominada Cuenca del Río Salado o Subcuenca del Río Salado (Figura 1.1).



Figura 1.1. Ubicación de la Cuenca del Río Salado en el Sistema Cuenca del Plata – Cuenca del Río Pasaje o Juramento.

Fuente: Vectores extraídos del Atlas de cuencas y regiones hídricas superficiales de la República Argentina (2011)

En Argentina, la Cuenca del Río Salado, nace en las estribaciones orientales de los Andes Salta-Catamarca, más precisamente en las altas sierras occidentales del borde de la Puna, por lo que su régimen presenta crecientes estivales provocadas por las lluvias en su alta cuenca. A medida que transita por su largo trayecto pasa de la región cordillerana hacia la región Chaqueña para finalmente desembocar en la región Pampeana. De acuerdo al lugar donde se encuentre transitando el río, va tomando diferentes nombres. En la provincia de Santiago del Estero se lo conoce como Salado o Cachimayo, significado quechua: kachi “sal”, y mayu “río”, nombre que se le atribuye debido a su gran concentración salina.

La Cuenca del Río Salado es una vasta planicie sedimentaria de suave pendiente moldeada por la acción del río Salado que la atraviesa en sentido Noroeste-Sudeste, de carácter

alóctono, es decir que no recibe afluentes en su recorrido (Burkart et al., 1999). Posee una superficie de 47.544 km<sup>2</sup> (4.754.400 has) (Figura 1.2).

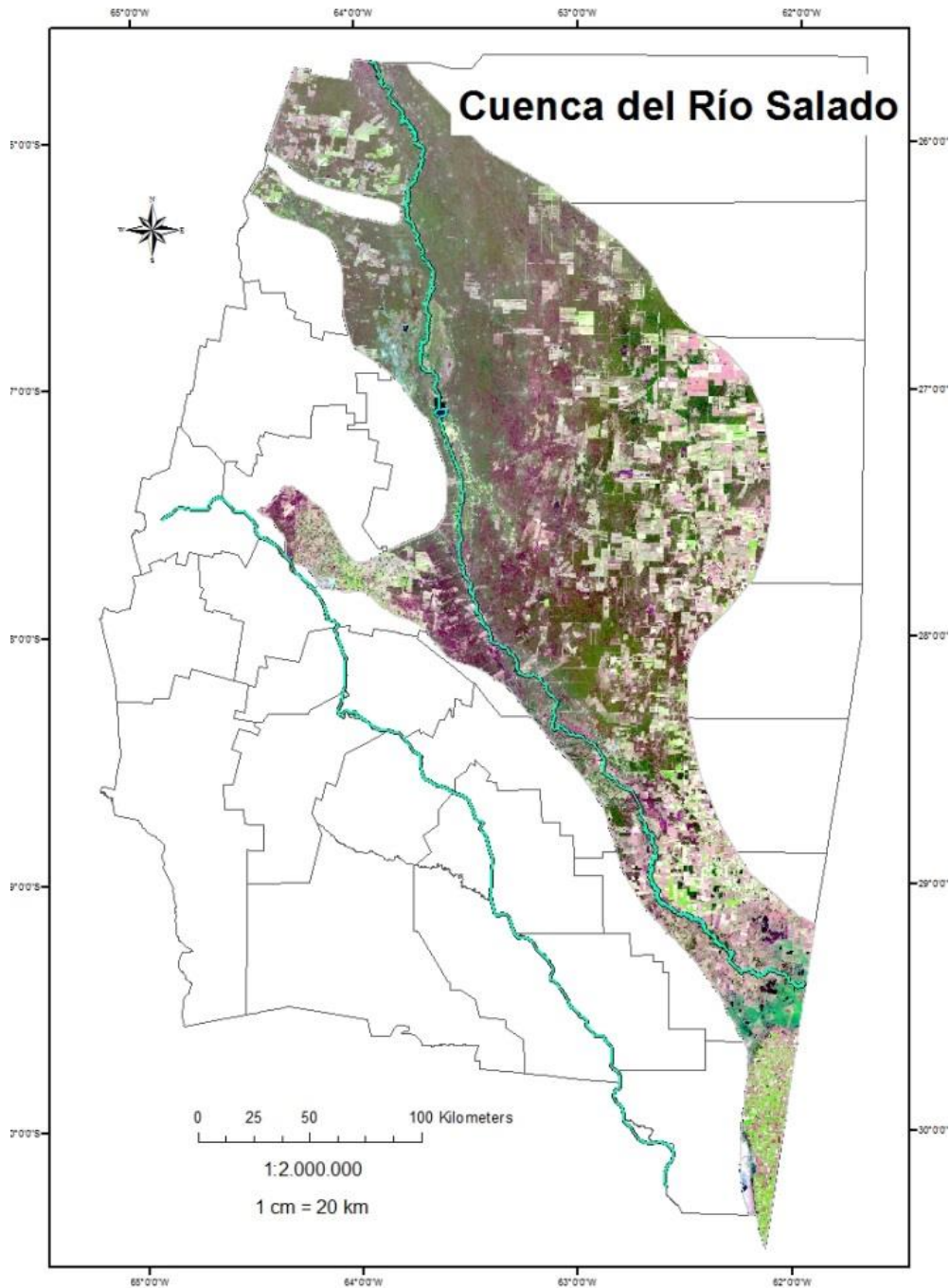


Figura 1.2. Área de Estudio, mosaico Cuenca del Río Salado. LANDSAT 8 (año 2014).  
Elaboración propia. Sitio de descarga en: [<https://earthexplorer.usgs.gov/>]

### 1.5.1. ASPECTOS HIDROLÓGICOS

El caudal de agua que ingresa a las jurisdicciones de la provincia de Santiago del Estero es regulado por las políticas de uso de la provincia de Salta, interceptados por el embalse General Belgrano de Cabra Corral, y por la presa El Tunal. Artificialmente el cauce del río es derivado hacia el Este y Sudeste de la provincia por medio de los canales de riego (figura 1.3), principalmente en los departamentos Copo, Alberdi y Moreno; cuyo caudal se destina para el abastecimiento de las poblaciones, el abreviamiento de los animales, riego, etc. (Basán Nickisch, 2005; Bacchiega, 2003).

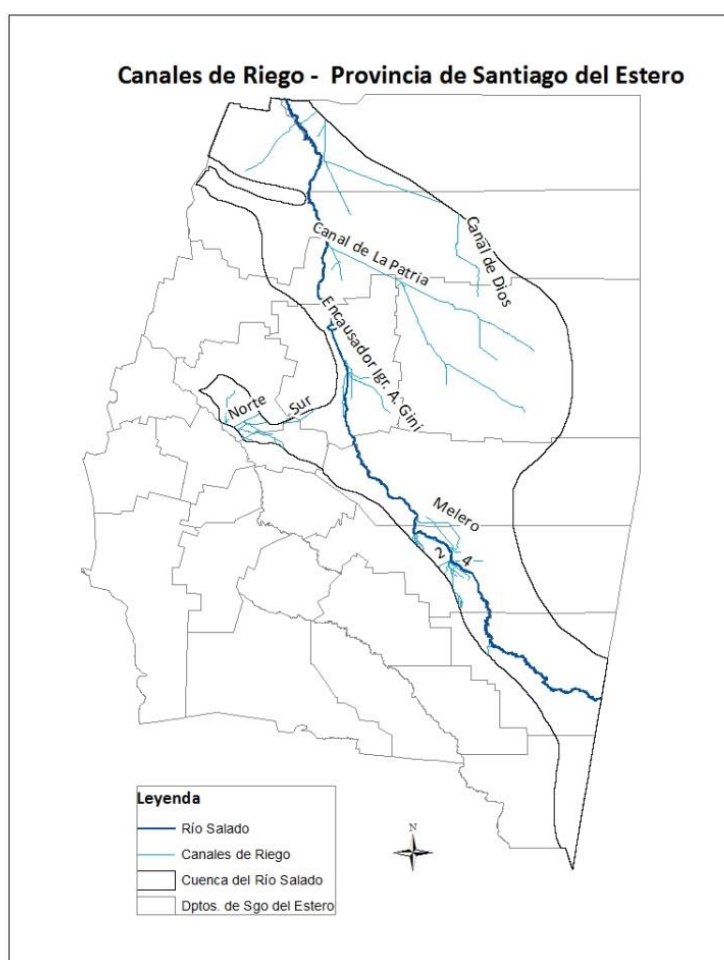


Figura 1.3. Mapa de cursos artificiales – canales de riego en la Cuenca del Río Salado. Elaboración propia. Fuente: Vectores extraídos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) [<http://www.ign.gob.ar/sig>]

En la cuenca, existe una importante llanura aluvial donde el río ha divagado en la dirección de un escurrimiento superficial con sentido NE hacia SE, dejando a su paso paleocauces con orientación NO-SE (figura 1.4). Los paleocauces se han originado debido a los cambios de curso del río Salado en su historia geológica, buscando una mayor pendiente. Es decir que

durante su paso por la llanura, transporta gran cantidad de sedimentos, formando albardones a los costados del cauce, colmatando y dando origen a la divagación del río que forman con el tiempo verdaderos abanicos o paleocauces fluviales arenosos con una cobertura vegetal, generalmente dominado por pastizales de aibe (*Elionurus sp*) que atraviesa la matriz boscosa característica de la región (Torrella & Adamoli, 2005). La estratificación de aguas de diferentes contenidos salinos es un fenómeno característico de esta región.

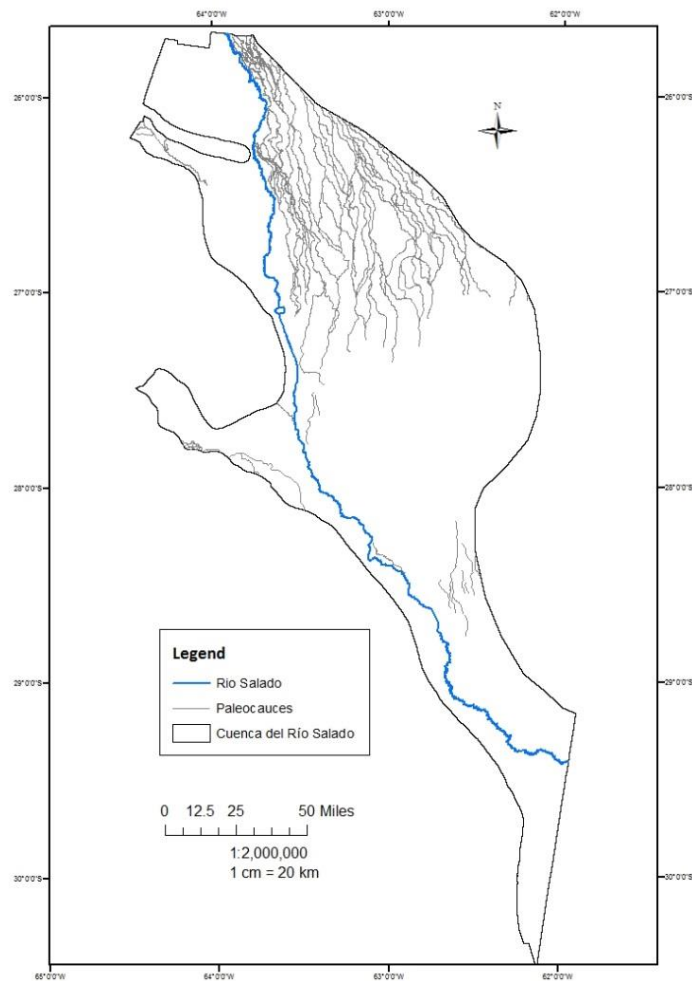


Figura 1.4. Paleocauces dentro de la Cuenca del Río Salado.  
Elaboración propia. Fuente: Vectores extraídos del Ministerio del Agua y Medio Ambiente – Santiago del Estero [<http://www.sde.gob.ar:84/secAgua/sda.html>]

### 1.5.1.1. HUMEDALES PRESENTES EN LA CUENCA

A medida que transita el río Salado por el territorio, va dejando una serie de humedales a su paso, resultado de su cauce muy explayado y poco profundo. Entre los humedales se destacan, esteros, meandros, bañados y zonas inundables muy variables, de acuerdo a la época del año.

En la figura 1.5, se muestran las distribuciones dentro de los límites de la cuenca del Salado. A continuación se describen cada uno de ellos:

- **Los ambientes de bañados**, ubicados en el Norte de la provincia, originados por el desborde del Río Salado, son de carácter permanentes y temporarios.

- **Ambientes de salinas o salitrales**, son suelos que se inundan regularmente sobre amplias superficies de suelos pesados con una lámina de agua delgada que se seca en poco tiempo porque la estación lluviosa coincide con las altas temperaturas estivales y con valores de evaporación muy altos. En estos suelos mal drenados se deposita una lámina discontinua de sales que se fragmenta en manchones por dos motivos, al secarse después de cada lluvia o por la presencia de arbustos sobre montículos de suculentas halófilas como el jume, los jumecillos y cachiyuyos (Morello *et al.*, 2012).

- **Bajos Submeridionales**, se extienden por las provincias de Santa Fe, Santiago del Estero y Chaco, en una extensión de 3,3 millones de hectáreas. Dentro del área de estudio, apenas abarca una porción hacia el Sudeste, en el dpto. Juan F. Ibarra. Este ambiente se caracteriza por la escasez de árboles y la presencia de lagunas no permanentes y esteros vegetados, generalmente ocupados por juncos y totoras de gran importancia para la concentración y nidificación de aves acuáticas (FVSA y FUNDAPAZ, 2007).

A su vez, se distinguen tres importantes humedales, cuyos ecosistemas se consideran con altos valores para la conservación de las aves, denominados Sitios AICA's (Programa de las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves) [<http://avesargentinas.com.ar.elsever.com/AICAS/home.html>] (Anexo 1):

- **Bañados de Figueroa**, territorialmente abarca parte de los departamentos Figueroa, Jiménez y Alberdi. El tipo de hábitat lo constituye una zona de humedal, sabana, pastizal y estepa arbustiva. Se desarrollan sobre una llanura de sedimentos finos, condicionado por los

constantes desbordes del río Salado. El agua se desparrama entre densos totorales y pajonales, con vegetación arbustiva halófila. La vegetación del entorno inmediato es el bosque chaqueño empobrecido por las fluctuaciones del bañado. El área ha sido declarada “Reserva Provincial de Uso Múltiple”, sin reglamentación vigente. En cuanto a la importancia ornitológica constituye un área importante para la reproducción y concentración de aves acuáticas chaqueñas, pampeanas y sitio de concentración de migratorias patagónicas, neárticas y hasta altoandinas. Presenta poblaciones estables e importantes de paseriformes palustres considerados amenazadas; y poblaciones reproductivas de patos como el picazo (*Netta peposaca*), (Moschione, 2007).

- **Bañados de Añatuya**, surge del anegamiento del cauce principal y los desbordes del río Salado. De comportamiento estacional y vegetación dominada por totoras (*Typha*) junto a otras acuáticas palustres, dejando lugares de aguas libres más profundas o en bañados de extensión fluctuante. Dicha área fue declarada reserva provincial de uso múltiple en el año 1997 por la ley 6.381, sin reglamentación vigente, por lo que sus límites no son precisos. La función que cumplen estos bañados a nivel regional es muy interesante, especialmente en la reproducción para especies Anseriformes y Ardeiformes. También se encuentran presentes individuos de pato cabeza negra (*Heteronetta atricapilla*). Además, representa un área de invernada para algunas especies pampeanas y patagónicas (Moschione, 2007).

- **Bañados del Río Dulce**, se ubica en el sureste de la provincia, y en el extremo suroeste de la cuenca del Río Salado. Este humedal forma parte de la Laguna de Mar Chiquita ubicada en su mayor extensión en la provincia de Córdoba, considerada de mayor importancia regional por el número de especies e individuos de aves acuáticas tanto residentes como migratorias. La gran superficie de bañados en Santiago del Estero mantiene una gran cantidad de aves acuáticas, ya que muchas especies son más numerosas en los bañados de Santiago del Estero que en la laguna de Mar Chiquita.

Es un humedal alimentado por el río Dulce, generando una serie de lagunas con juncales (*Scirpus spp.*), espartillares (*Spartina spp.*) y jumes (*Heterostachys sp.*, *Allenrolfea sp.*); totorales (*Typha latifolia*) e inundando pastizales de *Echinochloa helodes*, pastos amargos (*Elionurus sp.*) y pastos salados bajos (*Distichlis spicata*), que alternan con isletas de bosque de vinalares (*Prosopis ruscifolia*) y chañares (*Geoffroea decorticans*) que frecuentemente también son anegados (Torres & Michelutti, 2007).

Especies como el flamenco (*Phoenicopterus chilensis*; *P. andinus*; *P. jamesi*) constituyen las especies de importancia del humedal. En general, es un humedal vasto que ofrece amplias superficies de hábitat aptas para la concentración, alimentación y nidificación de muchas aves.

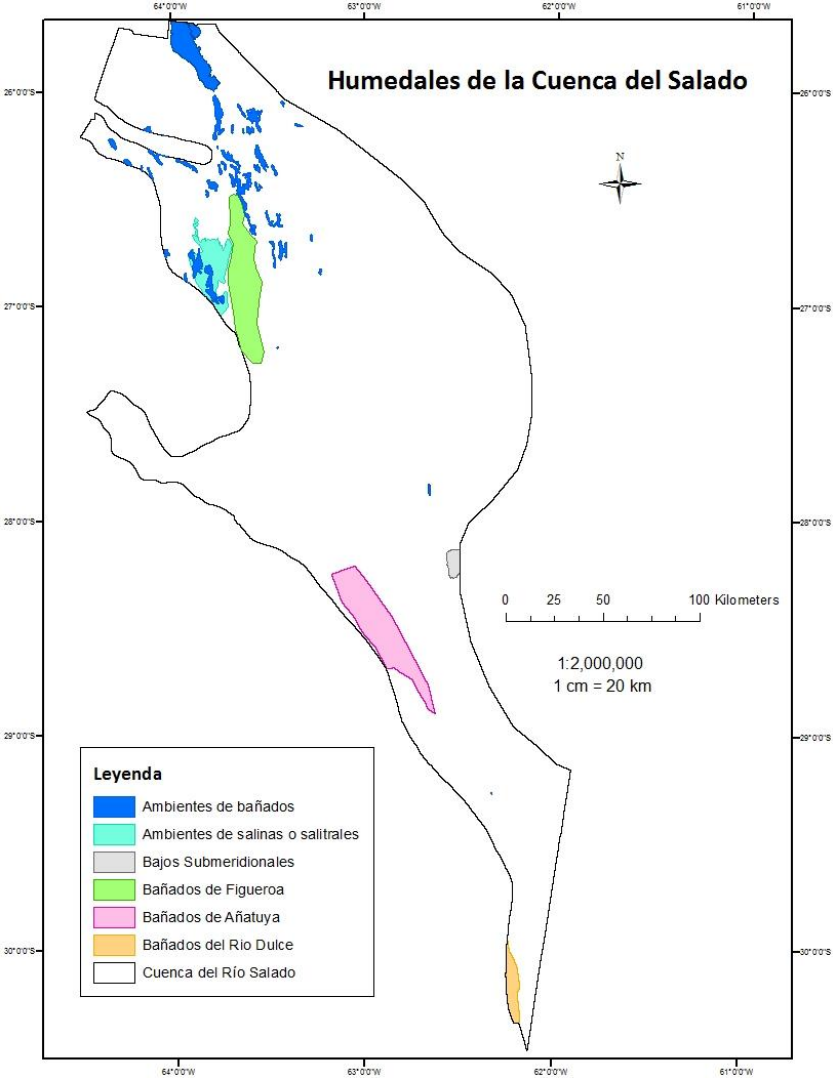


Figura 1.5. Humedales presentes en la Cuenca del río Salado. Elaboración propia. Fuente: Vectores extraídos de IGN [<http://www.ign.gob.ar/sig>]; y Sitios AICA's [<http://avesargentinas.com.ar.elsevier.com/AICAS/home.html>]



## 1.5.2. GEOMORFOLOGÍA

La Cuenca del río Salado se ubica sobre la llanura aluvial del río Salado, en el área de estudio se encuentran distintas subunidades geomorfológicas como se presenta en la figura 1.6.

- ***Paleoabanico Aluvial (Spa)***: Esta unidad forma parte de un gran abanico aluvial cuyo ápice se encontraría en las elevaciones Salto-Jujeñas. Con una pendiente promedio de 0.06% casi su totalidad se encuentra surcada por numerosos cauces divergentes. Estos paleocauces dan idea de que a lo largo del Cuaternario han ido divagando y originando el desplazamiento del paleo Río Salado por la Llanura Chaco-Santiagueña. Los sedimentos del sector de la planicie son arcillas y limos de coloración roja o pardoclaro. Intercalados en estos depósitos se disponen los antiguos cauces de agua, entrecruzados. Los paleocauces actualmente colmatados por una sedimentación más fina, se caracterizan por poseer una vegetación más activa.

- ***Áreas de deflación eólica (Saa)***

Son áreas que al permanecer anegadas por períodos prolongados son fácilmente reactivadas como áreas de deflación (transportados por el viento) durante períodos de sequía.

- ***Bajada proximal (Ppp)***: Los cursos de agua que descendieron por su pendiente oriental, con orientación variante N y S, formaron abanicos aluviales amplios de gran extensión horizontal y pendiente suave.

- ***Áreas de derrames (Sad)***: Son vías de escape del río a través del albardón exterior de la Llanura Aluvial actual. El endicamiento del agua, debido a la formación de obstrucción durante las crecidas, sedimentos, restos vegetales arrastrados y acumulados, provocan la ruptura del albardón y la formación de zonas inundadas por fuera de la Llanura aluvial actual. Son bañados que permanecen con agua aún en años que no reciben aporte durante el estiaje.

- ***Llanura de inundación activa (Sla)***: Se ubica a lo largo del Río Salado, su ancho es variable condicionado por los elementos topográficos dominantes o controles estructurales que endican el escurrimiento subterráneo produciendo bañados. Este río muestra un desarrollo meandroso con albardones de ancho variado, ubicado sobre ambos márgenes.

- ***Llanura de inundación temporariamente activa (Slt)***: Se distribuyen preferentemente sobre el Paleoabanico Aluvial, con una dirección N/S dominante. Se han desarrollado sobre paleocauces que por acción del flujo areal laminar adquirieron mayor desarrollo superficial.

- **Depresión de las Salinas (Sds):** Constituye un área baja, con progresiva colmatación de drenaje anárquico, en donde se encuentran numerosas salinas y cuerpos de agua.
- **Planicie residual (Rpr):** Se extiende en el borde oriental de la provincia de Santiago del Estero, encontrándose su mayor expresión en la provincia de Santa Fe. Se recorren tres tramos: el sector Septentrional que se dispone desde Sachayoj hasta Quimilí; el sector Central entre las Lagunas Saladas; y el valle del Río Salado por el Sur.
- **Llanura de inundación activa (Dia):** Presenta un desarrollo más marcado y un fondo plano, por el que los cursos cambian frecuentemente.
- **Paleollanura de inundación (Río Salado) (Spl):** En el Norte de la provincia se extiende una delgada faja sobre la margen izquierda del Río Salado, controlando su desplazamiento al Oeste por la presencia de la Bajada del S. Subandino-Pampeano.

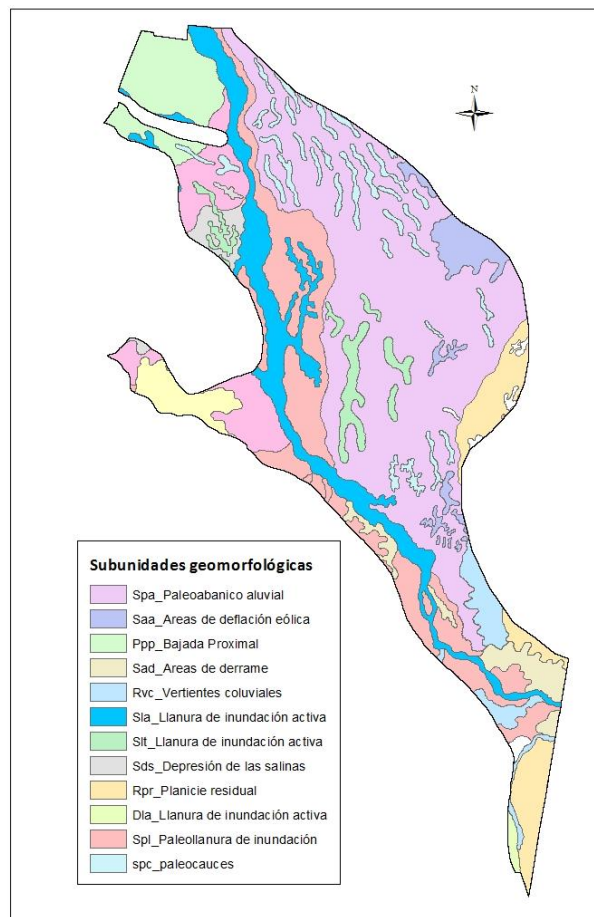


Figura 1.6. Subunidades geomorfológicas de la Cuenca del Río Salado.  
Fuente: Vectores extraídos de IGN (Instituto Geográfico Nacional)

### 1.5.3. SUELOS

A continuación en la figura 1.7 se describen las series más importantes que se presentan como unidades puras o asociadas de suelos dentro de la cuenca del Río Salado (Cruzate et al., 2007):

- **Haplustol Típico** (MNtc-6): Están desarrollados sobre materiales loésicos. Poseen un escurrimiento medio, una permeabilidad moderadamente rápida y un buen drenaje. Se caracterizan por una textura predominantemente franca. Además de la limitación climática poseen baja capacidad de retención de agua y fertilidad. Estos suelos integran una vía de escurrimiento, con vegetación de monte degradado.

- **Haplustol Entico** (MNen-20): Son suelos desarrollados a partir de un material eólico de texturas franca a franco arenosa. De escurrimiento lento, permeabilidad moderada e imperfectamente drenados. Ocupan posiciones bajas en el relieve, con deficiencias de drenaje. En períodos de grandes crecidas del Río Salado, puede inundarse por corto tiempo.

- **Haplustol Arídico (MNai -4)**: Desarrollados sobre materiales eólicos de textura franca a franco arenosas. Los perfiles de éste suelo se encuentran en diversos paisajes de explanadas en la llanura estabilizada chaqueña y en llanuras anegables (bañados y bajos tendidos). Escurrimiento medio, permeabilidad moderada y buen drenaje, las características externas se presentan como monte degradado de baja cobertura, sobrepastoreado.

- **Haplustol Salortídico**: Son suelos imperfectamente drenados y de textura dominante franco arcillosa. En los perfiles se manifiestan sales solubles.

- **Argiustol Arídico** (MKai-1): Son suelos desarrollados a partir de un material eólico de textura loésica. Dentro del paisaje de llanura estabilizada estos suelos ocupan la situación de explanada general. Su distribución está restringida al Norte de la provincia. Suelos bien drenados y por ende un déficit de humedad. Textura: franco

- **Argiustol Típico**: Suelos desarrollados a partir de acumulaciones de material loésico. El paisaje en que se encuentra es de llanura estabilizada en situación de explanadas y sobre vías de avenamiento en bajos tendidos. Drenaje: moderadamente bien drenado. Textura superficial: franco arenosa.

- **Argiustol Udico** (MKud): Se trata de suelos profundos desarrollados sobre sedimentos loésicos y aluviales. Suelos bien drenados y de textura franca.

- **Haplustalf vértico** (ASve-2): Horizonte de gran espesor, rico en arcilla, con planos de deslizamiento y grietas verticales en superficie que llegan a 90 cm de profundidad. De

permeabilidad muy lenta y excesiva capacidad para retener agua por encontrarse en un paisaje de explanadas plano-cóncavas expuestas a frecuentes anegamientos. Estos suelos están distribuidos en bajos tendidos, en bajadas con cauce incipiente y áreas de derrame. Además de la baja capacidad de drenaje, la sodicidad es otra limitante principal. Tienen capacidad de uso variable de acuerdo a los suelos con los cuáles se encuentra asociado.

- **Natracuol Típico** (MGtc-11): Poseen un horizonte arcilloso con elevados tenores de sodio en el complejo de intercambio (horizonte nátrico). La capa superficial normalmente es delgada y puede llegar a presentar evidencias de lixiviación. Estos suelos muestran un drenaje muy pobre que se manifiesta en el perfil por la presencia de moteados de hierro. Son comunes las concreciones calcáreas que resultan de la imposibilidad de remoción profunda de los carbonatos por la fluctuación de la capa de agua freática que afecta estacionalmente el perfil. Cuando se seca se producen concentraciones de sales.

- **Natracualf Típico** (AEtc-34): Se encuentra en un paisaje de bajadas en cauce y cauce incipiente, en situación de llanura aluvial, muy expuestas al anegamiento. Suelos pobremente drenados, de textura franco arcillo limosa, se los encuentra sobre vías de escurrimiento.

- **Torrifluent Típico**: El perfil característico de estos suelos está constituido por una secuencia de capas aluviales de textura y espesor variable. En todos los estratos abundan signos de hidromorfismo y manchas blancas correspondientes a sales solubles. Se encuentran en superficies aledañas al cauce del Río Salado, suelos de las crestas de los antiguos albardones de los cursos de agua que atravesaban el antiguo bañado del Río Salado. Ocupan áreas de situación topográfica intermedia entre la llanura del río Salado y la llanura chaqueña estabilizada. Textura predominante: franca limosa y permeabilidad moderada.

- **Argiudoles** (Mltc): Este subgrupo se caracteriza por un horizonte superficial continuo, oscuro, bien estructurado y rico en materia orgánica (epipedón mólico), asociado a un horizonte con enriquecimiento en arcilla aluvial (horizonte argílico). Son suelos desarrollados en condiciones de drenaje libre, que se encuentran bajo un régimen de humedad en el cual el perfil no llega a secarse totalmente por periodos prolongados durante el verano. Son suelos que no presentan limitaciones fisicoquímicas. Textura: franco limosa.

- **Ustifluent Típico**: Están constituido por una sucesión de capas que varían en textura, espesor y composición mineralógica. Estos perfiles se encuentran en una gran diversidad de

ambientes: piedemontes, conos aluviales, bajadas en cauce, cauces incipientes, derrames, terrazas y llanuras aluviales. Suelos muy drenados y textura arenosa.

- **Ustorten Típico:** Se trata de suelos pedregosos formados sobre acumulaciones de material grueso. Se ubica en áreas de relieve plano, algo cóncavas y de formas alargadas. Evolucionan sobre sedimentos fluviales entremezclados con materiales eólicos que han colmatado los antiguos cauces del Río Salado. Ecurrimiento medio, permeabilidad rápida, muy drenado y textura predominante areno gravilosa.

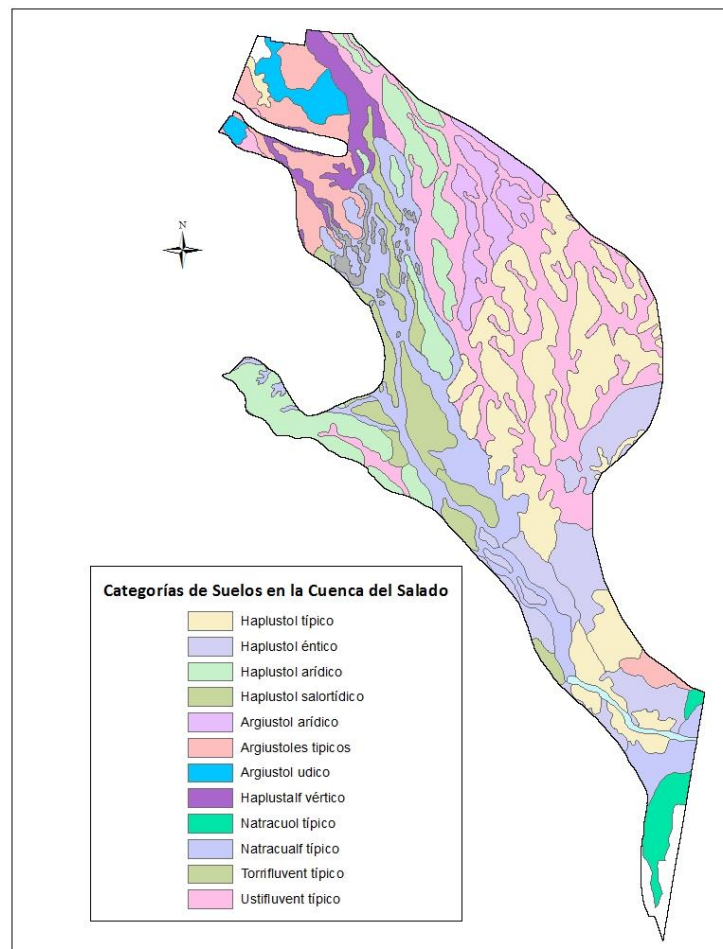


Figura 1.7. Clasificación de suelos en la Cuenca del Río Salado. Elaboración propia  
Fuente: Vectores extraídos de IGN (Instituto Geográfico Nacional)

#### 1.5.4. FORMACIONES VEGETALES

El Chaco Semiárido, representa una porción del Gran Chaco Sudamericano, unidad ininterrumpida de bosques secos más grande de Sudamérica (Hueck, 1978).

Existen diferentes autores que caracterizaron fitogeográficamente al Chaco Semiárido. Cabrera (1976), define como un bosque dominado por *Schinopsis quebracho colorado* (quebracho colorado santiagueño) y *Aspidosperma quebracho blanco* (quebracho blanco), que son las especies de mayor importancia que componen el estrato arbóreo superior, alcanzando los 16 a 18 metros de altura. Otras especies de importancia son el *Prosopis kuntzei* (itín), el *Prosopis nigra* (algarrobo negro), el *Ziziphus mistol* (mistol). Árboles de menor altura como el *Prosopis alba* (algarrobo blanco), *Cercidium praecox* (brea), *Jodina rhombifolia* (sombra de toro) y *Acacia aroma* (tusca).

En el estrato arbustivo son frecuentes, *Celtis pallida* (tala pispita), *Acacia furcatispina* (teatín), *Mimosa detinens* (garabato blanco), *Acacia praecox* (garabato negro) y *Capparis atamisquea* (atamisqui). La presencia de arbolitos y arbustos espinosos como *Geoffroea decorticans* (chañar), *Acacia caven* (churqui), *Acacia macrantha* (tusca) entre otras, indican exceso de pastoreo.

Morello *et al.*, (2012), diferencia las áreas por “Complejos” dentro de la subregión del Chaco Semiárido. Existen tres porciones o Complejos que incluyen la Cuenca del Salado, dicho autor resalta que existe gran influencia del trazado de la cuenca en las formaciones vegetales. A continuación se mencionan los complejos dentro de la provincia de Santiago del Estero, entre los que se destacan:

##### - **Complejo Antiguos Cauces del Juramento-Salado**

Complejo que se extiende por el Centro y Oeste de la provincia, incluye la totalidad de los departamentos Copo y Alberdi, y parte de Moreno, Este de Figueroa y Oeste de Juan Felipe Ibarra. Esta región es una extensa superficie boscosa determinada por el factor topográfico, dominado por bosques xéricos de las llanuras aluviales antiguas, representada por bosques bajos de un dosel denso de 5-7 metros y emergentes dispersos regularmente que alcanzan los 15-20 metros. Estos bosques xerofíticos, constituyen la vegetación climax zonal de los suelos medianamente drenados hasta algo imperfectamente drenada, con texturas dominantes desde franco-limosas, franco-arcilloso a areno-limosas y limo-arcillosas. Ocupan grandes

extensiones, representando la matriz del paisaje. Las especies diagnosticas son *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Ruprechtia triflora*, *Schinopsis coryne*, *Cereus forbesii*, *Quiabentia verticillata*, *Celtis chichape*, *C. pallida*, *Ximenia americana var argentesis*, *Castela coccinea*, *Browningia caineana*, *Acacia praecox*, *Cleistocactus baumanii*, *Arrabidaea truncata*, *Maytenus spinosa*, *Monvillea cavendishii*, *Gymnocalycium mihanovichii*, *Agonandra excelsa*, *Bougainvillea praecox*, *B. campanulata*, *B. infesta*, entre otras.

Los paleocauces o ríos muertos están colmatados con sedimentos arenosos y cubiertos de pastizales, sabanas y arbustales. Los tipos de vegetación incluyen bosque alto cerrado, sabana mixta, sabana arbustiva, y Pastizal en caños. En los derrames anegables se encuentra el fachinal (formación con abundancia de arbustos).

Además son frecuentes las áreas con vegetación arbustiva y arbórea semiabierta a semicerrada dominada por leñosas espinosas y sufrúctiles, formando un mosaico irregular, desarrollados sobre bosques secundarios xéricos, originados por acción antrópica mediante el fuego y el uso ganadero excesivo, donde las especies dominantes son poco palatables o tóxicas para el ganado, y tolerantes o resistentes al fuego.

En los suelos mal drenados aparecen bosques bajos y arbustales con dosel denso de 3-6 m de emergentes dispersos, con alturas que rondan los 10 a 16 metros, que constituyen la vegetación climáxica de los suelos mal drenados con texturas arcillo-limosas. Estas áreas pueden resultar anegadas temporalmente de forma somera en época de lluvias. En zonas bien conservadas, la altura de la formación disminuye cuanto mayor es la proporción de arcillas compactas en el suelo y con la mayor aridez del clima. Las especies diagnosticas son *Bulnesia sarmientoi*, *Schinopsis lorentzii*, *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Aspidosperma triternatum*, *Tabebuia nodosa*, *Cordia bordasii*, *Erythroxylum patentissimum*, *Acanthosyris falcata*, *Calycophyllum multiflorum*, *Trithrinax schyzophylla*, *Prosopis sp* etc.

#### **- Complejo del Valle del Juramento-Salado**

Es un complejo largo y delgado, dentro de la provincia de Santiago del Estero ingresa en diagonal desde el Noroeste hacia el Sudeste, por el límite entre los departamentos Copo y Alberdi con Pellegrini, atraviesa en diagonal el dpto. Figueroa y sigue por los límites del departamento Juan F. Ibarra y Sarmiento, Gral. Taboada y Avellaneda, Belgrano y Aguirre. Por lo general representan bosques degradados por sobreexplotación en los albardones y llanuras aluviales, donde dominan los arbustos resinosos y espinosos caducifolios. Incluyen arbustales

y bosques bajos en suelos inundables y matorrales halomorfos de suculentas en grandes parches salinos alcalinos, y se trata de arbustales secundarios.

En general, a lo largo del valle del Juramento-Salado se encuentran diferentes patrones de vegetación leñosa y herbácea, parceladas de cultivos, sabanas y abras asociadas a diferentes estructuras geomorfológicas. El tipo de vegetación característica de esta área son los arbustales secundarios de suelos mal drenados por sobreexplotación antrópica asociada a relictos de tipos de vegetación distintos a los actuales como tocones, sobre ramoneo, etc. Además de las sucesiones naturales, consecuencia de largos periodos de inundación en bordes de bañados y agua en periodos secos.

La vegetación de los salares inundables es una formación localizada, que se desarrolla en playas salinas de las depresiones fluvio-lacustres, en ambientes endorreicos semiáridos donde las aguas se concentran por evaporación.

#### **- Complejo Bosques - Arbustales del Centro**

Este complejo se extiende por la región Occidental de la Cuenca, formando parte de los dptos. Pellegrini, Sarmiento, Robles, Avellaneda, Aguirre, Figueroa, Banda y Juan F. Ibarra. Predomina un mosaico formado por los bosques secundarios xéricos alternando con los bosques xéricos de las llanuras aluviales, de los cuales derivan. También se encuentran las sabanas abiertas altas no inundables perforadas por parcelas de cultivo y parches más o menos aislados de bosques de suelos bien drenados.

Un modelador típico en estas regiones es el fuego, componente natural que se manifiesta periódicamente con un papel fundamental en el equilibrio dinámico que existe entre las especies leñosas y herbáceas. Sin embargo, el fuego también es usado por las actividades humanas para favorecer por ejemplo el rebrote de pastos del que se alimenta el ganado, facilitar la caza y eliminar áreas boscosas con fines agrícolas. Cuando el uso de esta práctica es de forma inadecuada, implica un efecto negativo sobre el medio (Morello *et al.*; 2012).



### 1.5.5. USOS DEL SUELO

Teniendo en cuenta que la agricultura representa la principal actividad de uso del suelo del territorio provincial, se muestra las superficies cultivadas durante la última campaña. En las siguientes tablas (1.1 y 1.2), se exponen las superficies en hectáreas de los cultivos extensivos de verano e invierno durante las campañas agrícolas 2013-2014. Las cifras indican que los cultivos de soja comprenden el uso de suelo predominante.

Tabla 1.1. Campaña agrícola 2013-2014. Cultivos extensivos de verano.  
Fuente: INTA, EEA SALTA, 2014.


Dpto.	Soja	Maíz	Poroto	Algodón
Aguirre	9.215	8.305	n/d	1.955
Alberdi	101.050	87.675	n/d	5.110
Banda	615	n/d	n/d	n/d
Belgrano	82.945	60.520	n/d	4.910
Copo	5.975	8.795	n/d	n/d
Gral. Taboada	147.690	104.695	n/d	11.100
Jimenez	66.840	34.530	435	n/d
Juan F. Ibarra	58.435	49.900	n/d	10.375
Moreno	268.930	206.640	n/d	21.730
Pellegrini	39.175	48.430	1.390	n/d
Rivadavia	33.300	18.180	n/d	30
Sarmiento	n/d	50	n/d	n/d

\*No incluye la superficie de algodón cultivada en áreas de riego.

n/d: No detectado por teledetección

Tabla 1.2. Campaña agrícola 2014. Cultivos extensivos de invierno.  
Fuente: INTA, EEA SALTA, 2014.

Dpto.	*Garbanzo	Trigo
Aguirre	n/d	8.215
Alberdi	n/d	38.005
Banda	n/d	990
Belgrano	n/d	44.065
Copo	n/d	1.270
Figueroa	n/d	1.350
Gral. Taboada	90	67.290
Jimenez	825	11.765
Juan F. Ibarra	n/d	20.310
Moreno	n/d	62.460
Pellegrini	3.680	10.630
Rivadavia	n/d	18.255
Robles	n/d	1.600
Sarmiento	n/d	335



\*No incluye la superficie de algodón cultivada en áreas de riego.  
n/d: No detectado por teledetección

### 1.5.6. CLIMA

El clima del Chaco Seco, región a la cual pertenece la zona en estudio, se caracteriza por ser cálido, con registros de temperatura media mensual del mes más caliente (enero) de 28°C y del mes más frío (julio) de 16,3°. Las precipitaciones medias anuales aumentan de Oeste a Este, desde aproximadamente 500mm a 750mm. El 60% de las precipitaciones se concentran en el semestre cálido (octubre-marzo). El balance hídrico del área es deficitario en la mayoría de los meses del año. Los vientos predominantes son del cuadrante Sur y Norte, siendo calientes y desecantes los que soplan del cuadrante Norte a fines de invierno y principios de la primavera (Boletta, 2001).

## **CAPÍTULO 2**

### **CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL SUELO**

#### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Con la prospección de los recursos naturales mediante imágenes de satélites, en particular con los productos LANDSAT, se han intensificado los monitoreos de la superficie terrestre en distintas fechas. Utilizando la información espectral que cada objeto terrestre posee ha sido posible datar los cambios ocurridos en el tiempo, ya que una variación en la reflectancia de las imágenes a menudo implica un cambio físico en la superficie terrestre (SSC, 1999).

La detección de cambio hace referencia a la identificación de diferencias en el estado de un objeto o fenómeno al observarlo en períodos diferentes, y para ello involucra datos multitemporales para discriminar áreas de cambio de una misma región pero en imágenes de distintas fechas, y el resultado final se denota en un mapa con la información del posible impacto (Aguirre & Salmerón, 2000). Los cambios globales más significativos resultado de las actividades antrópicas se relacionan con la dinámica en el uso de la tierra y prácticas de manejo (Bran *et al.*, 2017; Paruelo *et al.* 2005; Dos Santos, 1994;).

Uno de los aportes más significativos de la teledetección espacial para estudios ambientales es su capacidad para seguir procesos dinámicos. Al tratarse de información adquirida por un sensor situado en una órbita estable y repetitiva, las imágenes de satélites constituyen una fuente valiosísima para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre (Chuvienco, 2010). Herramientas que se desprenden de la teledetección son fundamentales para tales estudios.

En teledetección la detección de áreas agrícolas se hacen claramente visibles respecto a las áreas forestales de acuerdo a sus formas geométricas y textura casi lisa, contrastando visiblemente con las rugosidades de las áreas boscosas. La información que provee el análisis de ocupación del suelo de la tierra es de gran importancia para la gestión y planificación del territorio en estudios ambientales, riesgos y catástrofes naturales (Serra *et al.*, 2003; Santana & Salas, 2007). Un estudio de esta índole supone analizar y clasificar los diferentes tipos de cobertura y usos antrópicos asociados en una zona o región determinada, de esta manera es posible registrar el paso acelerado de la intensificación de los usos producidos.

## 2.2. OBJETIVO ABORDADO EN EL CAPÍTULO

El presente capítulo tiene por objetivo detectar tanto espacial como temporalmente los cambios de cobertura boscosa y uso del suelo en la cuenca del río Salado de la provincia de Santiago del Estero, entre las década de 1980 y 2014. Se intenta mediante la presente sección visualizar el gran impacto que sufrió la cuenca a partir de la disminución de sus bosques nativos por medio de una de las principales causas que es la ocupación de la tierra para la agricultura extensiva, utilizando información obtenida mediante las técnicas de teledetección.

## 2.3. MARCO TEORICO

### 2.3.1. LA TELEDETECCIÓN EN EL MONITOREO TERRESTRE

La *teledetección* consiste en la adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores situados en plataformas espaciales, a través de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor. Se llama *pasiva* cuando la fuente de radiación que usa el sensor es el sol; y *teledetección activa*, cuando el propio sensor la emite (Bustos *et al.*, 2004).

En un *sistema de teledetección espacial* intervienen diferentes elementos: una *fuerza energética* (por ejemplo el sol); una *cubierta terrestre* objeto de observación; y un *sensor* que recibe la energía proveniente de la cubierta terrestre, la decodifica y la envía al sistema *receptor*, quien la distribuye hacia el *intérprete* para convertirla en información útil para los usuarios finales (Chuvieco, 2010). Se entiende como *espectro electromagnético* a la sucesión continua de valores de longitudes de onda (figura 2.1). Dentro del mismo se distinguen *bandas* o *zonas* donde las longitudes de onda tienen un comportamiento similar. Dichas bandas adquieren cierto interés para el monitoreo terrestre: la *región visible* representanta a las longitudes de ondas directamente dependientes de la energía solar; en el dominio del *infrarrojo* se manifiesta con mayor claridad la emitancia espectral de la superficie terrestre. (Bustos *et al.*, 2004; Bustos, 2009):

#### **El dominio óptico:**

- *Espectro visible* (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ): Se distinguen tres bandas elementales en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda: azul (0,4-0,5  $\mu\text{m}$ ), verde (0,5-0,6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0,6-0.7  $\mu\text{m}$ ).

#### **El dominio del infrarrojo:**

- *Infrarrojo próximo* (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ): Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- *Infrarrojo medio* (1.3 a 8  $\mu\text{m}$ ), donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Resulta idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
- *Infrarrojo lejano o térmico* (8 a 14  $\mu\text{m}$ ), incluye la porción emisiva del espectro terrestre, detectándose el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

### La región de las micro-ondas:

- *Micro-ondas* (a partir de 1  $\mu\text{m}$ ), se trata de las mayores longitudes de onda utilizadas en teledetección. Es un tipo de energía prácticamente transparente a la cubierta nubosa, por lo que se puede medir en todos los climas, además opera de día y noche ya que no necesita de la luz solar.

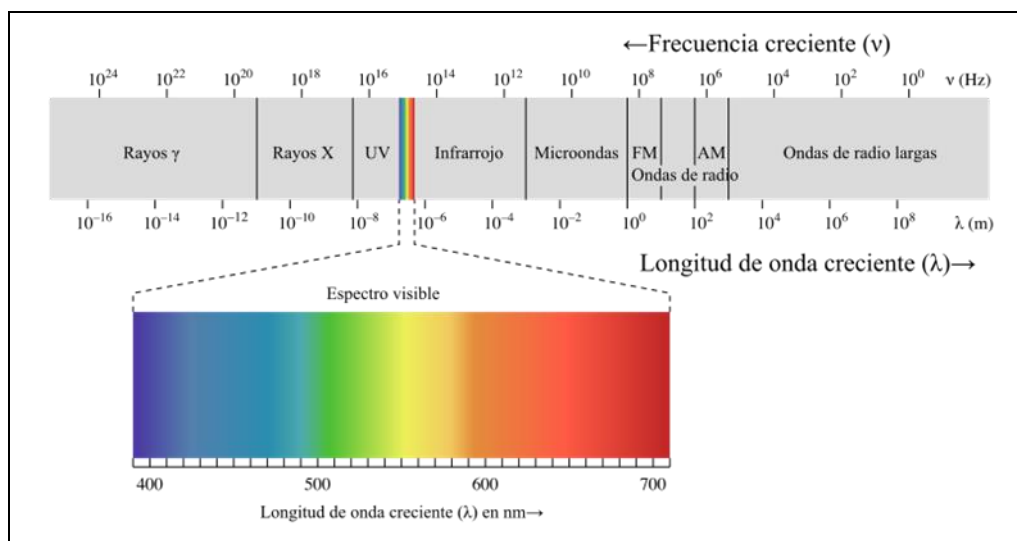


Figura 2.1. Espectro electromagnético

### 2.3.2. LAS IMÁGENES LANDSAT

El programa Landsat se inició en el año 1972, y se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite, gestionada conjuntamente por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada.

### 2.3.2.1. LANDSAT-5

El satélite LANDSAT-5 fue lanzado el 1 de marzo de 1984 y se ha convertido en el satélite de observación de la tierra que más tiempo ha estado operativo. Fue dado de baja el 5 de junio de 2013. Sus aplicaciones abarcan la detección de cambios globales, agricultura, calidad del agua y administración de recursos. Compuesto de dos sensores: Escaner Multi-Espectral (MSS) y el Mapeo Telemático (TM).

El sensor TM, fue un sensor de barrido multiespectral mejorado respecto al sensor MSS. Concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, y discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y precisión radiométrica. Operaba en siete bandas espectrales, de las cuales tres bandas correspondían al visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal (tabla 2.1) (Da Silva, 2012).

Tabla 2.1. Información general del satélite LANDSAT-5

Parámetros	LANDSAT-5		
Altitud de Órbita	705 km		
Bandas Espectrales	Bandas	Longitud de Onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 Azul	0.45 – 0.52	30
	Banda 2 - Verde	0.52 – 0.60	30
	Banda 3 - Rojo	0.63 - 0.69	30
	Banda 4 – Infrarrojo cercano 1	0.76 - 0.90	30
	Banda 5 – Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75	30
	Banda 7 – Infrarrojo medio	2.08 – 2.35	30
	Banda 6 – Infrarrojo térmico	10.4 – 12.5	120
Ancho de pasada	185 km		
Lanzamiento/ expectativa de vida	1984 - 2013		
Tiempo de revisita	16 días		

### 2.3.2.2. LANDSAT - 8

En la actualidad, Landsat se encuentra en su octava versión denominada “Landsat Data Continuty Mission” (LDCM), conocido como Landsat 8. Lanzado el 11 de febrero de 2013, se caracteriza por ser un satélite óptico de resolución media, más completo respecto a su antecesor LANDSAT-7, con sus funciones mejoradas para monitorear la calidad del agua y las nubes atmosféricas altas. Este satélite contiene dos sensores: Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI), y un Sensor Infrarrojo térmico (TIRS) (Ariza, 2013).

El sensor **OLI** está formado por nueve bandas espectrales: visible, infrarrojo, y radiaciones de bajas ondas. El sensor **TIRS** está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, utilizado para medir la temperatura de la superficie de la tierra.

Las bandas espectrales del sensor OLI, proporcionan una mejora debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1) (canal destinado a los recursos hídricos e investigación en zonas costeras); y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para detección de nubes cirrus. También se incorporó una nueva banda de control de calidad con cada producto de dato generado, lo cual proporciona más detalle acerca de datos como las nubes, agua y nieve. Además de las bandas agregadas, se incrementó la calidad de los datos y la resolución radiométrica, pasando de 8 bits en los sensores TM y ETM+ a 12 bits en OLI, mejorando la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre (tabla 2.2) (Ariza, 2013).

Tabla 2.2. Información general del satélite LANDSAT-8

Parámetros	LANDSAT-8		
Altitud de Órbita	705 km		
Bandas Espectrales	<b>Bandas</b>	<b>Longitud de Onda (micrómetros)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
	Banda 1 – Aerosol costero	0.43 – 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 – 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100
Ancho de pasada	185 km		
Lanzamiento/ expectativa de vida	2013 – 2018 (con suministros hasta el 2023)		
Tiempo de revisita	16 días		

\* SWIR (Infrarrojo de onda corta). \*Las bandas TIRS se obtienen a resoluciones de 60m pero son remuestados a 30m para información del producto final.

### 2.3.3. CONCEPTOS EMPLEADOS EN LA METODOLOGÍA

#### 2.3.3.1. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIO

Uno de los aportes más destacados de la teledetección es su capacidad de seguir procesos dinámicos de la superficie terrestre. Existen dos aspectos fundamentales en el seguimiento de la dinámica de un determinado fenómeno en relación con el cambio: la rapidéz con que el fenómeno se produce (escala temporal), y la pervivencia del cambio (permanencia de los efectos de esa perturbación). De acuerdo a la naturaleza de la perturbación va a depender la observación que se requiera en teledetección. Los sistemas actuales de teledetección proporcionan una amplia variedad de cadencias de observación, que van desde pocos minutos para satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria y amplia cobertura, hasta varias semanas para los recursos naturales, con órbitas más bajas y cobertura territorial mucho más limitada. Entre los requerimientos mínimos para estudios multitemporales sobre los recursos naturales con sistemas de teledetección se destacan: una cobertura periódica; las mismas bandas espectrales; y condiciones de observación similares, es decir, altura, hora



y el ángulo de observación. Para análisis multianual donde se detectan los cambios producidos entre dos o más fechas, suele partirse de imágenes adquiridas en distintos años, que se comparan visualmente o digitalmente. Para ello se procura que las imágenes sean de la misma época del año, con objeto de aislar más fácilmente lo que las imágenes manifiestan de cambios en el terreno (Chuvienco, 2010).

### **2.3.3.2. REQUISITOS PREVIOS PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL: CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA Y GEOMÉTRICA**

La comparación multitemporal entre imágenes se realiza comparando pixel a pixel los ND de las distintas fechas. Es necesario eliminar previamente cualquier cambio en los ND de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta. Esto implica situar en la misma zona a todas las imágenes con que se trabaje, y que la variable que sea comparable se refiera a la misma escala de medida. Por lo tanto, la comparación temporal requiere una previa corrección geométrica y radiométrica de las imágenes que se desea comparar.

En relación al *ajuste geométrico* para estudios multitemporales, es preciso que las imágenes se ajusten con gran nivel de detalle, para evitar errores de desplazamientos entre ellas.

Otro punto a considerar es la necesaria *homogeneización radiométrica* entre las imágenes. Entre las variaciones que se generan en las imágenes de diferentes fechas se mencionan las condiciones de observación, variaciones atmosféricas o variaciones relacionadas a la calibración del sensor. Estos efectos modifican la signatura espectral de un pixel, aunque se mantenga constante la cubierta. Por lo tanto, es tarea necesaria homogeneizar los ND de las imágenes que intervienen en el análisis, mediante una calibración, es decir convirtiéndolos a medidas de reflectividad, incorporando los parámetros de corrección atmosférica y de iluminación más propios para cada fecha.

### 2.3.3.3. CLASIFICACIÓN DIGITAL

La clasificación es una de las fases más importantes del tratamiento digital. Es una extracción de información, donde se intenta convertir la imagen original en una nueva imagen con características de la original, pero con la diferencia que los números digitales de los píxeles no tienen relación con la radiancia del sensor, sino que es una etiqueta que identifica la categoría o clase asignada a ese píxel. Por lo tanto, la imagen pasa de ser una variable cuantitativa a una variable cualitativa, lo que implica categorizar una imagen multibanda, agrupando los píxeles que posean una misma categoría mediante clasificadores y adoptando reglas de decisión basadas en conceptos estadísticos para establecer la identidad de cada píxel de una imagen (Chuvienco, 2010).

Tradicionalmente se han dividido los métodos de clasificación en dos grupos, supervisado y no supervisado, de acuerdo a las formas en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento:

- **Método supervisado:** Parte de cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Dicha familiaridad con el área permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda, denominadas *áreas de entrenamiento*, término que indica que tales áreas sirven para “entrenar” al programa de clasificación en el reconocimiento de las distintas categorías. A partir de ellas se caracterizan cada una de las clases, para asignar más tarde el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de la similitud de sus DN con los extraídos como referencia.
- **Método no supervisado:** Este método no requiere el conocimiento del área, por lo que la intervención del usuario se restringe más a la interpretación de las clases que arroja el clasificador. Asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados más o menos nítidos según los casos. Consiste en una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. Estos grupos equivalen a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo.

Por lo tanto, en la clasificación supervisada interviene un proceso donde píxeles de identidad conocida son ubicados dentro de las áreas de entrenamiento, y utilizados para clasificar

píxeles de identidad desconocida. La clasificación supervisada involucra a las siguientes etapas o fases (Chuvienco, 2010):

- *fase de entrenamiento*
- *fase de asignación*
- *fase de verificación*

### **2.3.3.3.1. FASE DE ENTRENAMIENTO**

Se inicia el proceso seleccionando áreas de identidad conocida de la cubierta terrestre sobre la imagen digital para todas las bandas que interviene en el proceso, mediante las llamadas áreas de entrenamiento o regiones de interés. Para ello, se selecciona una muestra de píxeles de la imagen que representen adecuadamente a las categorías de interés.

Antes de abordar el proceso de clasificación es necesario verificar la separabilidad de las categorías seleccionadas. Se trata de evaluar si esas clases puedan discriminarse sin grave riesgo de error.

### **2.3.3.3.2. FASE DE ASIGNACIÓN**

En esta fase, se vincula cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases previamente seleccionadas para cada una de las bandas que intervienen en el proceso. El resultado es una nueva imagen cuyos ND expresan la categoría temática a la que se ha adscrito cada uno de los píxeles de la imagen original. Existen diversos criterios para realizar este proceso. Todos tienen en común que definen un área de dominio, en torno al centro de cada categoría a discriminar, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Estas ecuaciones pueden considerarse como las fronteras que definen cada categoría: el píxel será asignado a una clase  $i$ , si sus ND se encuentran dentro del área de dominio señalado para dicha clase.

Los criterios más comunes para definir dichas fronteras estadísticas entre clases son:

- *Distancia mínima*, donde el píxel se asigna a la clase más cercana espectralmente,
- *Paralelepípedos*, que permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión espectral asociados a cada clase
- *Máxima probabilidad*, en donde el píxel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia.

En teledetección, el método de *máxima probabilidad* o también llamado *máxima verosimilitud* (*maximum likelihood*) requiere mayor volumen de cálculo y es el más empleado por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos. En este algoritmo la distribución de los valores de reflectancia en los campos de entrenamiento es descrita por una función de densidad de probabilidad basada en la estadística bayesiana. El clasificador evalúa la probabilidad de que un píxel dado, con una respuesta espectral específica, pueda pertenecer a una clase. La asignación se hace a la clase con más alta probabilidad de pertenencia (Campbell, 1996). La regla de decisión de máxima verosimilitud tiene la ventaja de considerar la variabilidad de los valores de brillantez en cada clase y no únicamente la media.

### 2.3.3.3.3. FASE DE VERIFICACIÓN

La matriz de confusión es una herramienta adecuada para caracterizar la exactitud de las asignaciones temáticas y puede resumirse por medio de índices, tales como el índice Kappa. El índice Kappa es considerado por la comunidad de sensado remoto como una útil medida de exactitud de clasificaciones. Dada la siguiente matriz de confusión (tabla 2.3) (Lanfri, 2011):

Tabla 2.3. Matriz de confusión  
**j = columnas**  
**datos de referencia**

		$j_1$	$j_2$	$j_k$	$n_{i.}$
i = filas Clasificación	$i_1$	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{1k}$	$n_{1.}$
	$i_2$	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{2k}$	$n_{2.}$
	$i_k$	$n_{k1}$	$n_{k2}$	$n_{kk}$	$n_{k.}$
	$i_{.j}$	$n_{.1}$	$n_{.2}$	$n_{.k}$	$n_{..} = n$

Las filas representan los valores predichos, y las columnas los valores observados. Cada celda representa el número de puntos que fueron clasificados como "i" y observados como "j". La diagonal, donde  $i=j$ , representa casos donde los valores predichos coinciden con los valores observados. Todas las celdas que no están ubicadas en la diagonal contienen valores mal clasificados, y la fila y columna describe como ese valor fue mal clasificado.

Las filas totales son el número de puntos clasificados dentro de la categoría  $i$  por el modelo de clasificación, y son calculadas como:

$$n_i = \sum_{j=1}^k n_{ij}$$

Las columnas totales son el número de puntos clasificados dentro de la categoría  $j$  por el testeo a campo u observación, y son calculadas como:

$$n_j = \sum_{i=1}^k n_{ij}$$

El estadístico Kappa proporciona una medida de concordancia entre los valores predichos y observados, y se calcula de la siguiente manera:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ij} - \sum_{i=1}^k n_i \cdot n_j}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_i \cdot n_j}$$

#### **2.3.4. INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)**

El NDVI (por sus siglas en inglés: Normalized Difference Vegetation Index) es un índice que sirve para estimar la calidad y cantidad de vegetación.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del comportamiento de la vegetación. La signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas del visible, especialmente en la banda roja (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) y el IRC (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ). En el visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al IRC, por ello se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda rojo del espectro y la IRC, lo que permite separar la vegetación sana de otras cubiertas (figura 2.2). Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, por ejemplo una sequía intensa, su reflectividad será inferior en el IRC, aumentando paralelamente en el rojo (por tener menor absorción clorofílica), con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor. Por lo tanto, cuanto mayor sea la diferencia entre las reflectividades IRC - R, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos contrastes indican una vegetación enferma, senescente o con poca densidad. Los valores de índice NDVI varían entre un margen conocido (-1 y 1), lo que facilita su interpretación para establecer umbrales para cada cubierta, muy utilizado para la evaluación de la vegetación y la dinámica de cambio de cobertura.

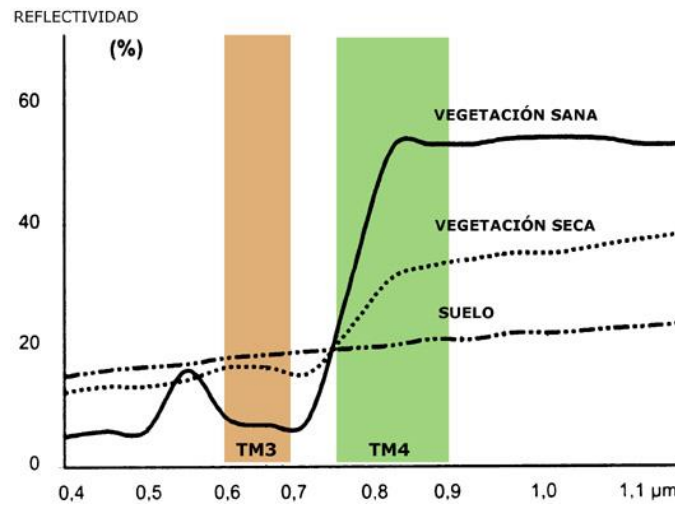


Figura 2.2. Comportamiento de la vegetación en la región del visible.  
Fuente: chuvieco (2010)

El cálculo genérico de NDVI:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - R}{\text{IRC} + R}$$

dónde:

$\left. \begin{array}{l} \text{IRC: Infrarrojo cercano} \\ \text{R: Rojo} \end{array} \right\}$	$\left[ \begin{array}{l} \text{Red} = \text{Banda 4} = (0,64 - 0,67 \mu\text{m}) \\ \text{IRC} = \text{Banda 5} = (0,85 - 0,88 \mu\text{m}) \end{array} \right]$
---	--

Landsat 8

## 2.4. METODOLOGIA

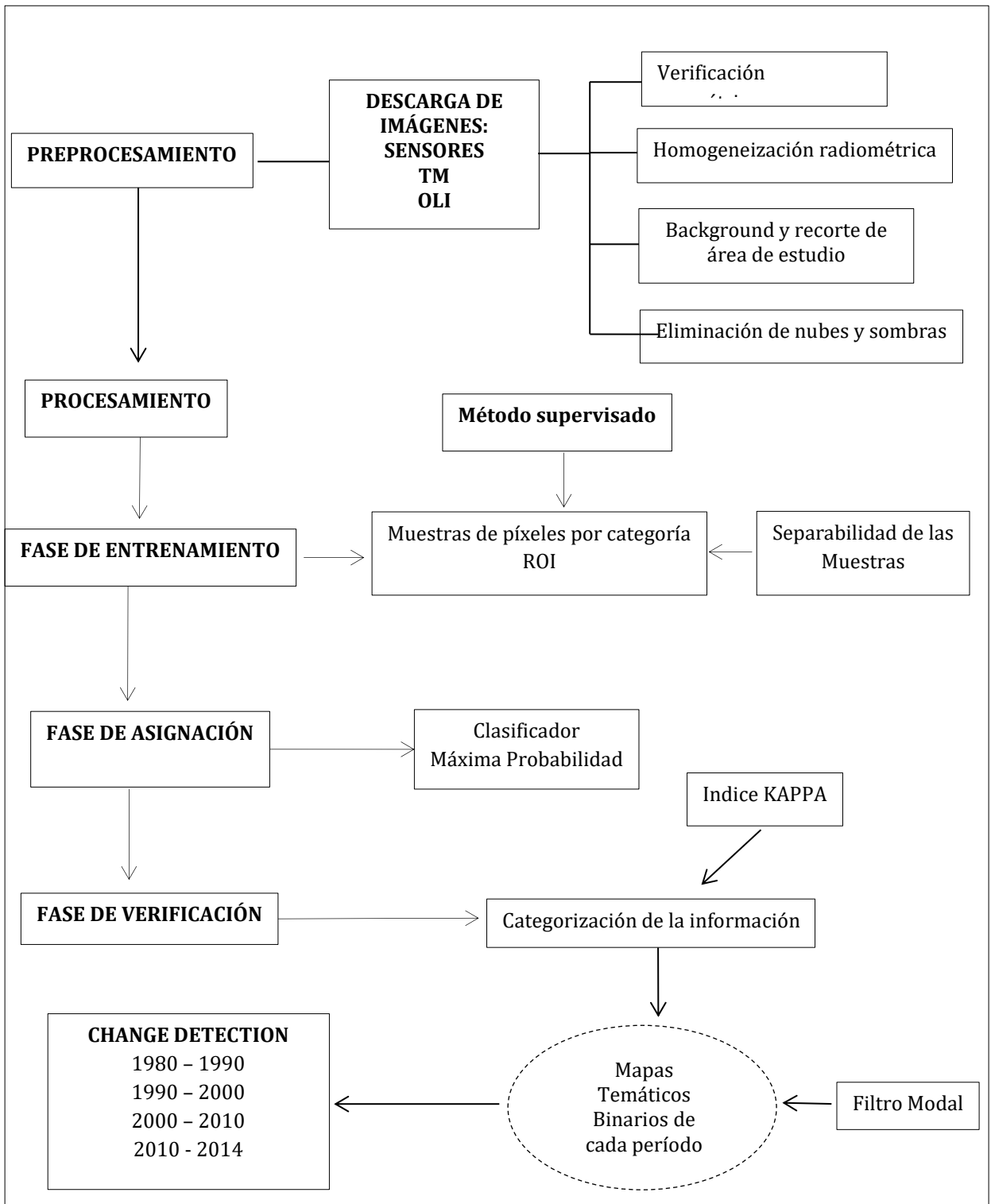


Figura 2.3. Diagrama metodológico

## 2.4.1. PREPROCESAMIENTO

### 2.4.1.1. DESCARGA DE LAS IMÁGENES LANDSAT

Las imágenes LANDSAT se descargaron del siguiente sitio Web: [<http://earthexplorer.usgs.gov/>], (figura 2.4):

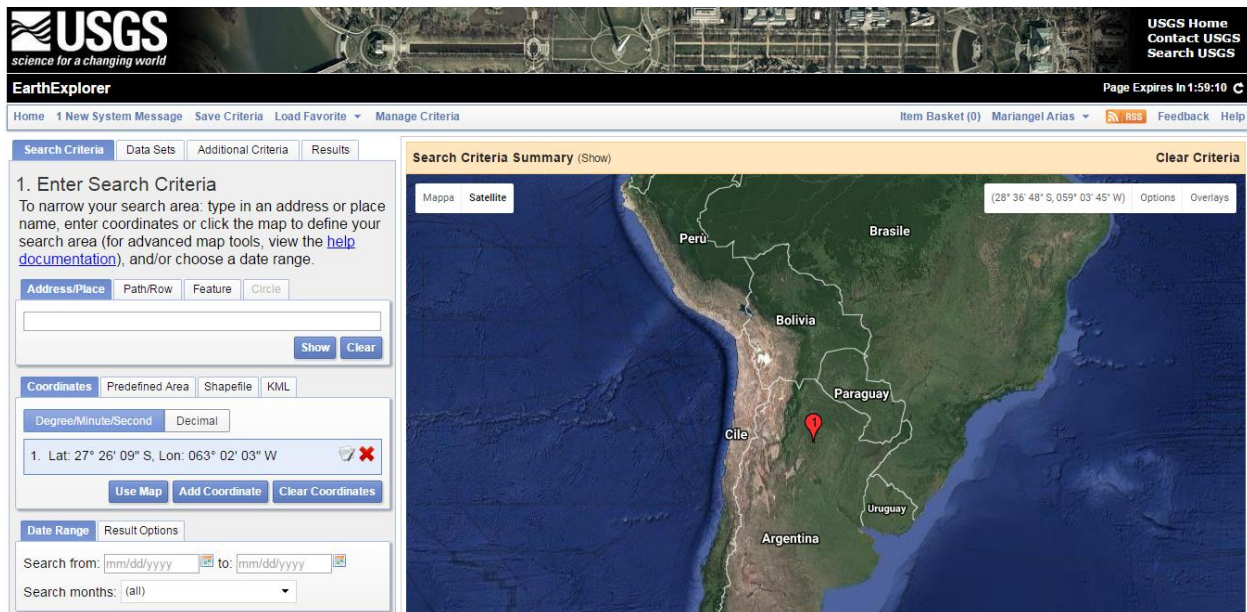


Figura 2.4. LANDSAT USGS – Science for a changing world – Earth Explorer

Las imágenes pertenecen a los sensores TM (Mapeo Telemático) y OLI (Sensor operacional de imágenes de tierra), correspondientes a las versiones de LANDSAT 5 y 8. Para el decenio requerido, comprendido entre 1980 a 2014, fueron necesarias un total de 35 imágenes, en razón de siete imágenes por década. A continuación, en la figura 2.5 se despliega el cubrimiento de los Path (franja vertical) y Row (franja horizontal) que abarcan en el área de estudio.



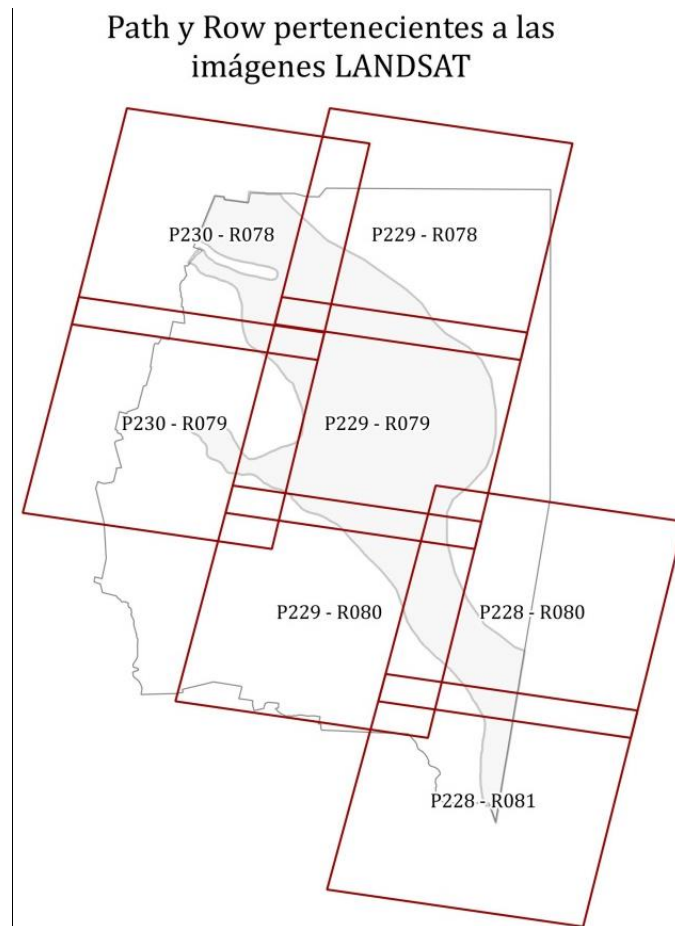


Figura 2.5. Path/Row de imágenes LANDSAT, comunes para los sensores TM y OLI  
Fuente: Elaboración propia. Fuente de datos: IGN

Los detalles de las imágenes descargadas se presentan en el Anexo N° 2 (apartado b), cuya información contempla: Path/Row; Fecha de captura; Sensor; y centro de escena.

Las imágenes pertenecen a la estación seca (abril - septiembre), donde las precipitaciones son escasas o nulas (Boletta, 2001). Dicha estación favorece por un lado la adquisición de imágenes prácticamente desprovistas de cobertura nubosa, y por otro lado, en la estación seca, se da el mayor contraste entre la vegetación leñosa y herbácea ideal para diferenciar las coberturas boscosas de las agrícolas (Zerda, 2009). Pero debido a la gran extensión de la zona de estudio, no se pudo completar la descarga con fechas de igual estacionalidad climática. En el Anexo 2 (apartado b), se identifican los path y row de las décadas de 1980 y 2010 que no corresponden a la estación seca. Esta diferencia en los meses de descarga puede generar resultados a analizar, ya que la cobertura de bosque no es la misma por ejemplo en el mes de enero, donde las precipitaciones y los rebrotes están en su pico más alto.

### **2.4.1.2. VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA Y HOMOGENEIZACIÓN RADIOMÉTRICA**

Para la extracción de información multitemporal de las imágenes, ha sido necesario realizar una verificación geométrica (ajustar las imágenes al mismo nivel de detalle geográfico) y calibración radiométrica (equiparar los parámetros físicos).

En relación a la verificación geométrica, las imágenes Landsat descargadas del sitio web USGS- Earth Explorer, se encontraron perfectamente alineadas geográficamente, por lo que no fue necesario realizar ningún tipo de corrección geométrica.

La calibración de las imágenes del sensor TM se realizó manualmente con el programa ENVI. Las

Imágenes LANDSAT 8 se calibraron con módulo denominado “procesador\_L8\_v3.sav” provisto por la unidad de Consultoría de Aplicaciones Espaciales en Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (CAEARTE) - CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales).

### **2.4.1.3. ELIMINACIÓN DEL BACKGROUND**

En esta fase del tratamiento de las imágenes, se enmascararon los valores negativos correspondientes al background o límite exterior de las imágenes. Estos valores se crean luego de la calibración de las imágenes. Se originó una banda del background con valores (-0.1), dicha banda se aplicó luego a cada imagen Landsat para eliminar los valores negativos de las imágenes originales.

### **2.4.1.4. ELIMINACIÓN DE NUBES Y SOMBRAS**

La cobertura nubosa existentes en las imágenes Landsat fueron corregidas con el método Kong *et al.* (2013). El método de Kong *et al.* (2013), consiste en eliminar nubes y sombras (generadas por las nubes); aplicable al sensor Landsat 8 OLI. El procedimiento consiste en calcular la intensidad de las nubes y sombras gracias a la precisión de Landsat 8 OLI en las medidas del IR, región espectral donde las nubes son más visibles. Se utilizaron los siguientes coeficientes para realizar el cálculo en las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 de Landsat 8. Luego, mediante Band Math de ENVI 4.8 se enmascararon los valores de las nubes como las sombras.

Cálculo mediante el modulo band Math:

$$((\text{float}(0.846*b2)-(0.073*b3)-(0.46*b4)-(0.0032*b5)-(0.049*b6)+(0.0119*b7)))$$

Para las imágenes del sensor TM no se aplicó el método Kong et al (2013). En primer lugar debido a que se escogieron imágenes sin cobertura nubosa; y por otro lado, este método sólo es aplicable a las imágenes del sensor OLI. Los resultados se muestran a continuación (Figura 2.6):

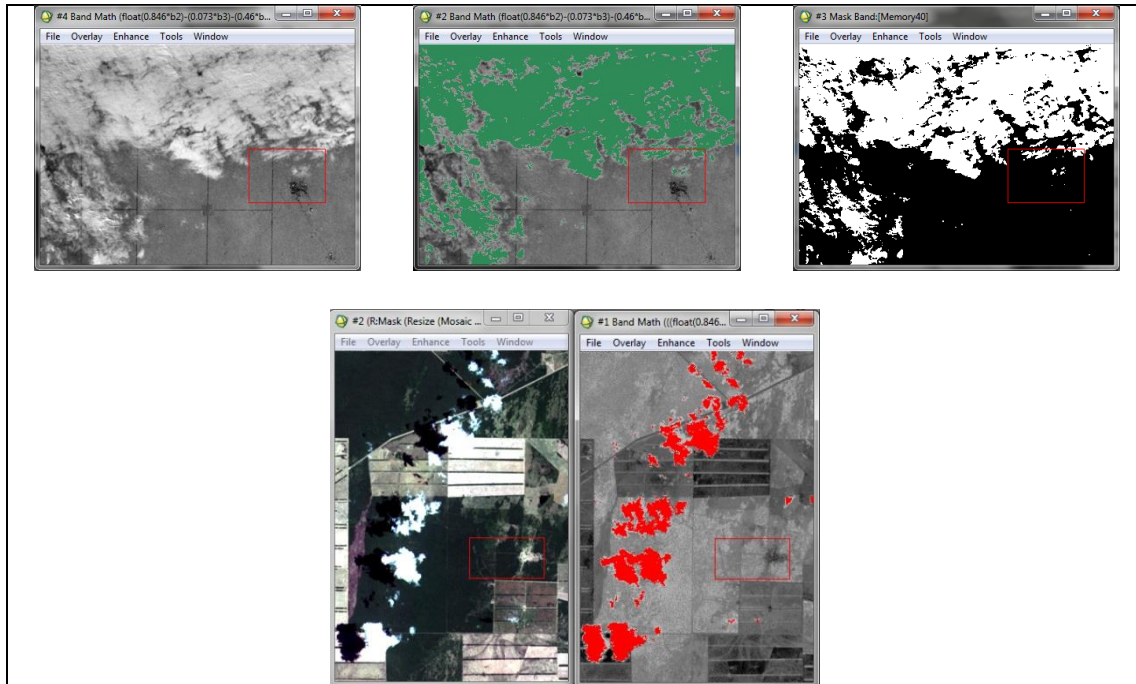


Figura 2.6. Aplicación del método de Kong *et al.* (2013).

#### 2.4.2. PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES LANDSAT

Para extraer las clases de interés, se realizó una clasificación supervisada de las imágenes Landsat, las cuales consistieron en tres fases (Chuvieco, 2010) (figura 2.7):

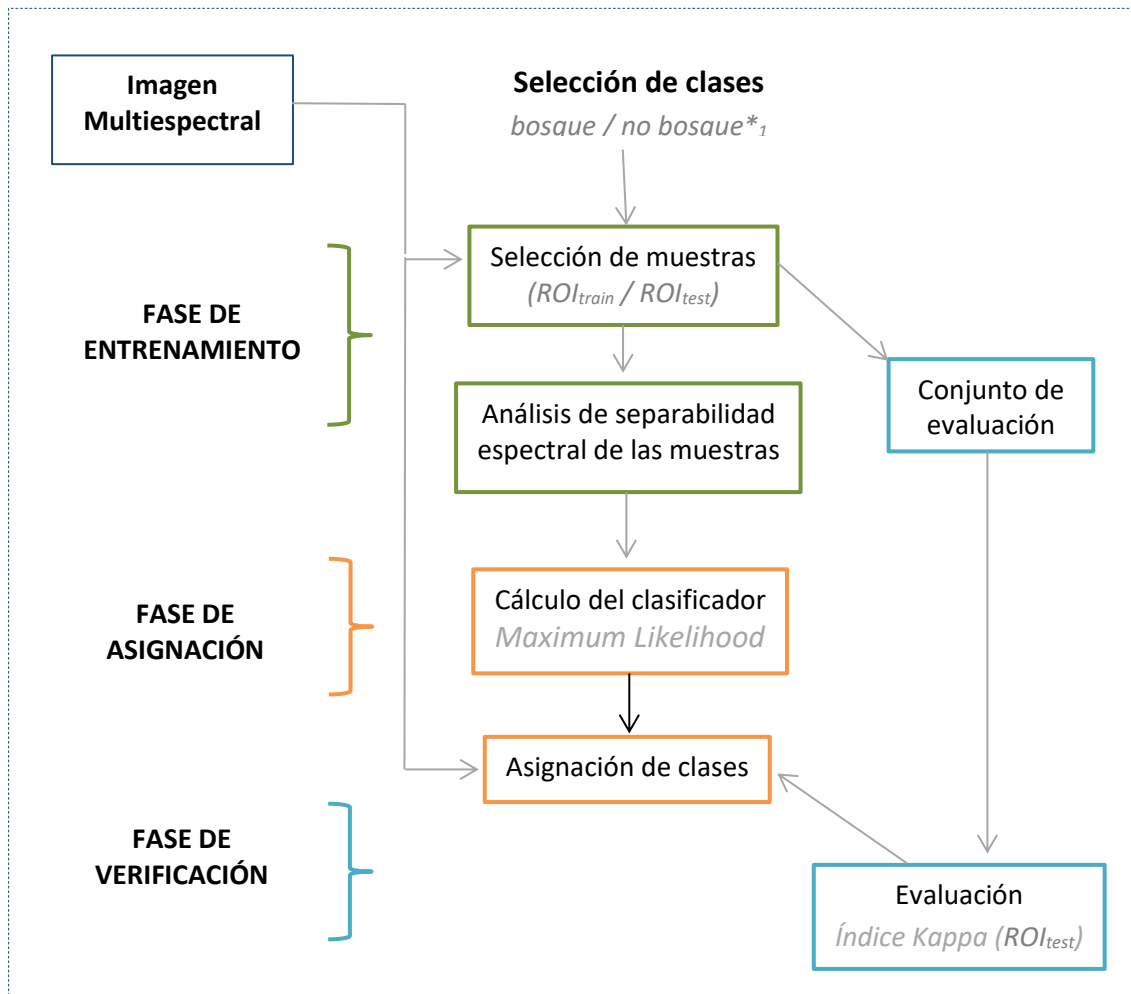


Figura 2.7. Diagrama explicativo de las fases de clasificación

\*<sub>1</sub> En relación a la selección de clases, es importante mencionar, que de acuerdo al objetivo del presente trabajo, lo que se pretende es extraer la clase bosque, clase suficiente para realizar todo el análisis necesario para el presente capítulo. Por lo tanto, las clases definidas fueron: bosque / no bosque.

#### 2.4.2.1. FASE DE ENTRENAMIENTO

En esta fase, la obtención de las muestras se realizó seleccionando grupos de píxeles representativos y homogéneos, denominadas ROI<sub>train</sub> “regiones de interés” o “áreas de entrenamiento”. Para un mejor resultado, se trabajaron a las imágenes por separado, luego a los resultados finales se unieron mediante mosaicos delimitando la cuenca del río Salado. A fin de determinar que los píxeles seleccionados fueran representativos, se efectuó la separabilidad espectral en las muestras (ROI) comprendidos como: bosque/no bosque. Cuanto más se aproximan a un valor de dos (2), significa que existe una buena separabilidad

entre muestras. El umbral de valores de separabilidad escogido comprende de 1,85 a 2 (figura 2.8).

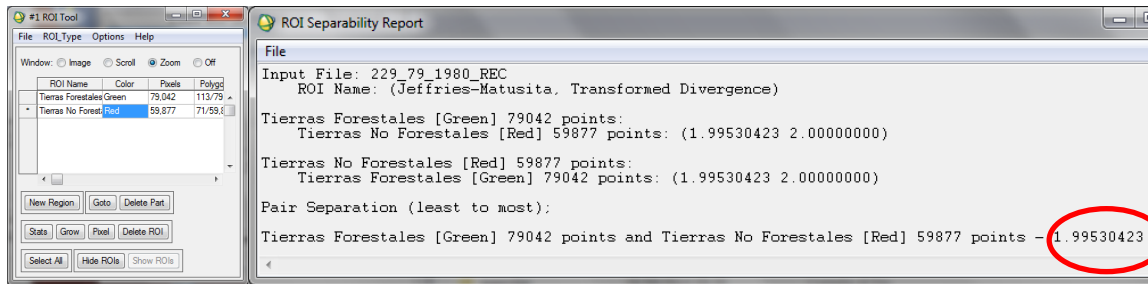


Figura 2.8. Ejemplo del procedimiento para la efectividad de las muestras

### 2.4.2.2. FASE DE ASIGNACIÓN

En la fase de asignación, se adjudicaron cada uno de los píxeles de las áreas de entrenamiento (ROI) al algoritmo de clasificación supervisada denominado “*máxima verosimilitud*” (Maximum Likelihood). Las bandas de las imágenes Landsat que intervinieron en el proceso se muestran en la siguiente tabla (2.5):

Tabla 2.4. Bandas intervinientes en la clasificación digital de imágenes Landsat.

TM	OLI
Banda 1 - Azul	Banda 2 - Azul
Banda 2 - Verde	Banda 3: Verde
Banda 3 - Rojo	Banda 4: Rojo
Banda 4 – IRC 1	Banda 5: IRC
Banda 5 – IRC 2	Banda 6: SWIR 1
Banda 7 – IRM	Banda 7: SWIR 2
NDVI (banda 3 y 4)	NDVI (banda 4 y 5)

Seleccionadas las muestras, se definió el umbral de probabilidades igual a 0.85%, esto significa que para que un píxel sea asignado a una clase, la probabilidad de pertenencia a esa clase tiene que estar por encima de ese umbral, si no es el caso, no se asignará a dicha clase. El factor de escala es igual a 1, ya que todos los valores son de reflectancia, y van de 0 a 1. Luego se corre el programa para aplicar las funciones de decisiones del método de

probabilidad, el resultado es una clasificación por píxel de todas las bandas intervinientes de una determinada imagen (figura 2.9).

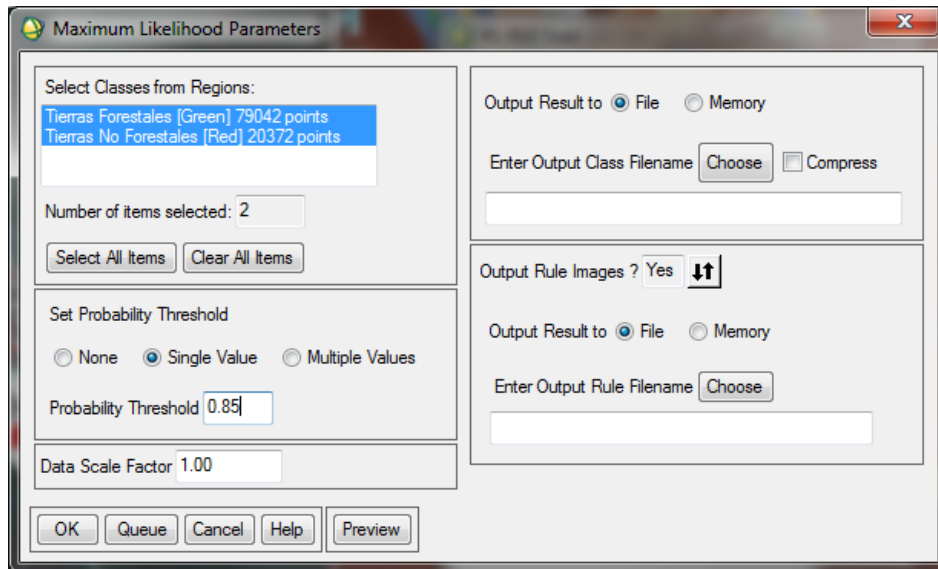


Figura 2.9. Ejemplo del uso del clasificador de Máxima verosimilitud en ENVI.

### 2.4.2.3. FASE DE VERIFICACIÓN

Para validar la clasificación, se efectuaron unos puntos de referencia,  $ROI_{test}$

La elección de las muestras de validación se realizó de manera aleatoria. La teoría dice que son necesarias como mínimo 50 píxeles para cada clase. En la post-clasificación se generó una muestra aleatoria a partir de los ROI, para que las medidas de exactitud sean mucho más fiables. Para evaluar si la clasificación fue correcta o no, se realizó un proceso de evaluación numérica, la aplicación del índice Kappa para determinar el nivel de similitud entre las coberturas.

- **Vectorización de la cobertura resultante**

Como producto final se generaron los *mapas binarios* de cobertura boscosa para cada década analizada. Se denominaron mapas binarios en razón de los valores que se le asignaron a las coberturas de bosque un valor de 1, y a las coberturas sin bosque un valor de 0.

Otro de los productos finales fueron los mapas binarios de áreas cultivadas.

### 2.4.3. MAPAS TEMÁTICOS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS

Producto de la clasificación, se obtuvieron los mapas binarios denominados “bosque/no bosque” o “tierras forestales/ tierras no forestales”. Utilizando la clase temática de bosque o tierras forestales en el período comprendido entre las décadas de 1980-2014, se generaron los productos resultantes: Mapas temáticos de bosque, y mapas temáticos de uso del suelo.

#### 2.4.3.1. MAPAS TEMÁTICOS DE DEFORESTACIÓN

Utilizando la clase temática “bosque” se calcularon las siguientes tasas de deforestación (Puyravaud, 2003):

- Tasas de deforestación total anual promedio para un determinado período (D), donde:

$$D = \frac{(A1 - A2)}{t2 - t1}$$

A<sub>1</sub>: área de bosque inicial (ha)  
A<sub>2</sub>: área de bosque final (ha)  
t<sub>1</sub>: año inicial  
t<sub>2</sub>: año final

- Tasa de deforestación anual:

$$r = \left(\frac{A2}{A1}\right)^{\frac{1}{t2-t1}} - 1$$

r: tasa de deforestación  
A1: Área de bosque inicial (ha)  
A2: Área de bosque final (ha)  
t1: Año inicial  
t2: Año final

#### 2.4.3.2. MAPAS TEMÁTICOS DE USO AGRÍCOLA - DETECCION DE CAMBIOS

Los mapas de uso del suelo de áreas agrícolas, se extrajeron como resultado del cruzamiento de la clase temática “bosque”, con el módulo “*change detection*” en ENVI. El análisis de detección de cambios permite cuantificar las diferencias entre imágenes de la misma escena en diferentes momentos o en condiciones diferentes. Utilizando el módulo mencionado se compararon las coberturas de los siguientes años:

Tabla 2.5. Período del mapa de detección de cambios

Mapas temáticos	Período
Mapa 1	1980 – 1990
Mapa 2	1990 – 2000
Mapa 3	2000 – 2010
Mapa 4	2010 - 2014

Los resultados de aplicar el módulo *Change detection* responden a valores:

Tipos de cambios	Resultados	MAPAS
Cambios positivos	Sin cambios	Coberturas de bosque
Cambios negativos	Cambios	Coberturas agrícolas

En relación a la extensa área de trabajo, con motivo de simplificar los datos y que la utilización de los mismos sea más propicia, se aplicaron los siguientes tratamientos a los mapas resultantes de las coberturas agrícolas:

- Filtro de convolución de mediana 5x5, para suavizar las imágenes y reducir las variaciones entre los píxeles vecinos (eliminación de ruido). Con su posterior vectorización de las imágenes filtradas.
- Eliminación de polígonos menores a 50 has. Este procedimiento se realizó con el software QGIS, mediante el filtrado en la tabla de atributos.

### 2.4.3.3. MAPA TEMÁTICO DE NDVI

Los productos NDVI se generaron con la fórmula expuesta en el la figura 2.3, utilizando las imágenes (mapas binarios de bosque) Landsat-2014. Para determinar la vigorosidad de la cubierta boscosa se generaron umbrales. Los umbrales se determinaron con el programa QGIS 2.18.15. Para ello, se extrajo una muestra representativa de la banda NDVI y se generaron curvas de nivel (en formato vectorial), como muestra la figura 2.10.



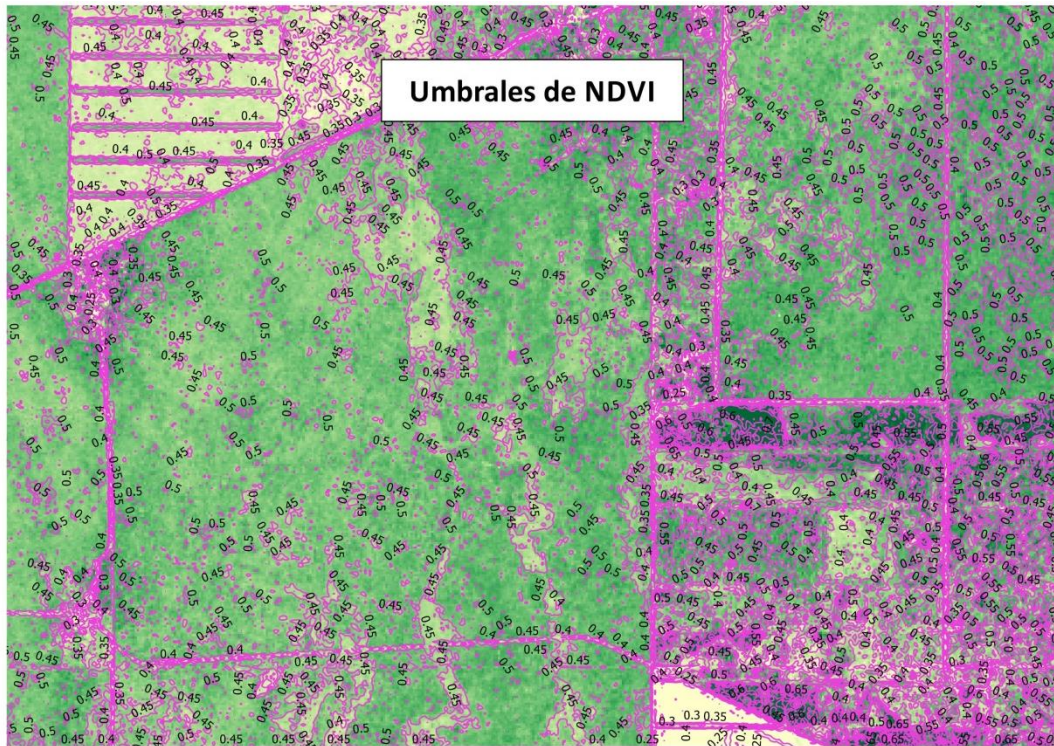


Figura 2.10. Detección de umbrales de NDVI, mediante curvas de nivel vectoriales

Finalmente, de acuerdo a los valores arrojados por las curvas de nivel expuestas en la figura 2.10, los umbrales resultantes fueron:

- NDVI bajo: (< 0.35)
- NDVI medio: [0.35 – 0.45]
- NDVI alto: (> 0.45)

## 2.5. RESULTADOS

### 2.5.1. DEFORESTACIÓN EN LA CUENCA DEL SALADO

Los resultados obtenidos en el presente capítulo indican que las superficies boscosas nativas disminuyeron un total de 1.310.660 hectáreas en un lapso de 30 años. Es decir, que de un 70% de cobertura original en el año 1984, se redujeron a un 43% en el 2014, en razón de 45.000 has/anuales. Las fluctuaciones en la dinámica de cambio espacio-temporal se muestran en la tabla (2.6), las cuales comprenden cuatro períodos: el período 1 (1984 y 1990); el período 2 (1990 y 2000); el período 3 (2000 y 2010); y el período 4 (2010 y 2014).

Tabla 2.6. Deforestación – período 1984-2014. Porcentajes en función del tamaño del área (cuenca). Fuente: Elaboración propia.

Período	Superficie (has)	% En relación a la sup. del área	Deforestación total anual	Tasa de deforestación anual
<b>1984</b>	3.377.502	70%	<b>Período</b>	
<b>1990</b>	3.206.369	67%	1: 1984- 1990	-0.87
<b>2000</b>	2.859.223	60%	2: 1990-2000	-1.15
<b>2010</b>	2.282.343	48%	3: 2000-2010	-2.25
<b>2014</b>	2.066.842	43%	4: 2010-2014	-2.48
<b>Total bosque</b>	<b>13.792.279</b>			
<b>Sup. de la Cuenca</b>	<b>4.794.660</b>			

Como se observa en la tabla 2.6, la mayor tasa de deforestación anual se produjo en el período 4, en -2,48% (en razón de 53.875 has/año). Otro período importante lo representa el período 3, con un valor de -2,25% (57.688 has/año). El período 2, fue de -1,15% (34.714). Finalmente, la tasa más baja corresponde al período 1, con un -0,87% (28.522 has/año). La siguiente figura (2.11), muestra las proporciones de bosque nativo de cada año, dicha tendencia marca el proceso de deforestación ocurrida en el área de estudio.

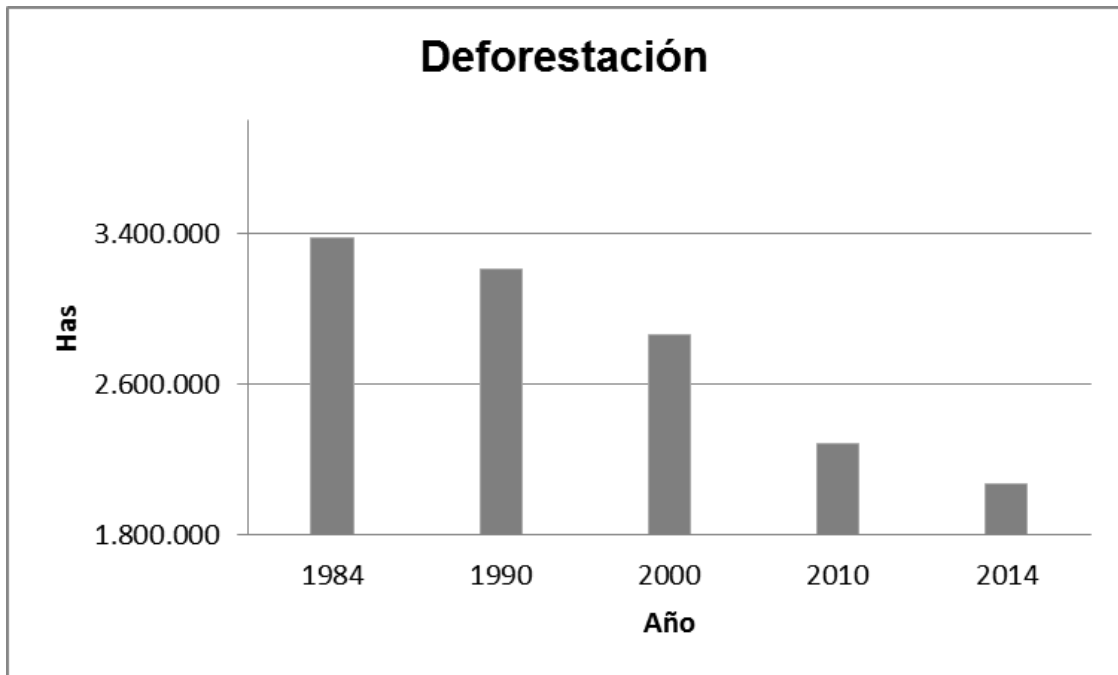


Figura 2.11. Superficies boscosas correspondientes a cada año.  
Fuente: elaboración propia

En la siguiente figura 2.12, se presentan los resultados obtenidos de los mapas binarios de bosques para cada período.

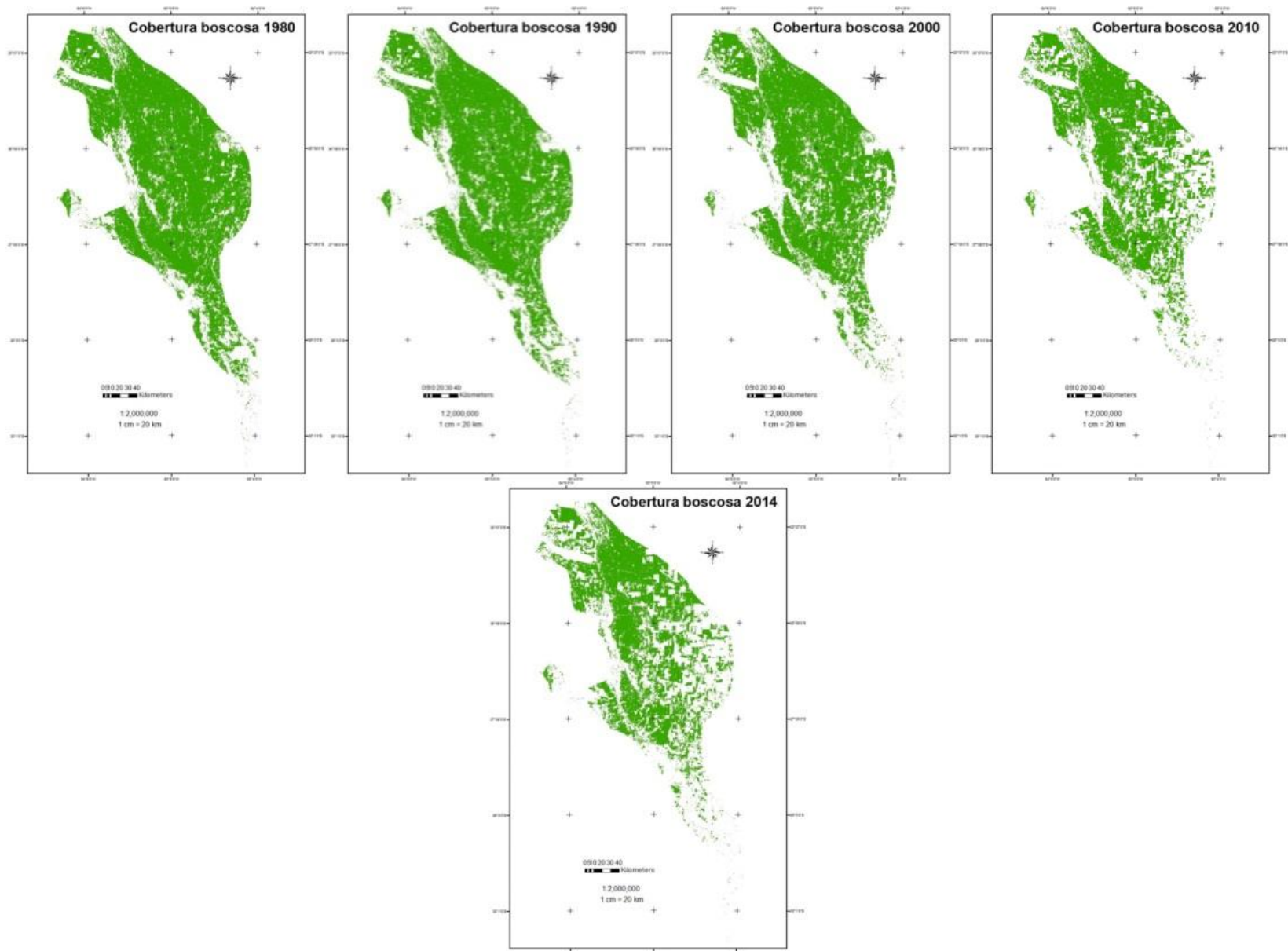


Figura 2.12. Mapas de las coberturas boscosas de los años: 1984, 1990, 2000, 2010 y 2014. Fuente: elaboración propia.

### 2.5.2. USO DEL SUELO: Desmonte para agricultura

El incremento de las áreas cultivadas destinadas a la agricultura de gran escala ha sido creciente de manera proporcional a la deforestación en la cuenca del río Salado durante el período 1984 - 2014. A fin de poder visualizar espacialmente las superficies deforestadas, se presenta la figura 2.13, (ver en detalle los desmontes por período en el anexo 2 - apartado c).

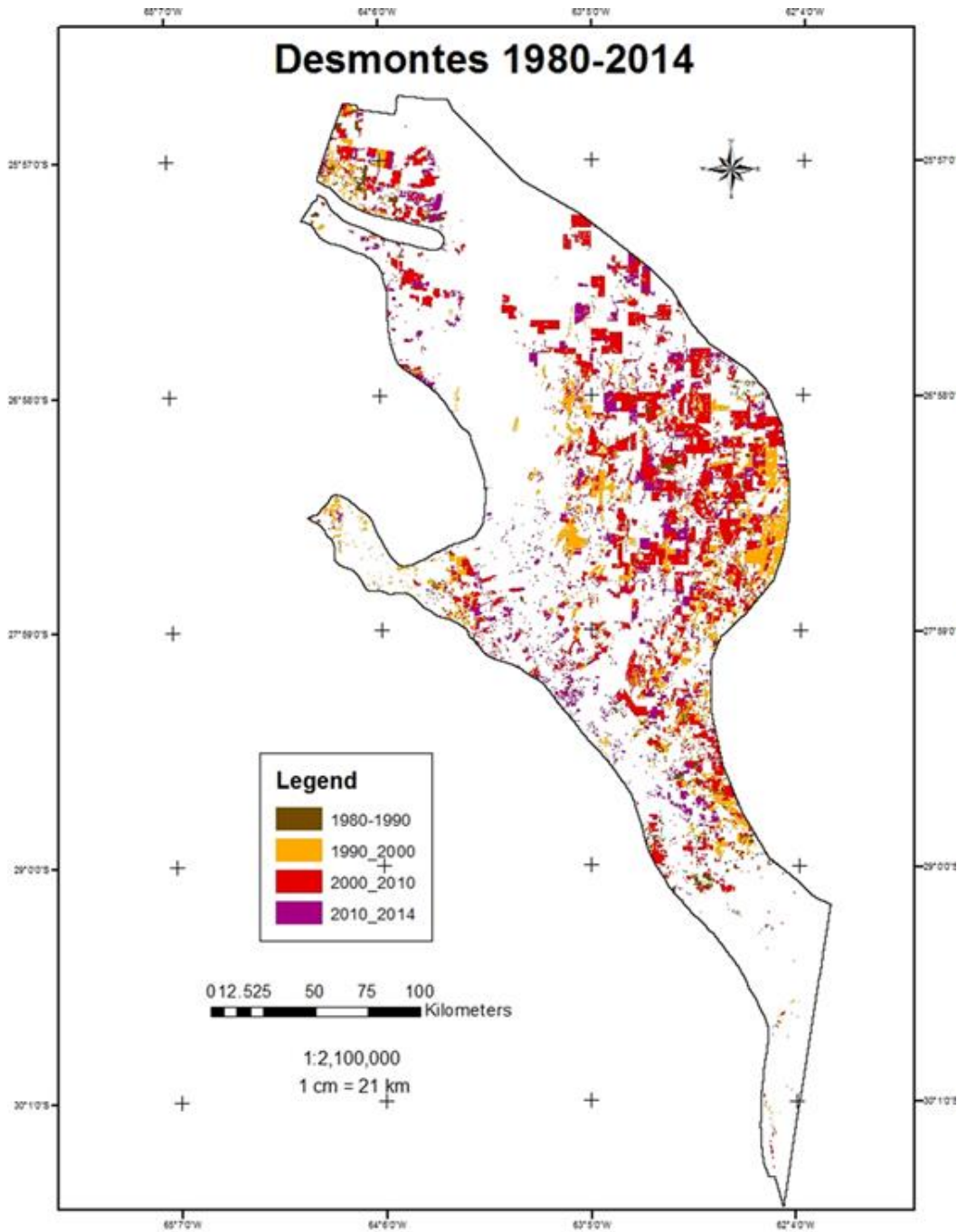


Figura 2.13. Cambio de uso del suelo. Cultivos durante el período 1984-2014.

Fuente: Elaboración propia

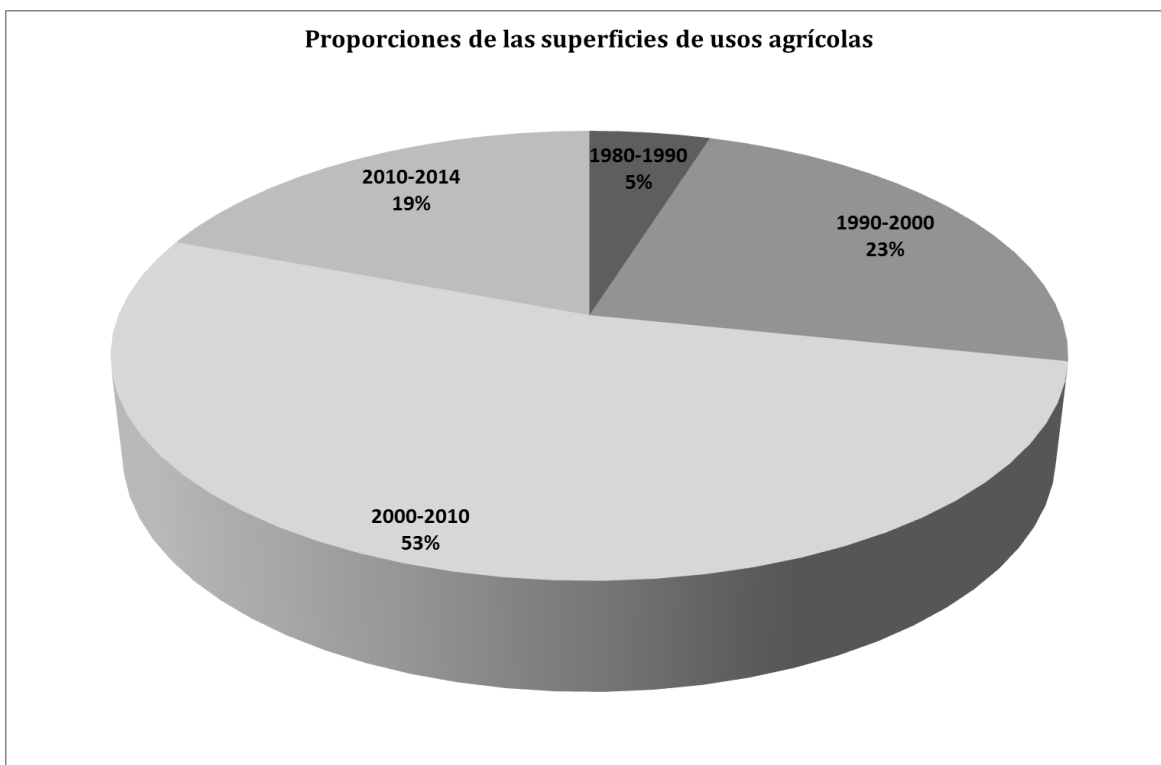


Figura 2.14. Gráfico de barra que expresa las proporciones de las superficies cultivadas entre 1984 y 2014.

En la figura 2.14, se pueden apreciar los porcentajes de las superficies cultivadas. De acuerdo a ello, en el período 1980-1990 las superficies corresponden a 55,310 has (5%), mientras que para el período 1990-2000 fueron de 266,875 has (23%). Los mayores incrementos se dieron en el período 2000-2010 con 598,627 has (53%); mientras que para el período 2010-2014 las superficies fueron de 218,714 has (19%).

En el anexo 2 (apartado c), se muestran imágenes fotográficas de la salida a campo realizada en el año 2014, en la zona que pertenece a la jurisdicción del INTA – Quimilí, departamento Moreno de la provincia de Santiago del Estero. La región es una de las zonas más afectadas por la actividad agrícola.

En relación a las áreas quemadas como herramienta de manejo del bosque, a modo de ejemplo, en la siguiente figura (2.15), se observa un episodio de quema, cuyo origen se localizó en abril de 1995 (Landsat TM 229/79), modificando el paisaje de bosque a pastizal que perdura hasta el año 2014, con una longitud de alrededor de 26 km. A tal efecto, el cambio de uso del suelo de la década de los 90 se caracterizó por sus formas irregulares y alargadas propio de los incendios forestales para dar lugar a la apertura del bosque (anexo 2, apartado d)

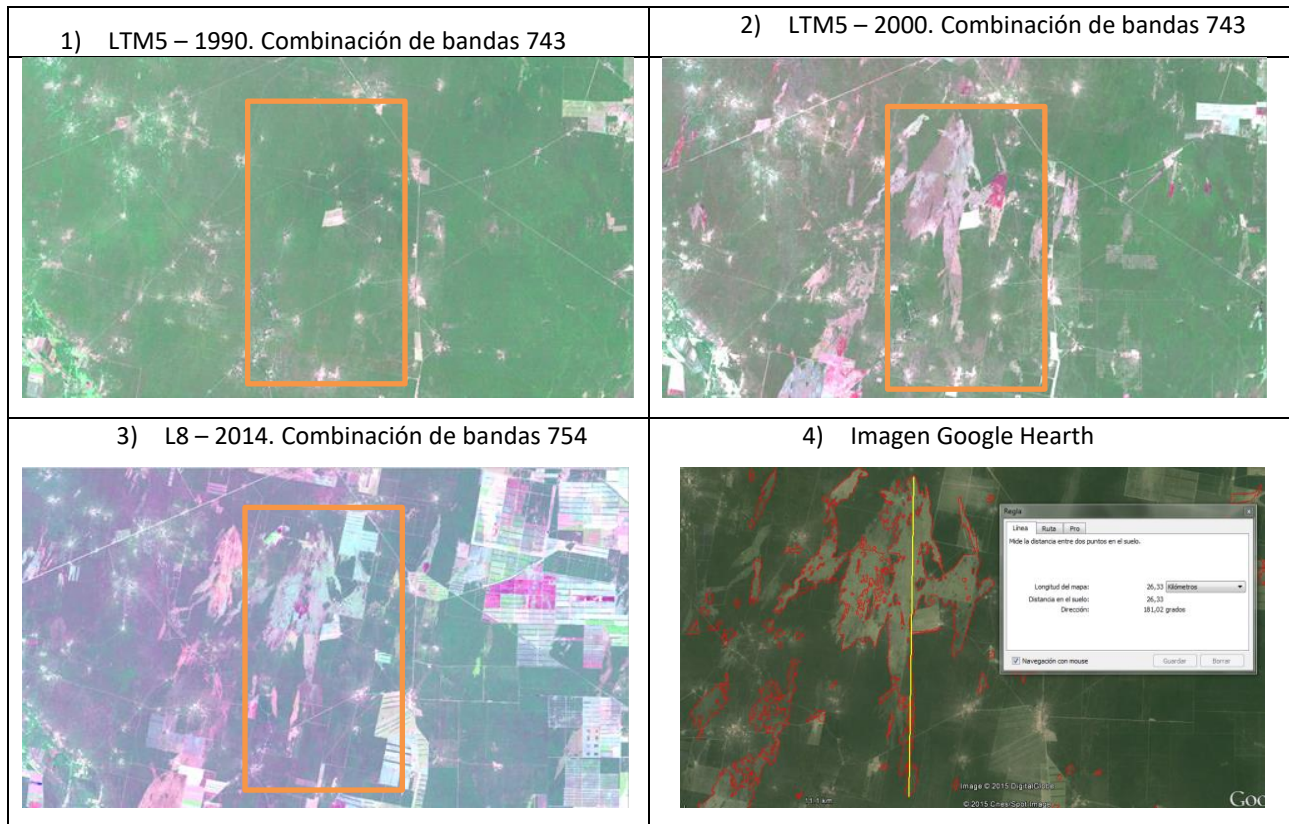


Figura 2.15. Secuencia de imágenes que muestran la persistencia de las áreas quemadas.

### 2.5.3. MAPA DEL ÍNDICE NDVI

En el mapa de NDVI, sus valores representan tres niveles de verdor de la vegetación de acuerdo a los resultados del mapa de NDVI del año 2014 (figura 2.16). En el mismo se puede observar la región Oriental con mayor actividad fotosintética, coincidiendo con un mayor gradiente de precipitaciones. Cuanto más alto es el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores, y por lo tanto mayor aptitud de los suelos.

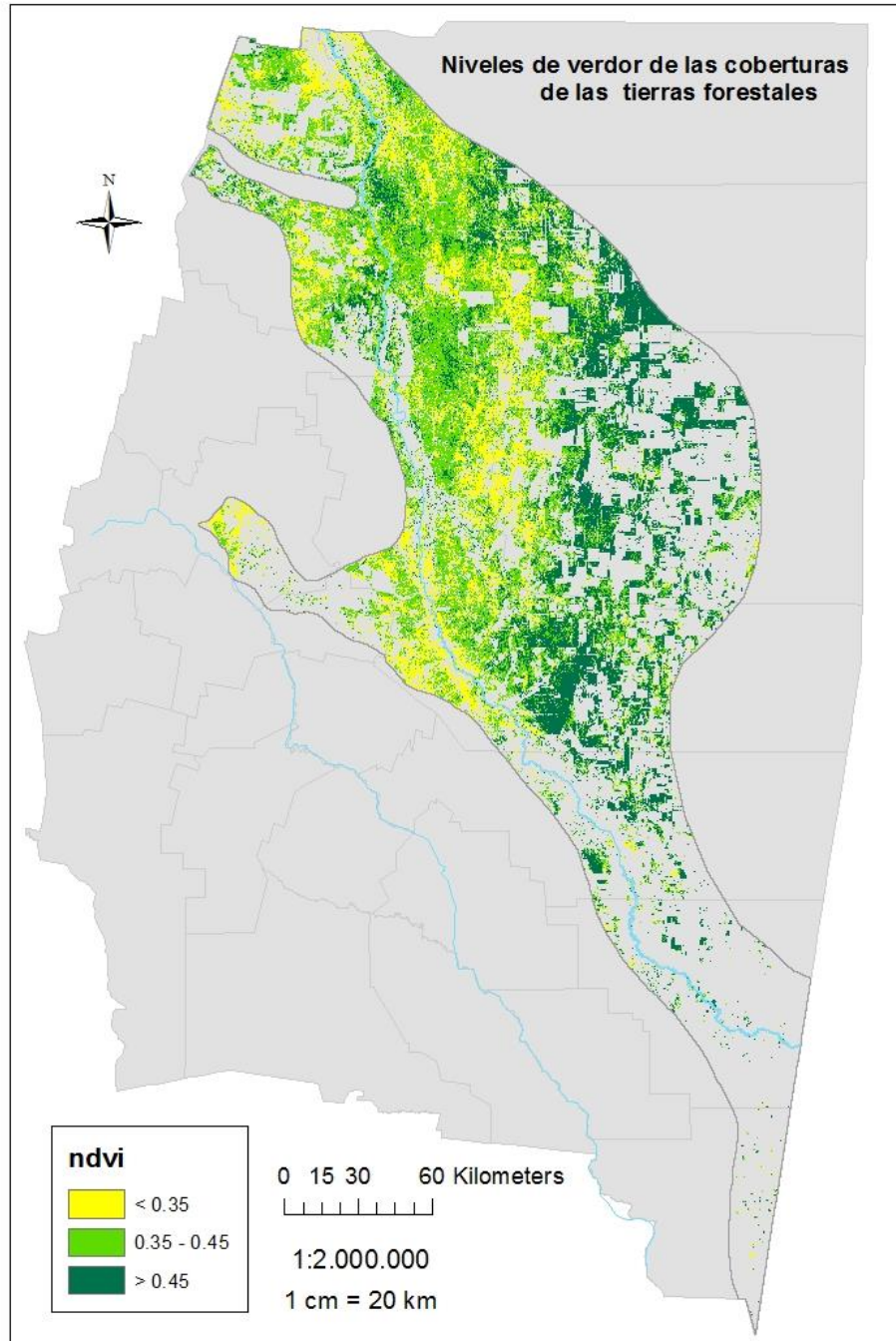


Figura 2.16. Tipos de coberturas asociadas al nivel de verdor (NDVI).  
Fuente: Elaboración propia.

Hacia el Este de la cuenca donde los valores de NDVI son sensiblemente mayores se concentran más profusamente las áreas destinadas a la agricultura (figura 2.17). En Santiago del Estero, las



áreas más deforestadas se corresponden con las zonas más húmedas, favorecidas por el gradiente de precipitación que aumenta de Oeste a Este.

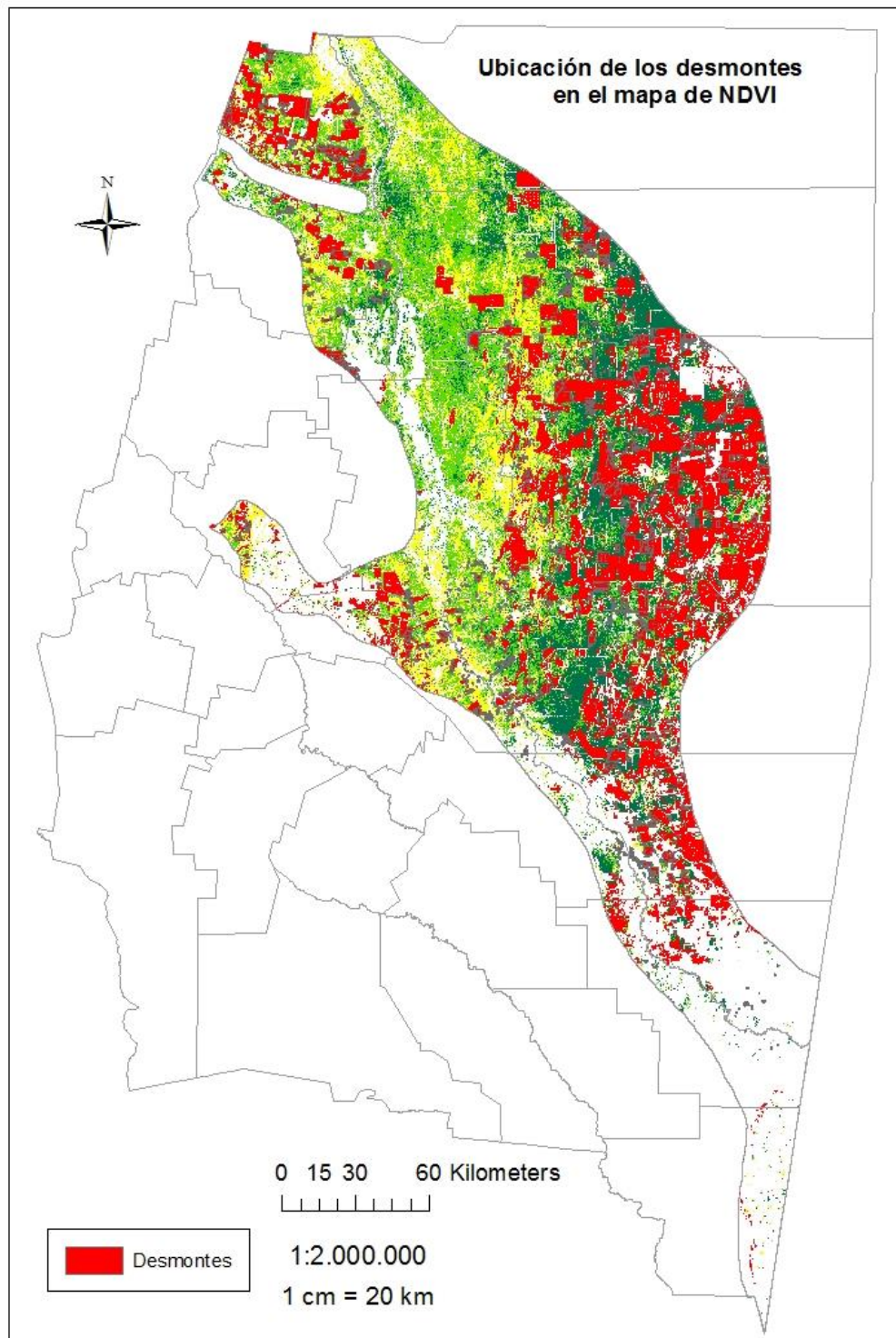


Figura 2.17. Mapa que muestra la preponderancia de los desmontes en regiones cuyos valores de NDVI son mayores. Fuente: Elaboración propia.

## 2.6. DISCUSIONES

La expansión agrícola en la región Chaqueña ocurrió principalmente por reemplazo de montes nativos (Volante *et al.*, 2005). En las imágenes de satélites, las superficies agrícolas se diferencian de las forestales por sus patrones simétricos y una textura casi lisa, las cuales contrastan con las coberturas rugosas de los bosques (Dos Santos, 1994). Los grandes cambios ocurridos en el área de estudio se deben a la actividad agrícola como principal factor causante.

Según los resultados obtenidos, las tasas de deforestaciones más críticas corresponden a los períodos 3 (2000-2010) y 4 (2010-2014). La tasa más elevada fue de -2,48% (período 4), en razón de 215.500 has respectivamente, contemplando sólo 4 años de análisis, por lo que la velocidad de deforestación es más alta. Luego le sigue el período 3, con una tasa de -2,25%, con alrededor de 570.000 has deforestadas, siendo el registro más alto en cuanto a superficie. Los períodos 1 (1984- 1990) y 2 (1990-2000) fueron menores, en razón de -1,15%, 350.000 has para el periodo 2; y de -0,87% (171.000 has) para el período 1.

Resultados similares en la región se desprenden de los trabajos de Montenegro *et al.* (2015); Volante *et al.* (2005); Paruelo *et al.* (2005). Los registros oficiales de la SAyDS estimaron que las mayores pérdidas de bosque nativo definidas como “Tierras Forestales - TF”<sup>1</sup> y “Otras Tierras Forestales - OTF”<sup>2</sup> se registraron en el Parque Chaqueño. En la provincia de Santiago del Estero entre los años 2006 y 2014 las pérdidas de TF y OTF fueron de 921.711 has.

Las investigaciones derivadas de Morello *et al.*, (2012) indican que se dieron diferentes pulsos de cambio en la ocupación del suelo, hacia la década de los ochenta los cambios representaron pequeñas superficies aisladas de agricultura, cuyos cultivos predominantes fueron los algodonereros; a partir de los noventa surgen pequeñas áreas agrícolas, en su mayoría de formas alargadas propias de superficies quemadas o focos de incendios, con una fuerte tendencia hacia las llamadas “abras del monte”, donde comienza un proceso de apertura del bosque para dar

---

<sup>1</sup> Tierras con una cobertura arbórea de especies nativas mayor o igual al 20% con árboles que alcanzan una altura mínima de 7 m.

<sup>2</sup> Tierras con una cobertura arbórea de especies nativas entre 5 y 20% con árboles que alcanzan una altura de 7 m; o tierras con una cobertura arbórea mayor o igual al 20% donde los árboles presentan una altura menor a 7 m; o tierras que presentan al menos un 20 % de cobertura arbustiva con arbustos de altura mínima de 0,5 m. Se incluyen bosques en galería, palmares, cañaverales y arbustales.

lugar a la frontera agrícola industrial, la cual se pronuncia más fuertemente en la siguiente etapa denominada “pampeanización”. Los incendios durante la década de los noventa, fueron una herramienta fundamental para la apertura del bosque, quedando algunas cicatrices quilométricas que luego perduraron y se transformaron en grandes áreas de pastizales (Boletta, 2011).

El índice NDVI identifica la presencia de la vegetación vigorosa y su distribución espacial, es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación, la productividad primaria, y representa una variable integradora del funcionamiento del ecosistema (Chuvieco, 2010). En la provincia de Santiago del Estero, el gradiente de precipitación aumenta de Oeste a Este, y en consecuencia, en la región oriental existe mayor actividad fotosintética. Los resultados de los mapas de NDVI diferencian las variaciones de la vegetación hacia el Este de la cuenca, ubicando valores altos de NDVI con fuerte presencia agraria, por lo tanto, las áreas más deforestadas se corresponden con las zonas de mayor humedad. En los últimos decenios de años, consecuencia del paulatino aumento de las precipitaciones medias, particularmente en la zona centro y norte del país, se produjo un corrimiento de las isoyetas hacia el Este, donde las lluvias fueron en aumento y en consecuencia las condiciones medioambientales para la agricultura (Volante et al., 2005). A tales efectos, los grandes cambios de ocupación del suelo se relaciona con un aumento paulatino de las precipitaciones en la región en los últimos decenios, instalándose una fase húmeda a mediados de los años setenta, y con ello se mejoraron las aptitudes agroambientales regionales de la frontera agrícola (boletta *et al.*, 2006; Paruelo et al. 2005; Sierra *et al.*, 1994).

Particularmente, en la provincia de Santiago del Estero no solo las condiciones favorables climáticas jugaron un papel importante, otro factor que marcó la apertura industrial de la agricultura fue la accesibilidad a las tierras, debido al bajo precios en el mercado (Boletta, 2006; Zerda, 2006; Zerda, 2009), y la poca valorización del bosque nativo como uso alternativo.

La tendencia del desarrollo agrícola en Santiago del Estero, ha sido muchas veces, económicamente rentable para algunos sectores de la población, pero trajo como consecuencia la sobreexplotación de los suelos, favoreciendo la desertificación de extensas zonas de la provincia. El laboreo del suelo destinado a los cultivos anuales se efectúa mediante tecnologías

incorporadas desde la Pampa Húmeda produciendo, en una zona expuesta a fuertes vientos calientes, la alteración de la estructura del suelo y la erosión eólica del mismo (Moscuza *et al.*, 2003).

La aplicación de técnicas de teledetección para el estudio de las transformaciones de las áreas boscosas en la cuenca del río Salado de la provincia de Santiago del Estero resultó una herramienta de gran utilidad, permitiendo analizar la dinámica de cambio del tipo cualitativo y cuantitativo y su distribución espacial.

## CAPÍTULO 3. INDICES DE CALIDAD AMBIENTAL

### 3.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los ambientes están sometidos a transformaciones que son formas de degradación (Blum, 1998). Sus orígenes pueden vincularse a procesos de origen natural, donde generalmente suelen ser compensados mediante el potencial inherente a estos sistemas para recuperarse (resiliencia). Cuando los procesos de degradación exceden la capacidad natural de recuperación, suelen estar relacionados con las presiones de las actividades antrópicas (Citado en: Lavado Contador *et al.*, 2010).

La degradación ambiental representa un fenómeno relevante, y se extiende por gran parte del planeta, principalmente en regiones donde los suelos han perdido resiliencia y capacidad de producción. Este fenómeno generalmente se relaciona con elementos climáticos adversos principalmente en regiones con características de semiaridez como una de las principales limitaciones ambientales (Trisorio-Liuzzi & Hamdy, 2002). “Un conjunto de procesos de degradación, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde el agua es el principal factor limitante en la productividad de los ecosistemas, traen consecuencias a procesos de desertificación”. Procesos como la desertificación, ocurrirá si ciertos componentes del sistema son llevados más allá de umbrales específicos, más allá de los cuales un cambio posterior es irreversible (Kosmas *et al.*, 1999).

*“La aplicación del capítulo 40 de la Agenda 21 condujo al desarrollo de diversas metodologías que determinaron el uso generalizado de indicadores e índices para la evaluación de la calidad ambiental, calidad de suelos, sustentabilidad, desarrollo sustentable, riesgo, vulnerabilidad, planificación territorial etc. El antecedente más importante surgió de la Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD, 1991) cuando publicó un set preliminar de indicadores ambientales. Posteriormente, otras organizaciones han desarrollado programas donde se establecieron lista de indicadores para evaluar la calidad ambiental, tal como FAO, Banco Mundial, UN Development Program.*

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante (Cantú, *et al.*, 2007).

“El nuevo paradigma del Desarrollo Sustentable, establece el necesario equilibrio entre las actividades productivas, el bienestar social y la conservación ambiental. Los modelos de

sensibilidad ambiental son un primer paso en la búsqueda de esta armonía” (Rebolledo, 2009).

## **3.2. OBJETIVOS ABORDADOS EN EL CAPÍTULO**

En este capítulo, el objetivo está enfocado a determinar la calidad ambiental de la cuenca del río Salado, mediante el desarrollo y la aplicación de dos tipos de índices: el índice de sensibilidad a la degradación, y el índice de sitios prioritarios de conservación, a través de la utilización de Sistemas de Información Geográfica como principal herramienta.

## **3.3. MARCO TEÓRICO**

### **3.3.1. LOS SIG EN EL ANÁLISIS AMBIENTAL**

Nos encontramos en una era donde la información y la tecnología se retroaccionan constantemente, lo que hace posible la complejización de ambas funcionando como un conjunto en continuo movimiento. Estas bases junto a las ciencias geográficas componen los pilares que posibilitan el desarrollo de los Sistema de Información Geográfico (SIG).

Existen diversas concepciones para definir un SIG, pero en términos generales, los autores García León *et al.*, 2013 y Olaya, 2011 coinciden en que es una potente herramienta de carácter integradora y completa, que combina la componente humana con tecnología informática e información geográfica; es decir, desarrolla una componente espacial y una temática mediante datos georreferenciados. Pero sobre todo un SIG es un sistema complejo orientado a resolver un problema concreto, y es mediante la gestión de los datos que captura la información, la analiza, almacena y la edita para obtener un resultado de ese análisis.

La información geográfica es la información que se sitúa en un mapa; y está compuesta por una *componente espacial* que representa la posición de un sistema de referencia establecido; y por una *componente temática* que contiene información fundamental y sirve de soporte a la espacial; es decir, estas componentes responden a los interrogatorios del tipo “*dónde*” se encuentra el objeto y “*qué*” representa. En los SIG la información geográfica se presenta de dos formas para modelizar la realidad o representar los datos, vectorial y ráster.

*Modelo vectorial*, almacena la información espacial mediante una serie de elementos geométricos, a los que vincula sus datos alfanuméricos que constituyen su atributo.

Modeliza el espacio geográfico mediante entidades geométricas llamadas puntos, líneas y polígonos. La información alfanumérica se organiza en forma de tablas en las que a cada elemento le corresponde una fila (figura 3.1).


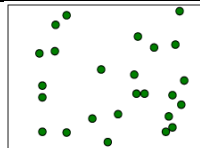

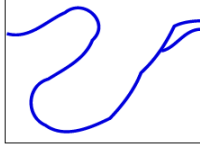

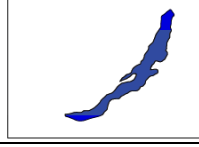
Vectores	Entidad espacial	Representación	Atributos															
Puntos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Altura</th> <th>Diámetro Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>17.5</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>45.6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> <td>27.2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>19.7</td> <td>36.1</td> </tr> </tbody> </table>	ID	Altura	Diámetro Normal	1	17.5	35	2	22	45.6	3	15	27.2	4	19.7	36.1
	ID	Altura	Diámetro Normal															
1	17.5	35																
2	22	45.6																
3	15	27.2																
4	19.7	36.1																
Líneas			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho máx.(m)</th> <th>Calado máx.(m)</th> <th>Longitud(km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>4.3</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>3.9</td> <td>5.2</td> </tr> </tbody> </table>	Ancho máx.(m)	Calado máx.(m)	Longitud(km)	15	4.3	35	6.3	3.9	5.2						
	Ancho máx.(m)	Calado máx.(m)	Longitud(km)															
15	4.3	35																
6.3	3.9	5.2																
Polígonos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie(km²)</th> <th>Profundidad máx.(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31494</td> <td>1637</td> </tr> </tbody> </table>	Superficie(km²)	Profundidad máx.(m)	31494	1637											
Superficie(km²)	Profundidad máx.(m)																	
31494	1637																	

Figura 3.1. Representación del modelo vectorial: puntos, líneas y polígonos

*Modelo ráster*, divide sistemáticamente el espacio en forma matricial, cuyas unidades elementales se componen como celdas. El píxel o celda, representa la unidad mínima del modelo ráster. Conociendo las coordenadas del centro de un píxel y el tamaño de la matriz, se puede calcular las coordenadas del resto; sin embargo éstas no representan las coordenadas reales de los elementos; para ello es necesario georreferenciarlas. A mayor dimensión de las celdas, menor es la resolución y menor la escala de visualización. La parte temática de la información ráster se realiza asignando valores numéricos a cada celda (figura 3.2).

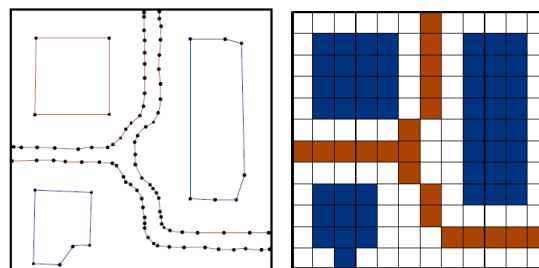


Figura 3.2. Representación, vectorial (a) y ráster (b)

Las *capas de información* permiten la correcta estructuración de la información y el trabajo desarrollado. Posibilitan dividir la información espacial de un área determinada en varios niveles, de esta manera distintas variables se encuentran recogida de manera independiente (figura 3.3). Distintas capas como núcleos urbanos, redes viales, vegetación

etcétera componen un mapa, pudiendo visualizarse como una unidad coherente de información geográfica, ya sea de manera independiente o combinada en una misma escala, actuando como un elemento fundamental de un SIG y permitiendo gestionar los datos para la resolución de problemas.



Figura 3.3. Capas temáticas, división vertical de un SIG.

**Quantum Gis** (QGIS), es un Sistema de Información Geográfica de código libre (<http://www.qgis.org/>) para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows.

Este software permite manejar formatos raster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL/OGR, así como bases de datos. Algunas de sus características son:

Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.

Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, etc.

Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.). Una de sus mayores ventajas es la posibilidad de usar Quantum GIS como GUI del SIG GRASS, utilizando toda la potencia de análisis de este último en un entorno de trabajo más amigable. QGIS está desarrollado en C++, usando la biblioteca Qt para su Interfaz gráfica de usuario. Además, permite la integración de plugins desarrollados tanto en C++ como Python.



### **3.3.2. EL ANALISIS DE LA DEGRADACIÓN COMO FORMA DE ABORDAR LA CALIDAD AMBIENTAL**

Una de las principales líneas para evaluar la calidad ambiental de una determinada región es el análisis de la degradación. La degradación de las tierras es considerada como uno de los principales procesos que afectan al planeta, e implica la reducción de los recursos naturales, entre los que se destacan los niveles de productividad primaria, la capacidad agraria y las funciones bióticas del sistema (Sombroek & El Hadji, 1993).

La sostenibilidad medioambiental necesita que los riesgos relacionados con la degradación sean analizados en función de los procesos dominantes a escala local o regional.

Es importante identificar los procesos conducentes a la degradación para comprender localmente el fenómeno, en este sentido en las últimas décadas se han desarrollado numerosos estudios que pretenden clarificar los elementos críticos de la degradación y las formas de abordar su análisis. Los autores Lavado Contador *et al.*, 2010, han realizado un análisis de la sensibilidad ambiental a la degradación en Extremadura (SO de España), en el contexto del proyecto europeo MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use), identificándose áreas con diferente grado de sensibilidad ambiental por medio del cálculo de un índice (Índice de Sensibilidad Ambiental, ESAI) que incorpora información relativa a factores de calidad ambiental (clima, suelo y vegetación), y de origen antrópico relacionados con el uso y manejo del suelo, mediante la componente cartográfica. Al igual que Kosmas *et al.*, (1999) confeccionaron índices basado en un sistema de información geográfica, aportando capas constituyentes mediante parámetros fácilmente obtenibles de la base de datos y cartografía temática disponible, abarcando aspectos ambientales como el suelo, el clima y la vegetación; y aspectos sociales o antropogénicos, como uso y manejo del suelo. Cada uno de los elementos claves se estudió mediante índices parciales de calidad de suelo, clima, vegetación y usos/manejos; cuyos parámetros fueron clasificados en función de rangos o tipos de valores y a cada clase fue asignado un peso en función de su relevancia o influencia en los procesos de degradación.

Un estudio similar se presentó en el Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (CPDI) de Venezuela, quienes desarrollaron una metodología para generar modelos de sensibilidad ambiental mediante el análisis de las relaciones espaciales entre información temática y la implementación de actividades antrópicas susceptibles de generar impactos al ambiente, Pág. 63

utilizando los componentes ambientales para su análisis: físico e infraestructuras (hidrología, geología, geomorfología, vialidad); componente biológico (vegetación y uso de la tierra); y la componente legal (normas, planes de ordenación, restricciones de uso, etc).

Sandía Randón & Vásquez, (2009), realizaron una aplicación de técnicas de análisis de sensibilidad ambiental a partir del uso de SIG, determinando las áreas de mayor potencialidades para los usos agrícolas, turístico, residencial y conservacionista de la cuenca del río Burbusay en el estado de Trujillo, Venezuela. *“Por sensibilidad ambiental se entiende el potencial de afectación (transformación o cambio) que pueden sufrir o generar los componentes ambientales como resultado de la alteración de los procesos físicos, bióticos y socioeconómicos que lo caracterizan, debido a los procesos de intervención humana o al desarrollo de procesos naturales de desestabilización. La identificación de la sensibilidad ambiental implica el establecimiento de criterios de valoración de las componentes ambientales desde la condición de mayor sensibilidad o vulnerabilidad hasta las condiciones de menor sensibilidad ambiental”*.

*“En el sur oeste de la provincia de Córdoba (Argentina), se desarrolló y aplicó un índice de Calidad Ambiental mediante la agregación de indicadores utilizando el modelo PSR (Presión, Estado y Respuesta). Además se evaluaron parámetros del suelo como potenciales indicadores de calidad aplicando el modelo PSR e incorporando un modelo que contempla las funciones del suelo (fuente de recursos y sumidero de residuos)”* (Cantú et al., 2001. Cantú et al., 2002. Citado en Cantú et al., 2007).

### **3.3.3. INDICADORES COMO INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN AMBIENTAL**

Los indicadores se utilizan a menudo como un indicio, un signo de que algo está pasando. Por ejemplo, un suelo mal drenado puede ser un indicador de degradación o desertificación, pero éste no nos informa definitivamente que profundidad del suelo, textura, cubierta vegetal, etc.

La Agencia Europea de Medio Ambiente define un indicador como "un parámetro o valor sacado de parámetros, que proporciona información sobre un fenómeno. Los indicadores son información cuantificada que ayuda a explicar cómo cambian las cosas en el tiempo y cómo varían espacialmente. Los indicadores generalmente simplifican la realidad para hacer

cuantificables los fenómenos complejos, de modo que la información pueda ser comunicada". La determinación de un indicador u otro depende de la escala de trabajo, pero sobre todo de la disponibilidad de datos recopilados, su amplitud espacial y su amplitud temporal. Las metodologías conducentes a realizar los índices se basan en indicadores que vierten cierta información y que conduce al análisis de un determinado territorio. *Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante* (Cantú et al., 2007).

Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser variables cualitativas o nominales o de rango u ordinal, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados.

Las principales funciones de los indicadores son (Gallopín, 1997; Doran & Zeiss, 2000):

- Evalúan condiciones o tendencias
- Comparan transversalmente sitios o situaciones para evaluar metas y objetivos
- Proveen información preventiva temprana y anticipan condiciones y tendencias futuras.

Los indicadores deben ser:

- Limitados en número y manejables por diversos tipos de usuarios
- Sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación, es decir, deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades.
- Interdisciplinarios, en lo posible deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones por lo tanto incluir todo tipo de características de los suelos (químicas, físicas, biológicas etc)
- Tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas. Asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales, pero suficientemente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos.

### 3.3.4. INDICADORES CLAVES PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL

Kosmas *et al.*, (1999), especifican una serie de indicadores claves para definir áreas medioambientales sensibles a la desertificación, y se dividen en cuatro amplias categorías que definen la calidad del suelo, la calidad del clima, la calidad de la vegetación y la calidad de la gestión (indicadores de estrés).

#### ▪ **Indicadores de la calidad del suelo**

El suelo es un factor dominante de los ecosistemas terrestres particularmente en zonas semiáridas a través de su efecto sobre la producción de biomasa. Procesos como la degradación o en su peor escenario la desertificación incidirá en un cierto paisaje, cuando el suelo no sea capaz de proporcionar a las plantas un espacio de enraizamiento, de agua y de nutrientes. Los indicadores de calidad del suelo pueden relacionarse con la disponibilidad de agua y la resistencia a la erosión. Estas cualidades pueden evaluarse mediante el uso de propiedades o características simples del suelo tales como profundidad, textura, pendiente etc.

La **profundidad del suelo** representa un factor limitante para el desarrollo de las raíces de las plantas, la disponibilidad de agua y nutrientes, afectando además la infiltración y la labranza del suelo. Las plantas utilizan el suelo a profundidades que van desde pocos centímetros a más de un metro, dependiendo del tipo de plantas presentes.

La **textura** se define como la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo.

La **capacidad de drenaje** de un suelo se relaciona a la capacidad de movimiento del agua en el suelo o capacidad de campo y es función de la textura, estructura etc. Cuanto mayor es el ángulo de la pendiente de la tierra y la longitud de esa pendiente, mayor será la erosión del suelo. Un aumento del ángulo de la **pendiente** produce un aumento de la velocidad de escorrentía y con ello la energía cinética del agua causa una mayor erosión.

La **materia orgánica** del suelo está compuesta por todos los materiales orgánicos muertos tanto de origen animal o vegetal, junto con los productos orgánicos producidos en su transformación. La materia orgánica favorece la formación de una estructura estable de agregados en el suelo por medio de la estrecha asociación de las arcillas con la materia

orgánica; esta asociación incrementa la capacidad de retención de agua ya que puede absorber de tres a cinco veces más de su propio peso (FAO, 2000).

#### ▪ **Indicadores de la calidad climática**

La distribución desigual de las precipitaciones (anual e interanual), los fenómenos extremos y la falta de adecuación de las estaciones lluviosas y vegetativas en las zonas áridas y semiáridas de regiones mediterráneas son los principales atributos climáticos que contribuyen a la degradación de la tierra. En zonas climáticas, la tierra es inestable y los procesos de degradación se desencadenan sólo si se cruzan umbrales. Las condiciones atmosféricas que caracterizan un clima desértico son aquellas que crean grandes déficits hídricos, es decir, una evapotranspiración potencial mucho mayor que la precipitación. La cantidad y distribución de las precipitaciones son los principales factores determinantes de la producción de biomasa, las cantidades decrecientes de lluvia combinadas con altas tasas de evapotranspiración reducen drásticamente el contenido de humedad del suelo disponible para el crecimiento de las plantas. A su vez, la producción reducida de biomasa afecta directamente el contenido de materia orgánica del suelo y la producción de biomasa.

#### **Indicadores de la calidad de la vegetación**

Los principales indicadores relacionados con la vegetación natural pueden considerarse en relación a: el riesgo de incendio y capacidad de recuperación; protección contra la erosión ofrecida al suelo; resistencia a la sequía; y porcentaje de cubierta vegetal.

La *continuidad de la vegetación* reviste una vital importancia para los procesos ecológicos, determinando el patrón normal de comportamiento de un determinado organismo, como la alimentación y la estructura social (Vila Subirós, 2005). En procesos que tienen que ver con la fragmentación de hábitats, los fragmentos más extensos que existen en un determinado paisaje aportan información valiosa acerca del estado de conservación de un determinado ambiente, ya que en áreas continuas y extensas las poblaciones de especies animales y vegetales, tienen mayores posibilidades para superar las posibles alteraciones externas al área, en tanto que en áreas más pequeñas, las alteraciones llegan al área núcleo (Turner et al., 2001).

### 3.4. METODOLOGÍA

Es posible establecer criterios de calidad ambiental mediante la valoración de las componentes ambientales, desde las condiciones de mayor a menor sensibilidad, vulnerabilidad o estados de conservación. En este trabajo, la valoración del estado actual de la cuenca se determinará mediante la confección de índices de calidad ambiental para confluir información derivada del potencial que poseen las herramientas de los sistemas de información geográfica, y facilitar la comprensión del grado de respuesta que pueden tener los componentes del medio físico natural a los procesos de intervención antrópica.

En términos generales, los índices se confeccionan determinando ciertos parámetros denominados indicadores o índices parciales. La combinación de los indicadores representan los índices.

Los índices desarrollados en el presente capítulo se denominan,

- Índice de Sensibilidad a la Degradación (ISD)
- Índice de Sitios Prioritarios de Conservación (ISPC)

Al ser la fuente de datos de los indicadores provenientes de diferentes sensores, plataformas, datos (vectorial y raster), ha sido necesario unificar transformando todos los datos a un formato raster, con un tamaño de pixel de 30x30m (tomando como referencia las imágenes LANDSAT8 utilizadas en el capítulo 2), procedimiento en común para ambos índices (ISD/ISPC).

Entre los programas computacionales utilizados fueron: ENVI 4.8 y el lenguaje de desarrollo IDL (Interactive Data language) el cual permite extender las funcionalidades de ENVI y crear rutinas propias; Qgis 2.8.1-Wien. El software ENVI ha sido imprescindible a la hora de leer y visualizar diferentes naturaleza de datos en cuanto a formatos, tamaños y plataformas, uniformando la información mediante el módulo *Layer Stacking*, además de manejar datos pesados. Con el módulo *Layer Stacking* se resampearon todas las bandas que se usaron en los índices, provenientes de distintos sensores, a un tamaño de pixel de 30x30 metros (tomando como base las imágenes Landsat). Luego a través de *band math* se calcularon los respectivos índices.

### 3.4.1. ÍNDICE DE SENSIBILIDAD A LA DEGRADACIÓN (ISD)

La metodología utilizada en el presente índice se adapta al trabajo de Lavado Contador Lavado Contador *et al.*, (2010) aplicado en Extremadura (España). Zona mediterránea y semiárida, características coincidentes con la región donde se enmascara el presente trabajo.

El índice de sensibilidad ambiental a la degradación está determinado por la combinación de factores críticos o propensos a causar una degradación medioambiental, y se realizó combinando una serie de parámetros o capas constituyentes denominados indicadores. Estos indicadores son elementos claves desde el punto de vista de la degradación, escogidos por medio de base de datos y cartografía temática disponible. Los indicadores seleccionados son los que determinan la calidad de la superficie terrestre, para los cuales se mencionan: la calidad del suelo, la calidad del clima, la calidad de la vegetación y de manejo.

Cada uno de los parámetros o indicadores fueron clasificados en función de rangos, asignándoles un peso en función de la relevancia en los procesos de degradación; variando de 1 (mejor clase) para los menos sensibles; hasta 3 (peor clase) o clase más sensible a la degradación.

El cálculo de los índices parciales de calidad o indicadores, se calculó como la media geométrica de los diferentes parámetros que se muestran a continuación.

<b>PCS</b>	=	(Profundidad * Textura * Drenaje * Pendiente* Materia Orgánica) <sup>1/5</sup>
<b>IPCC</b>	=	(Precipitación Acumulada * Frecuencia de Inundaciones *Pisos altimétricos * Índice de aridez) <sup>1/3</sup>
<b>IPCV</b>	=	(Continuidad de la Vegetación leñosa * Vigor de la vegetación) <sup>1/2</sup>
<b>IPCM</b>	=	Intensidad del uso del suelo

PCS (Índice Parcial de Calidad del Suelo). IPCC (Índice Parcial de Calidad del Clima). IPCV (Índice Parcial de Calidad de la Veg.). IPCM (Índice Parcial de calidad de manejo)

Finalmente el índice final ISD (Índice de Sensibilidad a la Degradación) se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$ISD = (ICS * ICC * ICV * ICM)^{1/4}$$

Para la interpretación del ISD se utilizó una escala o valores, ordenados en función del grado de sensibilidad:

- Áreas con baja afectación (N)

- Áreas potenciales (P)
- Áreas frágiles (F)
- Áreas críticas (C)

A las bandas finales obtenidas del cálculo de la fórmula ISD, se le aplicó el siguiente tratamiento (anexo 3):

- Clasificación no supervisada “ISODATA” con 4 clases.
- *Remuestreo* de la imagen clasificada, para la post-clasificación.
- Post – clasificación 1: *Class Statistics* mediante el módulo de Post Classification en ENVI. Con este módulo se asociaron los valores clasificados con la banda resultante ISA.
- Post – clasificación 2: *Majority Analysis*. Este paso ha sido necesario para poder tener una zonificación adecuada que permita identificar con mayor claridad las áreas resultantes. Este filtro, utiliza para cada clase un kernel central reemplazando con el valor de la clase que tiene la mayoría de los píxeles en el kernel.

En el anexo número 3, se muestra el proceso metodológico efectuado para la realización del ISD.

A continuación, en la tabla 3.1 se muestran los indicadores utilizados en ISA



Tabla 3.1. Clases y pesos asignados a los índices parciales utilizados en el cálculo del Índice ISD.

		CLASE	DESCRIPCIÓN	PESO
<b>IPCS</b>	Profundidad (cm)	1	> 100	1
		2	100-90	2
		3	<80	3
	Textura	1	Gruesa [Arenoso, Franco arenoso, Areno-gravilloso]	1
		2	Media [Franco]	2
		3	Fina [Franco-arcillo-limoso, Franco-limoso, Franco-arcilloso]	3
	Drenaje	1	Bien drenado	1
		2	Imperfectamente drenado	2
		3	Pobrementemente drenado	3
	Pendiente	1	<5	1
		2	1-2	2
		3	<1	3
Materia Orgánica	1	<3	1	
	2	1.5	2	
	3	<1.5	3	
<b>IPCC</b>	Precipitación acumulada	1	Alta [1.671<X >2.178 mm/mensuales acumulados]	2
		2	Media [1.417 <X>1671 mm/mensuales acumulados]	3
		3	Baja [<1.417 mm/mensuales acumulados]	4
	Frecuencia de inundaciones	1	Áreas inundadas	3
	Pisos altitudinales (msnm)	1	[570-280]	4
		2	[280-200]	3
		3	[200-100]	2
		4	[100-60]	1.5
Índice de aridez	1	Semiárido (mediterráneo)	2	
	2	Subhúmedo	3	
<b>IPCV</b>	Continuidad del bosque	1	Fragmentos grandes [300.000 – 66.000 hectáreas]	1.5
		2	Fragmentos medianos [48.000 – 1000 hectáreas]	2
		3	Fragmentos pequeños [9.000 – 50 hectáreas]	3
	Vigor de la vegetación (NDVI)	1	Valores altos	1.5
		2	Valores medios	2
		3	Valores bajos	3
<b>IPCM</b>	Cultivos agrícolas (tiempo de permanencia)	1	Cultivos extensivos [1984-1990]	5
		2	Cultivos extensivos [1990-2000]	4
		3	Cultivos extensivos [2000-2010]	3
		4	Cultivos extensivos [2010-2014]	2

A continuación, en la tabla 3.2 se expone la base de datos obtenida para la confección de los indicadores:

Tabla 3.2. Características de las fuentes utilizadas en la confección del índice ISD.

Indicadores	Escala	Fuente
Suelo	1:500.000	Atlas de Suelo de la Rep. Argentina (INTA, 1990). Actualizada por (Angueira et al., 2007). [ <a href="http://www.geointa.inta.gob.ar/category/suelos/">http://www.geointa.inta.gob.ar/category/suelos/</a> ]
Precipitación acumulada	0.25°	Datos de precipitación TRMM. Servidor Nasa Giovanni. [ <a href="https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/">https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/</a> ]. Producto de elaboración propia
Frecuencia de inundaciones	Raster 500x500 m	Datos MODIS. Productos MOD09A1 y MOD44W. MAGyP-INTA-CONAE. Plataforma SUMA. (Andreo, 2015).
Pisos altitudinales	Raster 30x30 m	DEM - SRTM (Digital Elevation Model - Misión Topográfica Shuttle Radar). [ <a href="http://earthexplorer.usgs.gov">http://earthexplorer.usgs.gov</a> ]. Producto de elaboración propia.
Índice de aridez	Vector. SIG 250	Atlas Climático Digital de la República. INTA, EEA Salta Argentina. Bianchi & Cravero (2010). [ <a href="https://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentinan">https://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentinan</a> ].
Continuidad de bosque	Raster 30x30 m	Landsat OLI [ <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ]. Producto de elaboración propia.
Vigor de la vegetación (NDVI)	Raster 30x30 m	Landsat OLI [ <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ]. Producto de elaboración propia.
Cultivos agrícolas	Raster 30x30 m	Landsat OLI y TM [ <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ]. Producto de elaboración propia.

### 3.4.2. ÍNDICE DE SITIOS PRIORITARIOS DE CONSERVACIÓN (ISPC)

El método utilizado en el presente índice se relaciona con la combinación de indicadores que tienen cierto peso ecológico. Es decir, los parámetros identifican diferentes niveles de estados de conservación.

<b>HIE =</b>	$(H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6)^{1/6}$
<b>RD =</b>	$(\text{Corrientes Primarias} * \text{Corrientes Secundarias} * \text{Corrientes Terciarias})^{1/3}$
<b>CB =</b>	$(\text{F. Grandes} * \text{F. Medianos} * \text{F. Pequeños})^{1/3}$
<b>VV =</b>	$(\text{Valores altos} * \text{Valores medios} * \text{Valores bajos})^{1/3}$

HIE (Humedales de Importancia Ecológica). RD (Red de Drenaje). CB (Continuidad del Bosque). VV (Vigor de la vegetación).

A continuación (tabla 3.3) se enumeran los indicadores parciales seleccionados:

Tabla 3.3. Clases y pesos asignados al índice de sitios prioritarios de conservación.

	<b>Clase</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso</b>
<b>Humedales de Importancia Ecológica</b>	1	AICAs - Bañados de Figueroa	3
	2	AICAs - Bañados de Añatuya	3
	3	AICAs - Bañados del Río Dulce	3
	1	Bajos Submeridionales	3
	2	Bañados del Río Salado	2
	3	Salinas o Salitrales	2
<b>Red de drenaje</b>	1	Corrientes primarias	3
	2	Corrientes secundarias	2
	3	Corrientes terciarias	1
<b>Continuidad del Bosque</b>	1	Fragmentos grandes [300.000 – 66.000 hectáreas]	3
	2	Fragmentos medianos [48.000 – 1000 hectáreas]	2
	3	Fragmentos pequeños [9.000 – 50 hectáreas]	1
<b>Vigor de la vegetación (NDVI)</b>	1	Valores altos	3
	2	Valores medios	2
	3	Valores bajos	1

La tabla 3.4 muestra la información correspondiente a la base de datos utilizada en el ISPC:

Tabla 3.4. Características de las fuentes utilizadas en la confección del índice ISPC.

<b>Indicadores</b>	<b>Escala</b>	<b>Fuente</b>
Humedales de importancia ecológica	Vectores remuestreados a 30x30m	Vectores extraídos de IGN [ <a href="http://www.ign.gob.ar/sig">http://www.ign.gob.ar/sig</a> ]. Portal: Sitios AICA's – Áreas Importantes para la Conservación de las Aves. [ <a href="http://avesargentinas.com.ar.elsever.com/AICAS/home.html">http://avesargentinas.com.ar.elsever.com/AICAS/home.html</a> ].
Red de drenaje	0.25°	DEM - SRTM (Digital Elevation Model - Misión Topográfica Shuttle Radar). [ <a href="http://earthexplorer.usgs.gov">http://earthexplorer.usgs.gov</a> ]. Producto de elaboración propia.
Continuidad de bosque	Raster 30x30 m	Landsat OLI [ <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ]. Producto de elaboración propia.
Vigor de la vegetación	Raster 30x30 m	Landsat OLI [ <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ]. Producto de elaboración propia.

Finalmente el índice final ISPC se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$ISPC = (HIE * RD * CB * VV)^{1/4}$$

Para la interpretación del ISPC se utilizó la siguiente escala de valoración, ordenados en función del grado del requerimiento de conservación:

- Prioridad Alta (A)
- Prioridad Moderada (M)
- Prioridad Baja (B)

### **3.4.3. PROCESAMIENTO METODOLÓGICO DE LA BASE DE DATOS UTILIZADA EN LOS INDICADORES**

#### **3.4.3.1. INDICADORES DEL ISD:**

##### **a) Indicadores de la Calidad del Suelo**

Se tomó como referencia la versión digital vectorizada del Atlas de Suelo de la República Argentina INTA (1990), y actualizada por Angueira *et al.* (2007). Este atlas cuenta con una extensa descripción de los atributos que definen cada tipo de suelo. De estas clasificaciones se extrajeron los valores de los atributos: profundidad del suelo, textura, drenaje, materia orgánica y pendiente; con dichos valores se realizó la clasificación correspondiente, asignándole a cada

uno de los atributos un peso en función de los valores. Por ejemplo, para la capa de profundidad, cada tipo de unidad de suelo tiene un valor de profundidad, asignando el peso de cada atributo como una banda, y luego se unieron las bandas de todos los atributos con el módulo *band math* de ENVI. A continuación (figura 3.4) se muestra un ejemplo de la fórmula utilizada para el atributo “Profundidad del suelo”:

Fórmula para la expresión “Profundidad del suelo”:

$$[(b1*2+b2*2+b3*3+b4*2+b5*1+b6*1+b7*2+b8*3+b9*2+b10*3+b11*2+b12*3+b13*3+b14*3)]$$

Donde indica lo siguiente: a la banda 1 (b1) se le asigna un valor igual a 2; a la banda 2 (b2) se le asigna un valor de 2, y así sucesivamente hasta completar la fórmula expresada en el comando.

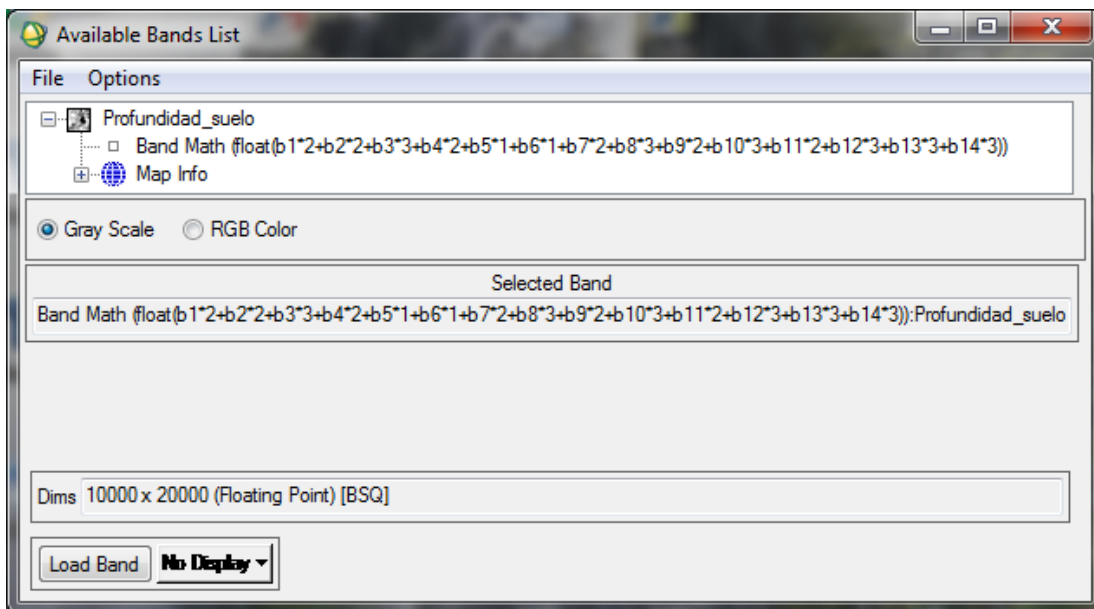


Figura 3.4. Band Math. Índice de calidad del suelo

Luego, se unieron nuevamente los indicadores finales con el módulo *band math*:

**PCS (Índice Parcial de Calidad del Suelo)** = (Profundidad \* Textura \* Drenaje \* Pendiente Materia Orgánica)<sup>1/5</sup>

## b) Indicadores de la Calidad del Clima

### ▪ Frecuencia de Inundaciones:

Se descargaron los productos de inundaciones históricas de la Plataforma SUMA, cuya fuente de datos consisten en productos MOD09A1 y MOD44W de MODIS, de una resolución espacial de

500 metros. Los productos poseen un rango de valores de datos que van de 1 a 24, dichos rangos representan los píxeles que se inundaron (no incluyen los píxeles de aguas permanentes). Un período temporal mensual (período acumulado desde 2010 al 2015).

Se descargaron los 12 productos mensuales, y se extrajeron los valores correspondientes en una banda, finalmente se unieron las bandas mediante la siguiente fórmula (figura 3.5):

$$(\text{float}(b1+b2+b3+b4+b5+b6+b7+b8+b9+b10+b11+12))$$

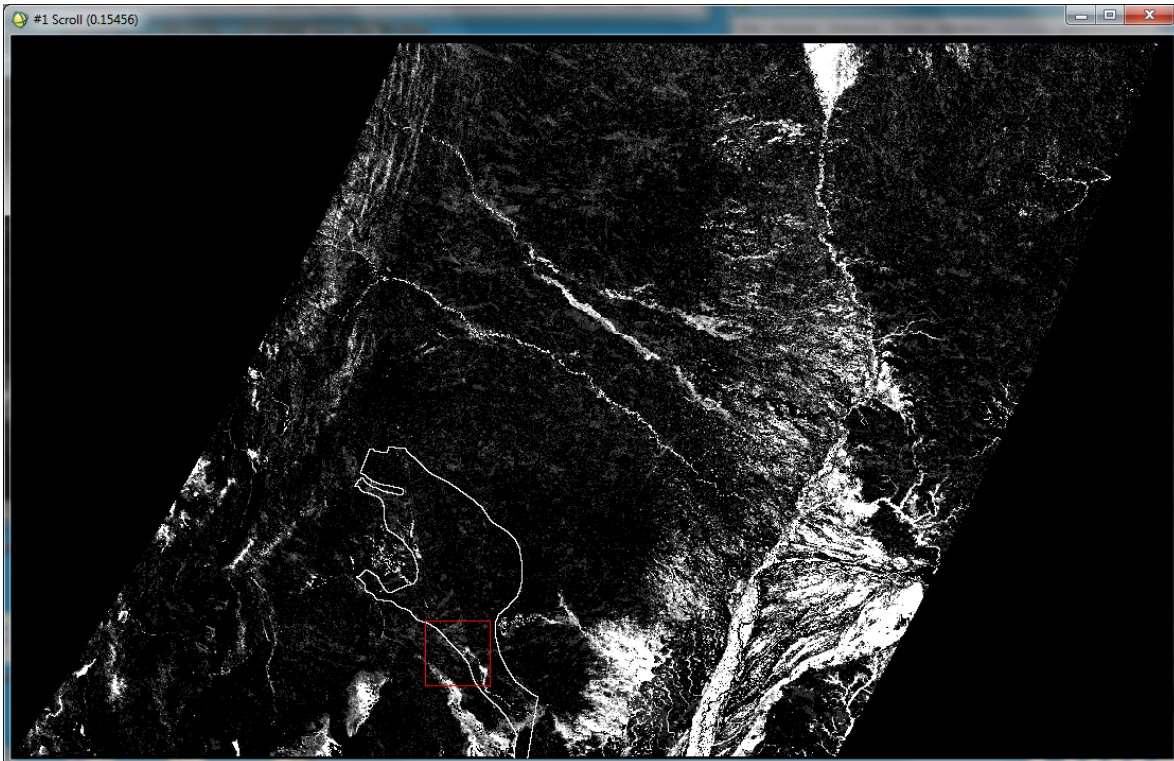


Figura 3.5. Banda de frecuencia de inundaciones.

Finalmente, el resultado de la banda final fue remuestreada a 30 x 30 metros.

#### ▪ **Precipitación Acumulada:**

Los datos TRMM de precipitación acumulada, se descargaron del servidor Nasa Giovanni, [<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>]. Se trata de una serie acumulada de datos mensuales, desde el 2010 hasta el 2015 (acordes con los datos de frecuencia de inundaciones), y resolución espacial de 0.25<sup>0</sup>. Las precipitaciones son aproximaciones a la precipitación real. Los datos contienen un mapa de acumulación. Algunas variables están disponibles para el mapa de

acumulación, en el que en lugar de promediar a lo largo del tiempo, se computa un total a lo largo del tiempo para una celda de cuadrícula determinada.

Los datos se guardan en formato NetCDF para poder mantener los valores de precipitación. Por el tamaño de los datos píxeles, los cuales pierden calidad en la información, fue necesario interpolar los datos, cuyo resultado es una zonificación de las precipitaciones. La interpolación se realizó con el programa QGIS, donde se generó una grilla de puntos para poder realizar la interpolación. A continuación (figura 3.6) se muestra la capa de precipitación acumulada interpolada. De esta manera facilitó la zonificación de los tres rangos necesarios para utilizar como indicador en una banda que fue remuestreada a 30 metros (ver valores de los rangos en la tabla 3.1).

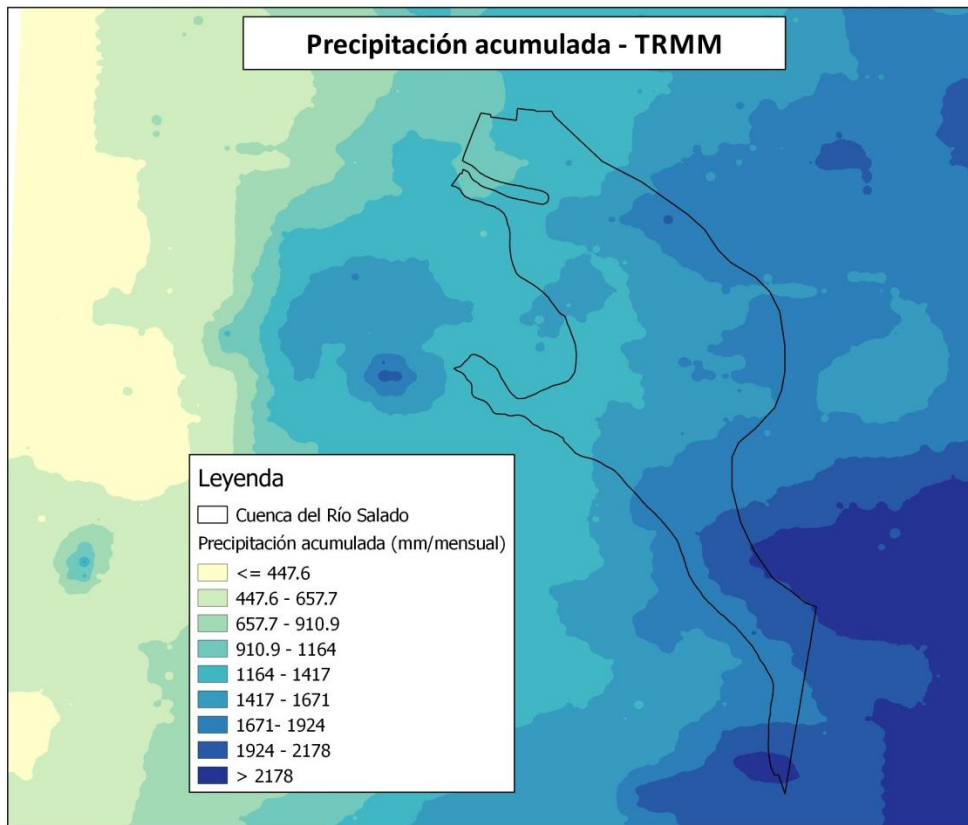


Figura 3.6. Mapa resultante del proceso de interpolación de bandas TRMM. Fuente: elaboración propia

## ▪ Pisos altimétricos

Se utilizaron productos DEM (Modelos digitales de elevación) SRTM (Digital Elevation Model - Misión Topográfica Shuttle Radar) de 30 metros (1 Arc-Second Global), descargados del siguiente sitio web: [<http://earthexplorer.usgs.gov>]. SRTM es un proyecto internacional entre la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial (NGA), y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). En la figura 3.7 (a), se muestra el modelo digital con sus respectivos niveles altitudinales. Los pisos altimétricos se clasificaron en función de 4 rangos (rangos utilizados posteriormente como indicador) según su altura con respecto al nivel medio del mar con IDL de ENVI, a través del código de la figura 3.7 (b).

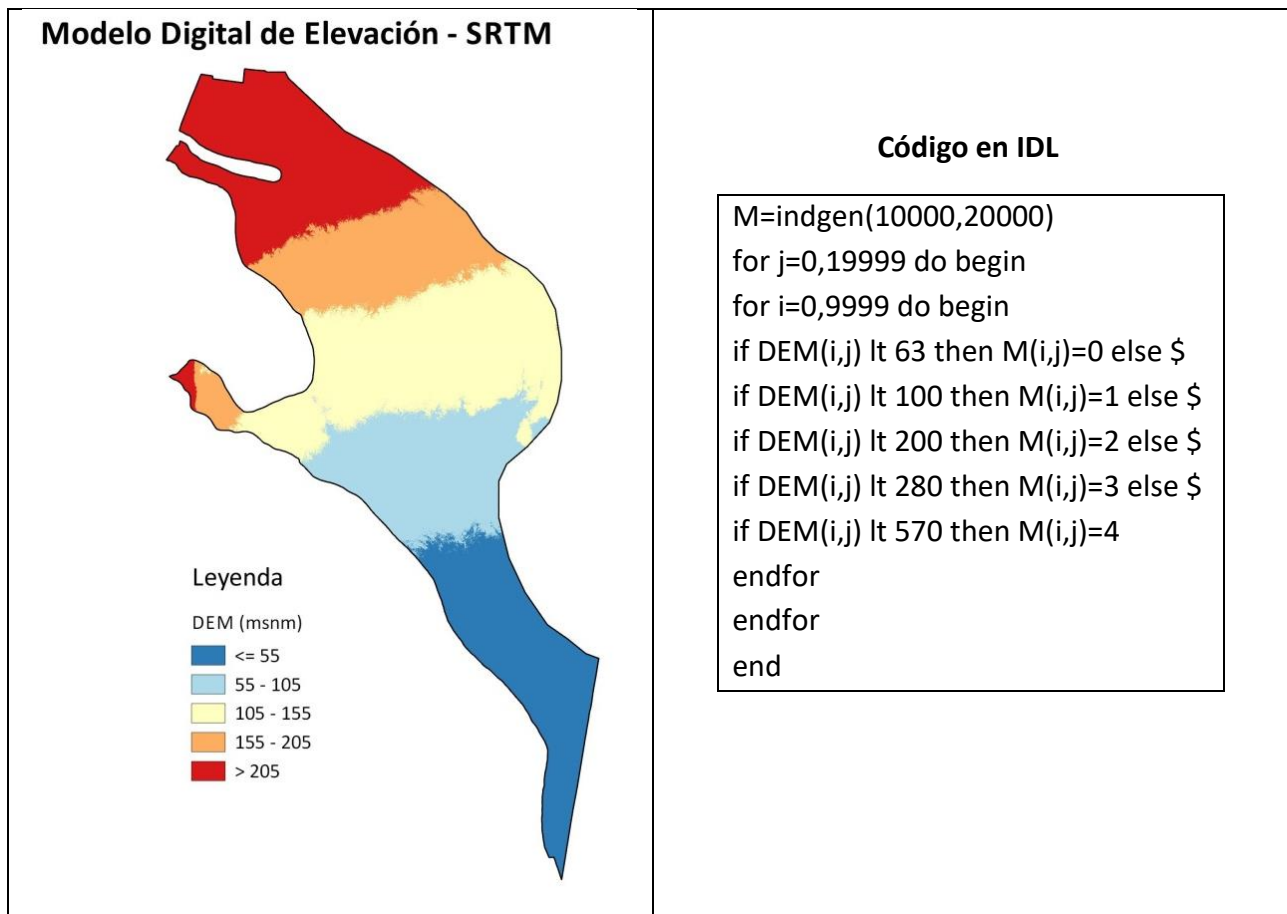


Figura 3.7. Mosaico DEM – SRTM 30 m. Cuenca del Río Salado (a). Código en IDL (b).

Fuente: elaboración propia



### ▪ Índice de aridez:

El producto Índice de Aridez de Martone se extrajo del Atlas Climático Digital de la República del INTA, EEA Salta Argentina. El índice establece rangos de tipos de climas. El valor del índice para la provincia de Santiago del Estero abarca en su mayoría al clima semiárido (con un valor de índice de 10 y 20), y la franja oriental (con un valor de 20 a 30) (figura 3.8). El formato para la descarga en datos geográficos se encuentra disponible en Kml. Para su utilización, dicha capa fue rasterizada y remuestreada a 30 metros.

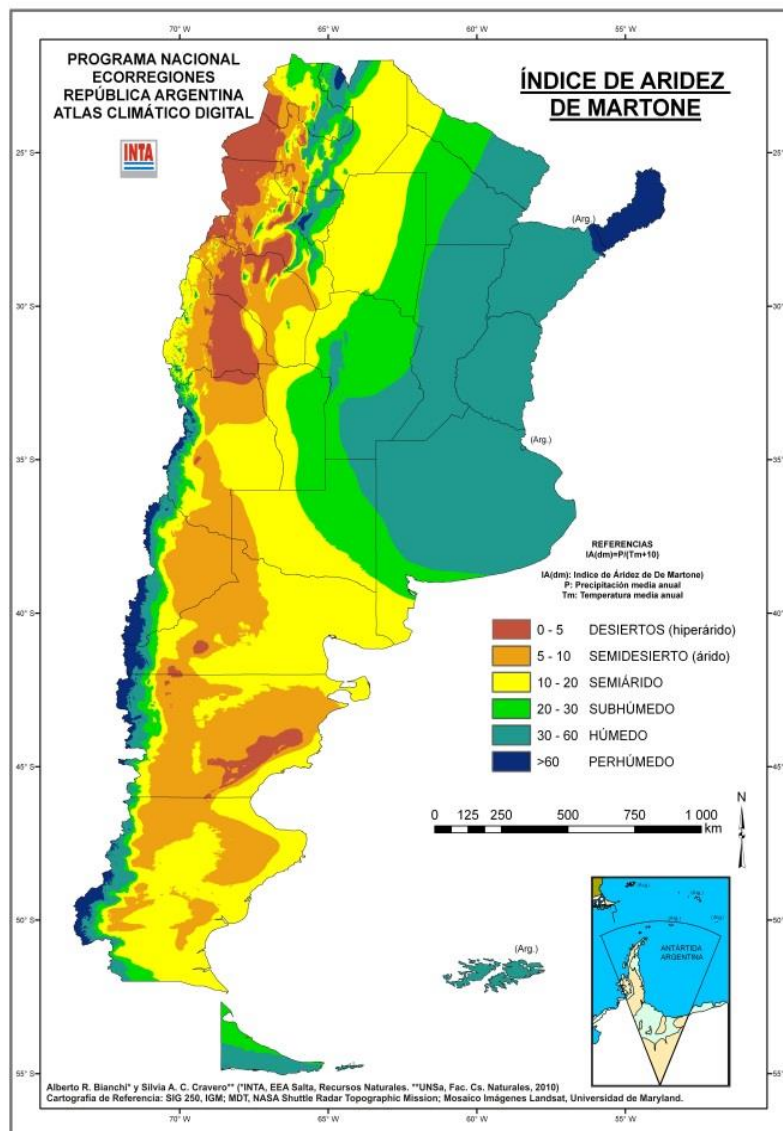


Figura 3.8. Índice de aridez de Martone.

Fuente. Atlas Climático Digital de la República. INTA, EEA Salta Argentina. Bianchi & Cravero (2010).

## **c) Indicadores de la Calidad de la vegetación**

### **▪ Continuidad de la Vegetación leñosa**

Se utilizaron las capas raster de cobertura “Bosque o tierras forestales” de los productos binarios que se generaron con las imágenes Landsat de 30x30 metros del año 2014 (capítulo 2). A dicha cobertura se le aplicó un filtro de convolución de 5x5 y su posterior vectorización en ENVI. Se exportó la capa vectorial resultante a QGIS. Para una mejor manipulación y visualización de los datos teniendo en cuenta el carácter regional del área de estudio, se procedió a eliminar todas las áreas menores a 50 has. Desde la tabla de atributos de QGIS se calcularon las superficies correspondientes, se seleccionaron los diferentes tamaños, y se clasificaron en: fragmentos grandes, medianos y pequeños (tabla 3.1). Una vez establecidos los tres rangos de fragmentos, se generaron 3 bandas representando los valores de los tres fragmentos.

### **▪ Vigor de la vegetación**

Se utilizaron los tres niveles (bandas) de NDVI desarrollado en el capítulo 2, apartado 2.4.3.3.

Los valores son los siguientes:

- Valores altos de NDVI
- Valores medios de NDVI
- Valores bajos de NDVI

Para ser utilizada como una banda en el índice ISD, fue necesario realizar el siguiente cálculo con Band Math en ENVI:

A cada banda, se le asignó un peso mediante la siguiente fórmula:

$(\text{float}(b1*1+b2*2+b3*3))$

Donde:

- b1 (banda 1) se le asigna un valor de 1 (NDVI alto)
- b2 (banda 2) se le asigna un valor de 2 (NDVI medio)
- b3 (banda 3) se le asigna un valor de 3 (NDVI bajo)

## b) Indicadores de la Calidad de manejo

Para este indicador, se utilizaron las superficies agrícolas desarrolladas en el capítulo 2, generadas a partir de imágenes Landsat de 30 metros (TM y OLI), cuya metodología se describe en el apartado 2.4.1.

Se tomaron 4 criterios de clasificación en base a la permanencia de los cultivos, ya que a mayor tiempo de permanencia, mayor es el desgaste del suelo.

La clasificación se realizó de la siguiente manera:

Tabla 3.5. Criterios utilizados en base a los períodos de tiempo

Tiempo de permanencia del cultivo	Período de tiempo	Peso asignado a cada banda
Tiempo 1	1984-1990	4 (banda 1)
Tiempo 2	1990-2000	3 (banda 2)
Tiempo 3	2000-2010	2 (banda 3)
Tiempo 4	2010-2014	1 (banda 4)

Finalmente, la unión de las bandas se realizó mediante la siguiente fórmula en band math de ENVI: (float(b1\*4+b2\*3+b3\*2+b4\*1))

### 3.4.3.2. INDICADORES DEL ISPC

#### ▪ Humedales de Importancia Ecológica

Dentro de los humedales de importancia ecológica escogidos, se mencionan:

Los sitios AICA's, los cuales representan humedales permanentes que albergan gran cantidad de fauna, principalmente aves (apartado 1.5.1.1). Para ello, se seleccionaron los humedales: Bañados de Figueroa, Bañados de Añatuya, Bañados del Río Dulce, dichos vectores se rasterizaron a 30x30 metros como tamaño de pixel. Del mismo modo se extrajeron los cuerpos de agua del IGN (Instituto Geográfico Nacional), disponibles en:

[\[http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/sigign#descarga\]](http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/sigign#descarga), disponibles en formato vectorial y su posterior rasterización, con fecha de marzo 2013. Las capas extraídas de IGN, incluyen los Bajos Submeridionales, Bañados y Salinas.

## ▪ Red de Drenaje

Para determinar la acumulación de flujo o drenaje, se realizó la delimitación interna de la cuenca hidrográfica utilizando el mosaico DEM-SRTM (Digital Elevation Model - Misión Topográfica Shuttle Radar). QGIS posee un complemento que posibilita delimitar cuencas mediante modelos digitales de elevación, mediante la interfaz QGIS - GRASS. A partir del módulo *r.watershed* de GRASS ha sido posible generar la modelación hidrológica en base a las elevaciones que lo determina el DEM, generándose las siguientes capas de salidas:

*Acumulación*: es la cantidad de flujo superficial que atraviesa cada celda de pixel.

*Drenaje*: la dirección de drenaje. Proporciona el “aspecto” de cada celda medido en sentido contrario a las agujas del reloj desde el Este. Multiplicando los valores positivos por 45 dará la dirección en grados que el escurrimiento superficial viajará desde la celda. El valor 0 (cero) indica que la celda es una zona de depresión (definida por el mapa de entrada de depresiones).

*Corrientes*: segmentos de la corriente. Los valores corresponden a los valores de las cuencas hidrográficas.

*Cuencas*: proporciona una etiqueta única para cada cuenca hidrográfica. A cada cuenca se le asignará un único número par entero y positivo.

El programa exige un valor umbral (número de celdas), es decir un valor numérico que depende de la región de análisis y el tamaño de la cuenca que se desea observar. Para determinar el tamaño mínimo de cada cuenca (primaria y secundaria) ha sido necesario realizar una relación matemática que indica el tamaño apropiado de acuerdo al área de estudio. Entonces, la red primaria se calculó teniendo en cuenta que el mosaico del DEM posee 14401 columnas y 21601 filas, lo que nos da un total de 311076001 píxeles, entonces se estima un mínimo de 3.100.000 píxeles para la cuenca. De esta manera, se ha determinado la red primaria, secundaria y terciaria de la cuenca mediante la capa de “corrientes” que genera el programa. Una vez obtenida la información, se exportó la banda de “acumulación de flujo” a formato Geotiff para poder ser clasificada mediante IDL.

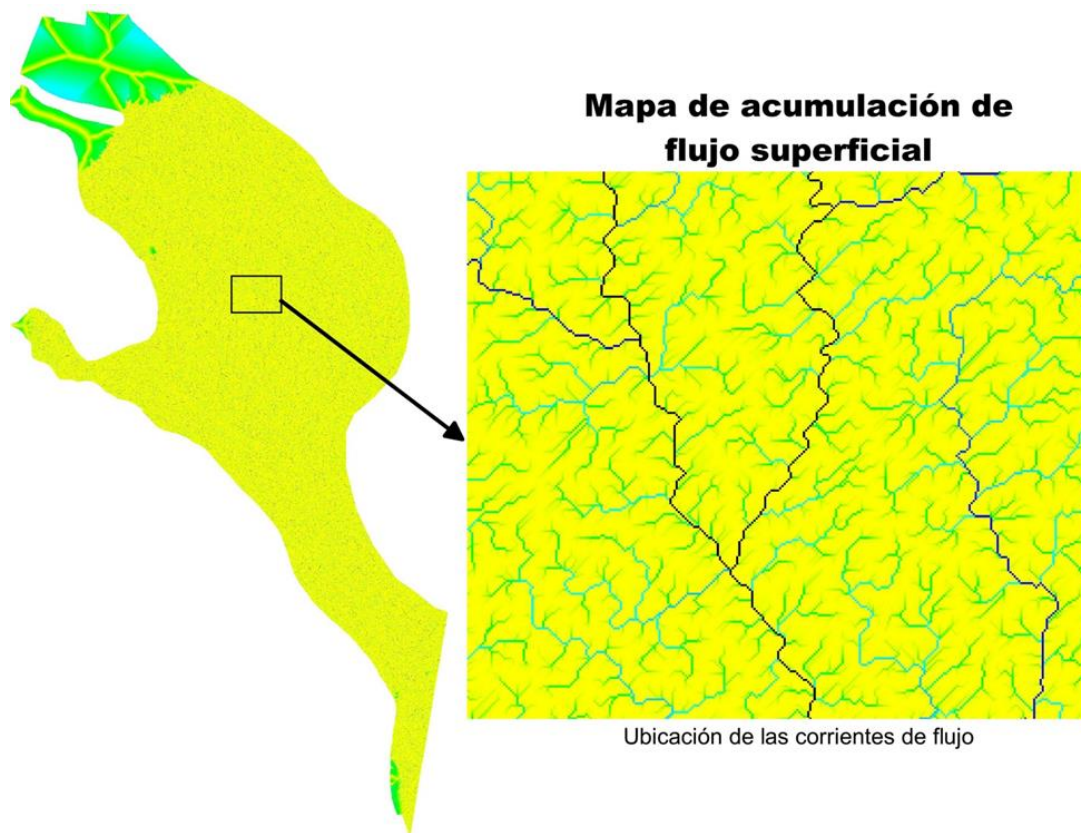


Figura 3.9. Resultado del producto Red de drenaje. [Zoom: muestra de una corriente primaria en negro]

## **3.5. RESULTADOS**

### **3.5.1. Índice de Sensibilidad a la Degradación (ISD)**

A modo de visualización, la figura 3.10 muestra en primer lugar los resultados obtenidos de los indicadores descritos en la metodología denominados: Precipitación acumulada, Frecuencia de inundaciones, Pisos altimétricos, Índice de aridez, Continuidad de la vegetación, vigor de la vegetación y cultivos agrícolas. La figura 3.11 presenta la cartografía derivada del cálculo de los índices parciales, los cuales determinan la calidad del clima, la el suelo, y la vegetación. El índice parcial de manejo, se presenta incluido en la figura 3.10.

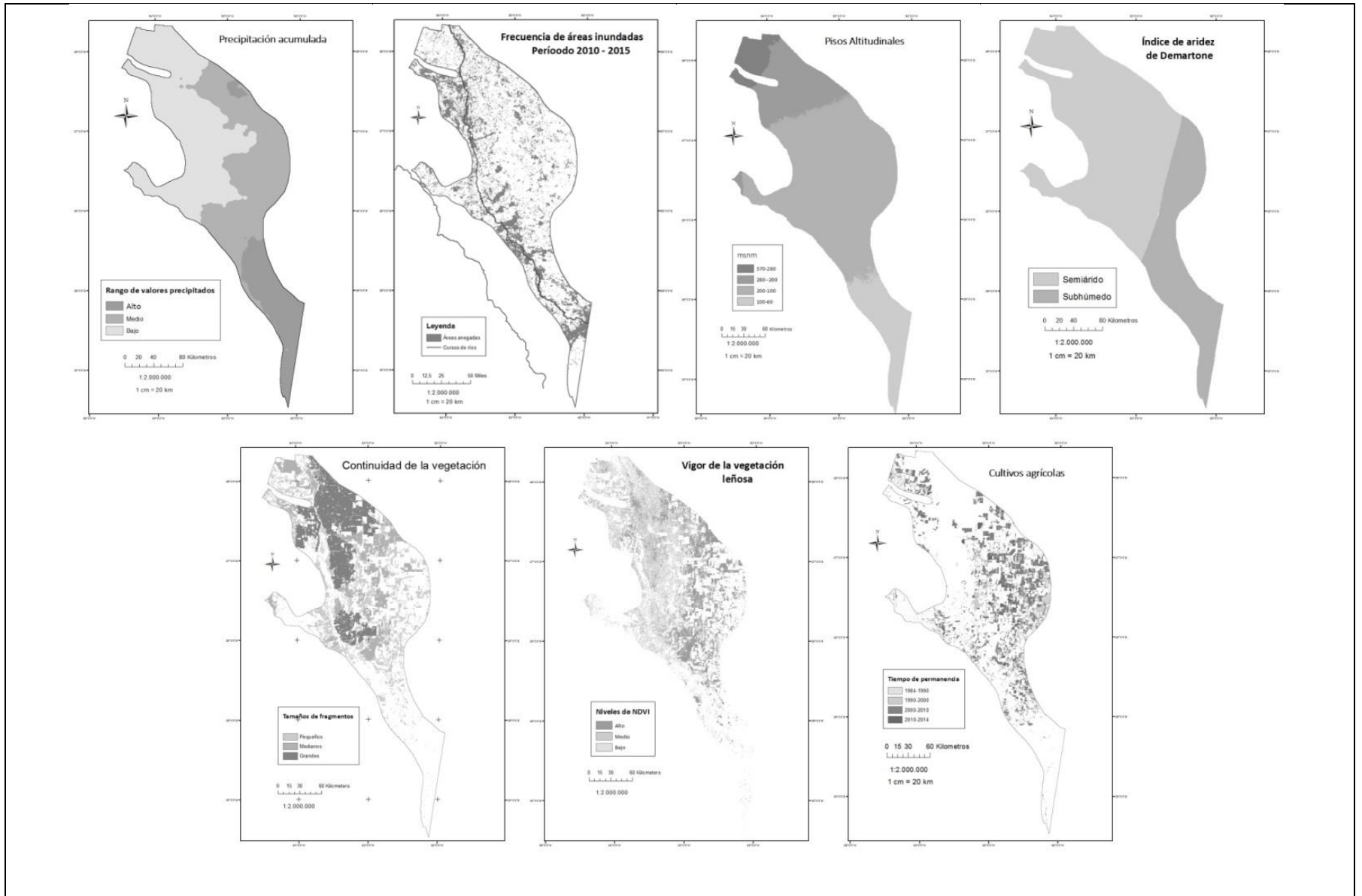


Figura 3.10. Mapas de los indicadores confeccionados para determinar el índice ISA. Fuente: elaboración propia

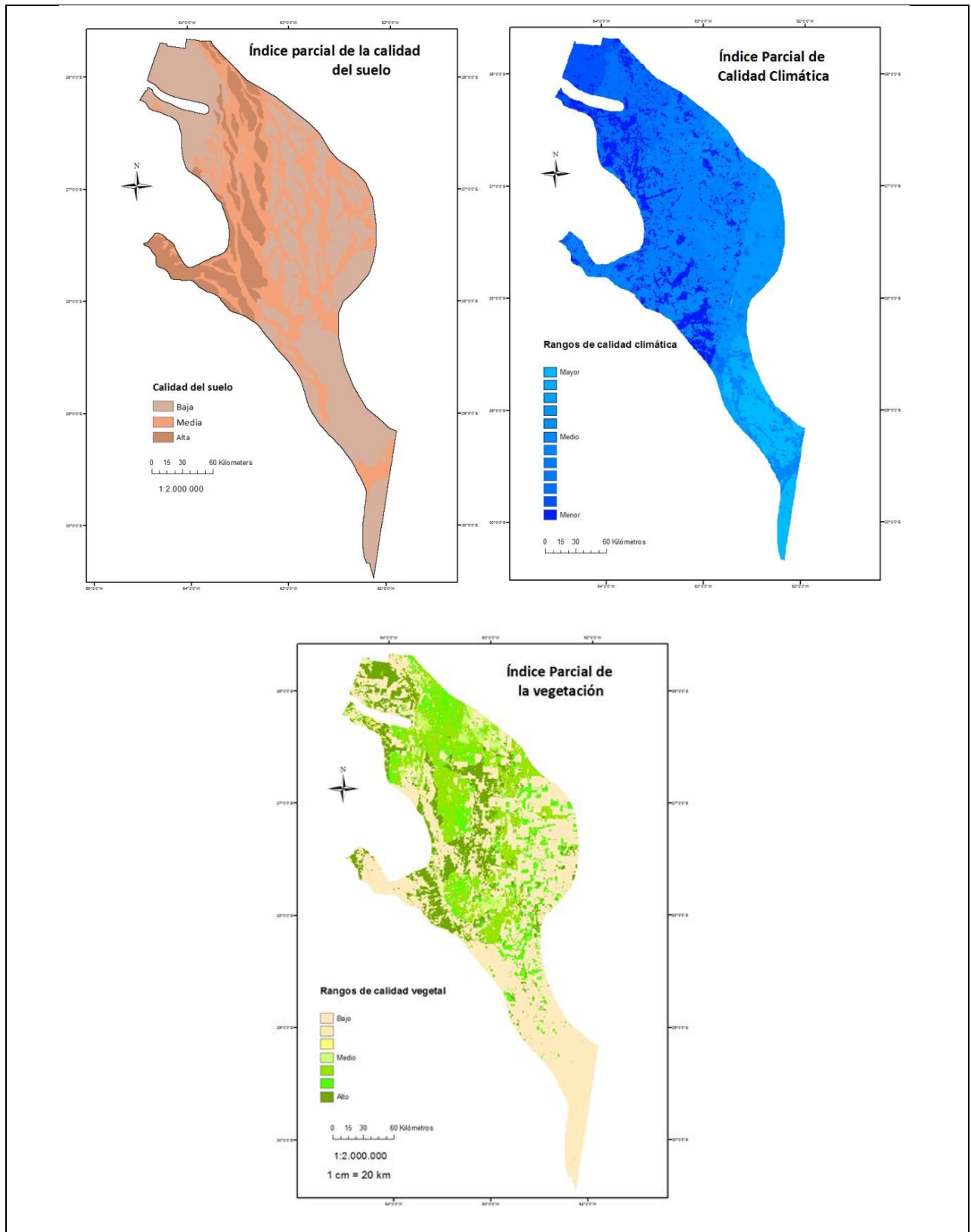


Figura 3.11. Cartografía de los índices de calidad parciales para el suelo, el clima y la vegetación.  
Fuente: elaboración propia



Finalmente, la figura 3.12 representa el mapa final del “Índice de Sensibilidad a la Degradación” ISD en el área de estudio el cual contempla cuatro clases, cuyos resultados expresan el grado de sensibilidad ambiental a la degradación de la Cuenca del Río Salado.

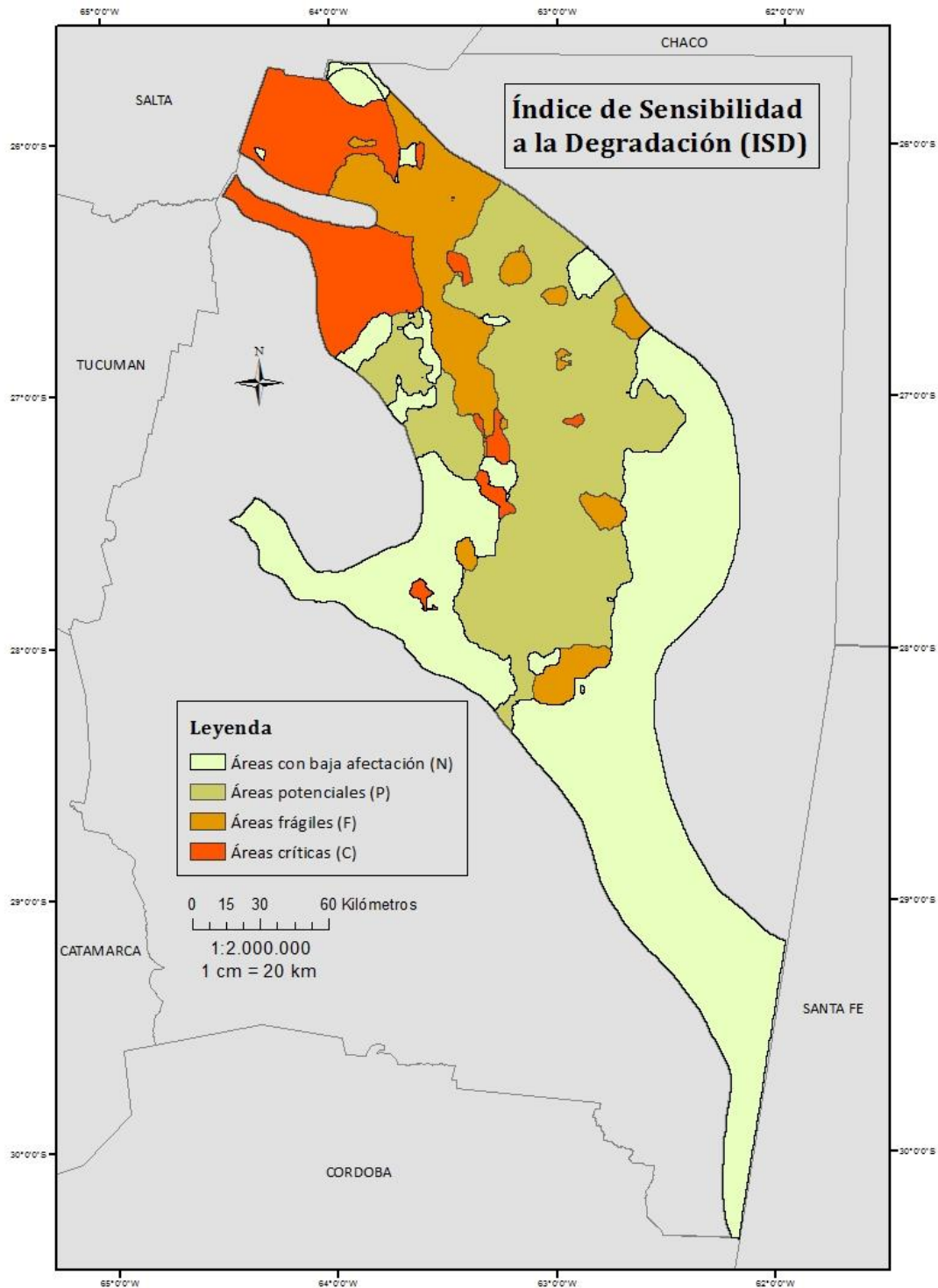


Figura 3.12. Mapa de sensibilidad a la degradación medioambiental. Fuente: elaboración propia

Dicho mapa se encuentra delimitando cuatro clases o grados de sensibilidad: grados con baja afectación (N), áreas potenciales (P), áreas frágiles (F), y áreas críticas (C).

Las áreas con baja afectación (N) y Potenciales (P) son las más extendidas; mientras que las áreas definidas como frágiles (F) y críticas (C) se mantienen relativamente uniformes en cuanto a las proporciones que se observa en la cartografía. Sin embargo considerando la gran extensión que posee la superficie en estudio no se considerarían despreciables.

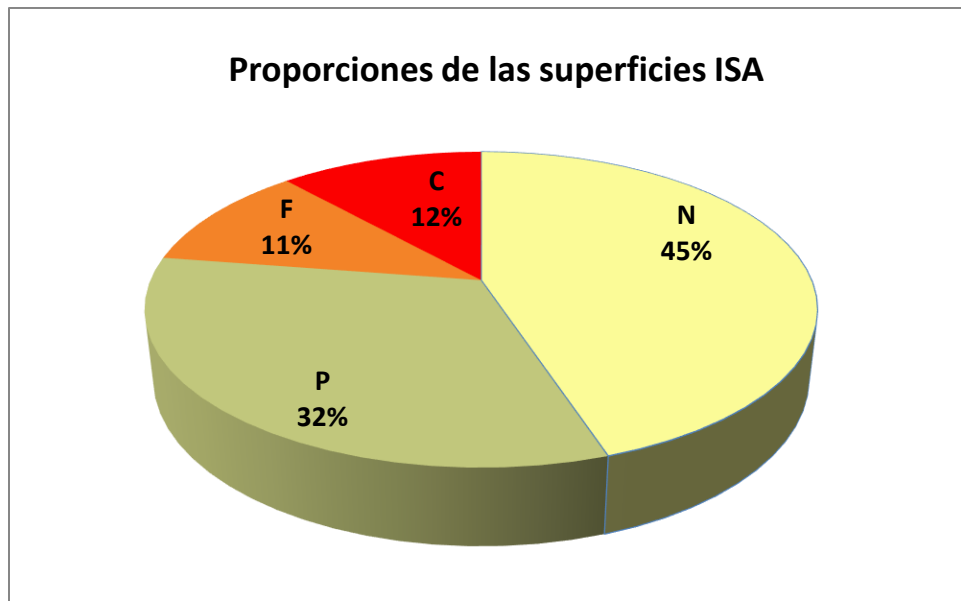


Figura 3.13. Proporciones de los resultados de las superficies ISA. Fuente: elaboración propia

El territorio que abarca la *zona o área crítica* se emplaza principalmente en una formación de abanicos aluviales de grandes extensiones, con suelos bien drenados y deficiencia de humedad. Es la región más elevada de la cuenca, dentro de la misma se presentan áreas de explanada expuestas a anegamientos temporarios poco permeables, principalmente del tipo arcilloso circundando el río Salado, y a los ríos Horcones y Urueñas (estos últimos de regímenes endorreicos), dando origen a grandes concentraciones de humedales, y por lo tanto a una importante región como refugio de aves acuáticas. Una de las características que resalta este territorio es la gran intervención antrópica dominada por la actividad agrícola, principalmente en el departamento Figueroa. La sinergia de los procesos fisiográficos dominantes como la

altitud y la pendiente junto a la explotación del suelo, juegan un papel determinante en la configuración de los elementos que conforma las características de estado crítico.

El *área frágil* se emplaza en una región surcada por numerosos cauces divergentes. Transita sobre el margen del Salado hacia el oeste, hendida por paleocauces que originan bañados de carácter permanentes. Se caracteriza por suelos frágiles y vegetación del tipo xerofítica, es decir ambientes de bosques bajos y dispersos regularmente, que alcanzan los 15-20 metros. Dentro de las categorías, el área frágil es la zona boscosa más ininterrumpida. En las zonas más degradadas dominan los arbustos resinosos y espinosos caducifolios. Existe poca intervención agrícola, principalmente por las características de sus suelos.

En las *áreas potenciales*, el río Salado continúa surcado por numerosos cauces divergentes abandonados más antiguos, y con gran intervención antrópica. Los suelos en general poseen baja capacidad de retención de la humedad, y las vías de escape del agua se entremezclan con el monte degradado y zonas agrícolas.

En relación al área denominada de *baja afectación*, representa la zona de pendiente más baja de la cuenca, gran presencia de lagunas temporarias y esteros vegetados. La extensa superficie de bañados mantiene una gran cantidad de vida acuática. Hacia el sur de la cuenca los aportes se ven influenciados también por el río Dulce generando una serie de lagunas vegetadas. Es una extensa región fuertemente intervenida por la actividad agroindustrial y asentamientos humanos. Con vegetación leñosa escasa.

### **3.5.2. Índice “Sitios prioritarios de conservación” (ISPC)**

El método utilizado en el presente índice se relaciona con la combinación de indicadores simples que tienen cierto peso o valoración ecológica; es decir que el cruzamiento de ciertos parámetros ambientales permitió ubicar diferentes niveles relacionados con la necesidad de conservación que requiere la cuenca del río Salado.

En la siguiente figura (3.14), se presenta el mapa resultante del Índice de Sitios Prioritarios de Conservación. En el mismo, se muestran las regiones, niveles y proporciones de requerimientos de conservación.

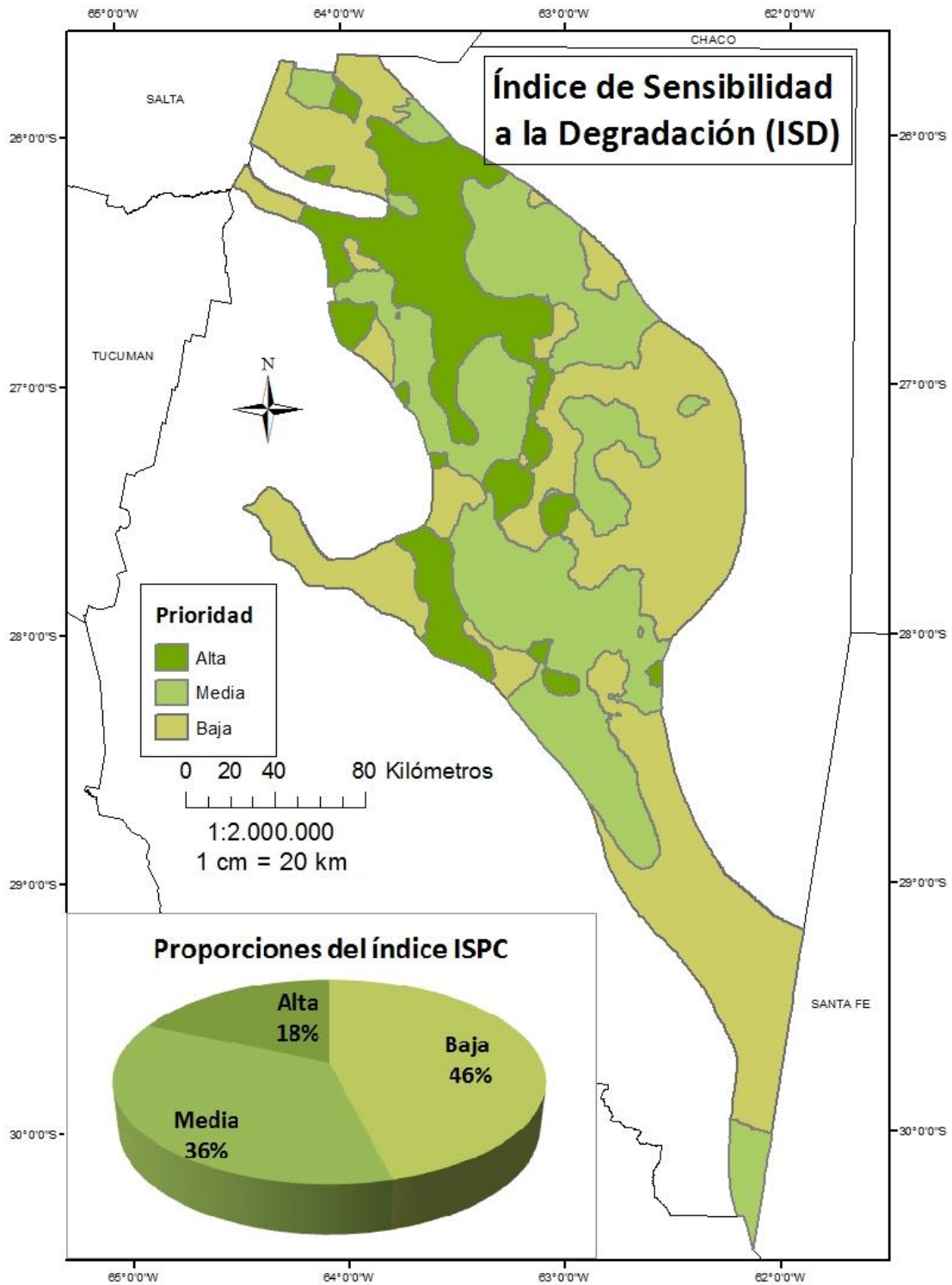


Figura 3.14. Mapa del índice ISPC. Fuente: elaboración propia

El mapa de la figura 3.14 expresa las condiciones de los ambientes de acuerdo a su estado de conservación. Los resultados del ISPC establecen distintas categorías en cuanto a su potencial ecológico, percibiendo a la cuenca como un estado de unidad de funcionamiento.

Las áreas consideradas como de prioridad alta y prioridad media, se relacionan con la necesidad de ser el foco de políticas destinadas a la conservación ya que corresponden a regiones dentro de la cuenca donde mantienen relictos de bosques en estados de conservación más propicios, a su vez resguardan ambientes de humedales y zonas de flujos de agua importantes para mantener el equilibrio en el sistema cuenca.

En relación a la formación de los bañados y esteros que se forman en la cuenca, dependen casi enteramente de los paleocausas que han transitado en las distintas etapas de divagación que tuvo el río Salado en el paso del tiempo. En la siguiente imagen (figura 3.15), se presenta un sistema de drenaje del río Salado derivado de los modelos digitales de elevación, con una dirección de escurrimiento Noreste a Sudeste (proceso metodológico de la sección 3.4.3.2, red de drenaje).

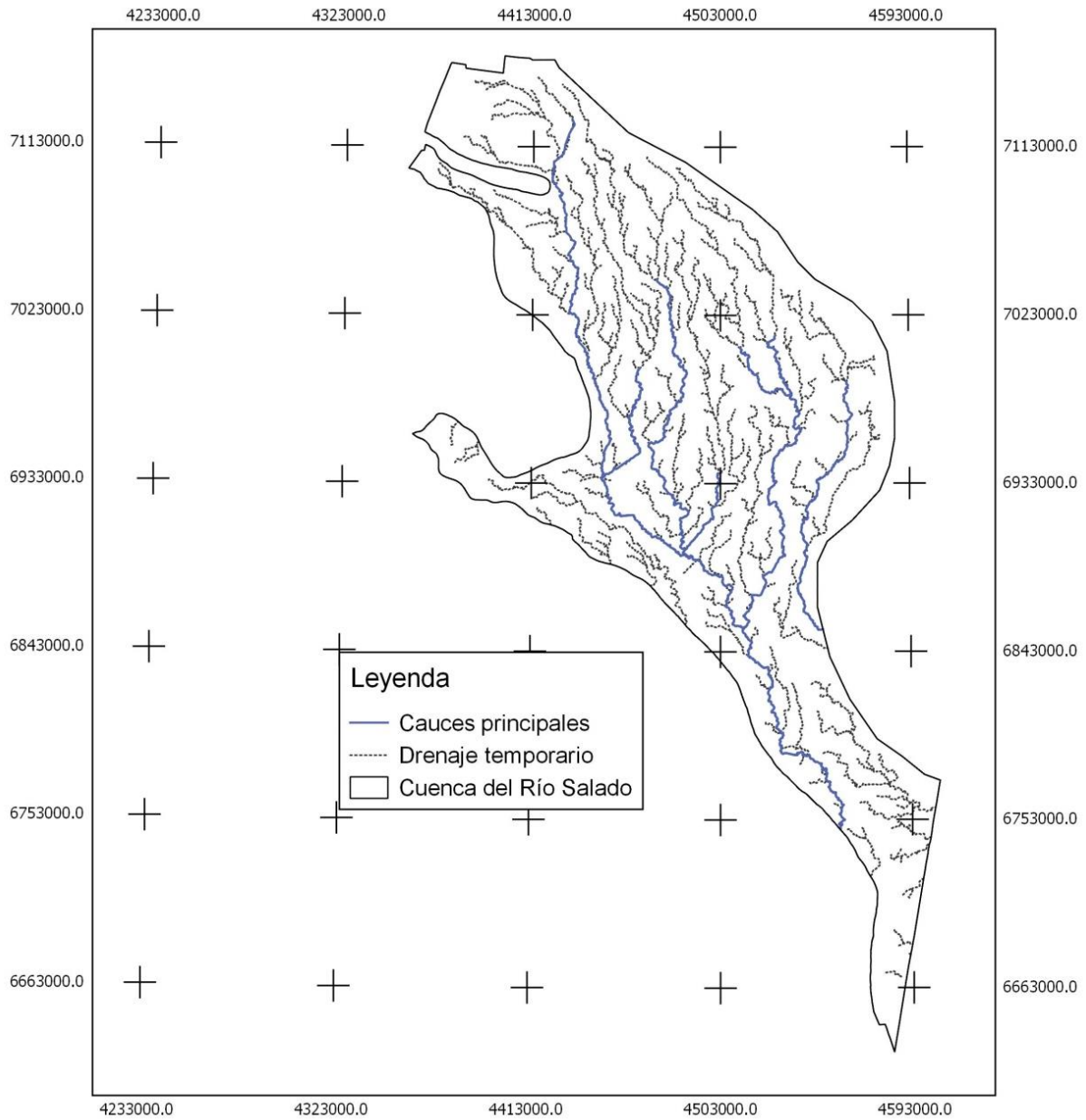


Figura 3.15. Sistema de drenaje. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia

### 3.5. DISCUSIONES

En términos generales, las características climáticas de semiaridéz hacen que el ambiente en general sea altamente sensible a la degradación, más allá de los resultados que arrojaron los datos, por lo que cualquier intervención del tipo antrópica tiene sus consecuencias a corto o largo plazo.

Mediante la combinación de información diversa y espacial ha sido posible identificar aquellas áreas más propensas a la degradación. Cada fuente de datos iniciales debió ser estudiada para determinar la mejor combinación dentro de todas las disponibles. La metodología utilizada puede ser considerada como una componente en la regulación del uso de la tierra y del desarrollo socioeconómico de la región. La base de datos en la confección de los índices contiene los atributos necesarios para evaluar la calidad de la cuenca, tanto en lo que respecta a sus potencialidades, como así también a las alertas en lo concerniente a la degradación.

En general, la cuenca del río Salado es un sistema de llanura que conforma una transición entre dos grandes regiones naturales: la llanura chaqueña (al norte) y la llanura pampeana (al sur). Gran parte de la cuenca se asemeja a un plano suavemente inclinado (Ferreira, 2005).

Las unidades ambientales de mayor sensibilidad ambiental a la degradación se identifican como Áreas Críticas (C) y Frágiles (F), emplazadas principalmente en la zona Norte de la cuenca. Hacia el oeste, con la disminución de las precipitaciones, los suelos presentan menor desarrollo, con muy bajos tenores de materia orgánica. Las planicies occidentales son definitivamente áridas con vegetación más xerofítica y más propensas a la degradación (Moscatelli, 1990). El suelo es uno de los elementos claves en el funcionamiento de los ecosistemas, y pesa fuertemente al analizar un proceso de degradación sobre todo en regiones con características de semiaridéz (Kosmas, 1999).

Las Áreas con baja afectación (N) y Áreas Potenciales (P), representan la mayor extensión en el índice de degradación, 45% (N) y 32% (P) respectivamente. La región potencial (P), es predominantemente una paleollanura fluvial arenosa con cobertura vegetal. Las formaciones de paleocausas generalmente dominado por pastizales, atraviesa la matriz boscosa remanente (Torrella y Adamoli, 2005). La categoría de baja afectación (N), en la región oriental tiene una gran influencia del río Salado, está estrechamente ligada a las zonas más bajas de la cuenca,

donde se crean zonas de lagunas y bañados en los períodos estivales. La vegetación xerofítica se asocia con los suelos salobres y a las áreas adyacentes a las vías de escurrimiento o sectores cóncavos anegables, esta región tiene un mayor riesgo a las inundaciones.

La expansión de la deforestación sobre cuencas hidrográficas genera problemas asociados a la erosión del suelo, el movimiento y la deposición de sedimentos. Los sedimentos disminuyen la capacidad de funcionamiento de los ecosistemas de humedales y de la calidad del agua.

Los resultados del índice de sitios prioritarios para la conservación, manifiestan una clara influencia de la vegetación leñosa. En regiones forestales, la vegetación representa una de las variables más importantes para la conservación. Las áreas de alta prioridad, pertenecen a regiones donde la vegetación mantiene una conectividad entre los ambientes de humedales y paleocausas activos, lo cual sirven de protección a la cuenca, y asegura un resguardo para la fauna. La densa trama de humedales en la región forman un importante sistema o macrohumedal de nivel subregional para aves con características de endemismo (Neiff y Malvárez, 2004). Los ambientes ribereños reúnen una alta riqueza de especies y son valorados por su rol como corredores para la dispersión de vida silvestre, los procesos biológicos que se establecen mantienen la estabilidad del sistema en su conjunto (Mitsch & Gosselink, 1993).

La región oriental de la cuenca, cuya dominancia representa una prioridad “*moderada y baja*”, se conforman por grandes superficies con procesos de transformación de su cobertura original, sin embargo, los relictos que quedan de bosques, juegan una función vital para la biodiversidad como corredores biológico, tanto para la fauna silvestre en general como así también para mantener la continuidad de las superficies vegetales que quedan como árboles semilleros.

En general, la cuenca del río Salado es un territorio casi plano cuyas depresiones más cercanas hacia los cauces naturales sufren inundaciones estacionales muy características donde se desarrollan esteros que pueden permanecer gran parte del año inundado. En las épocas estivales donde las lluvias se hacen presente, los antiguos causes alejados del río cumplen un rol importante donde alimentan a los bañados.

Los mayores impactos sobre los sistemas hidrológicos son causados por cambios en los patrones de cobertura y uso del suelo. Para los humedales dentro de las cuencas que han perdido parte de su cobertura vegetal natural, se ha comprobado que la calidad del agua declina, aumentando



los volúmenes de escurrimiento y la reducción de los suministros de agua a acuíferos (Berlanga *et al*, 2011).

La combinación de los sistemas de procesamiento y análisis de las imágenes satelitales que se desprenden de la teledetección y los sistemas de información geográfica, proporcionan una potente posibilidad de diseñar procesos o modelos que simulan el comportamiento de la naturaleza frente a fenómenos adversos. En este sentido, estas herramientas han posibilitado la combinación y el tratamiento de datos e imágenes de diversa talla y tipología, y principalmente la combinación de bandas (Roughgarden *et al.*, 1991).

Las políticas de conservación y manejo racional de la cuenca implican un proceso de identificación de prioridades de carácter regional. Los índices permiten identificar, analizar y comunicar de manera simplificada información compleja, por lo que constituyen un aporte fundamental en la toma de decisiones, ya que proporcionan la evidencia del estado de salud de los ambientes en general con el fin de promover su sustentabilidad.

## **CAPÍTULO 4. DETECCIÓN DE CUERPOS DE AGUA**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Los sensores satelitales son herramientas de gran utilidad, sobre todo cuando se trabaja con extensas regiones de variabilidades estacionales, difícil acceso, costo y tiempo (Lanfri, 2011). En la región del Chaco Seco, el 60% de las precipitaciones se concentran en el semestre cálido, período donde se registran inundaciones con mayor frecuencia que el resto del año (Boletta, 2001). Durante este período, realizar estudios ambientales con imágenes ópticas se dificulta debido al cubrimiento de nubes. En el rango de las microondas, los efectos atmosféricos sobre la señal del radar es casi despreciable, pues trabaja a longitudes de onda muy superiores al tamaño habitual de la gotas de agua, lo que hace a ésta región espectral idónea para zonas o épocas lluviosas (Chuvienco, 2010).

Tanto los sensores activos como los pasivos, en el rango de longitudes de onda de las microondas, son sensibles a cuerpos de agua y adecuados para estudios multitemporales debido al funcionamiento en todas las condiciones meteorológicas, tanto diurnas como nocturnas; particularmente los radares de apertura sintética (Synthetic Aperture Radars: SAR) han sido reconocidos como importantes instrumentos para el monitoreo de superficies con agua (Lanfri, 2011). Los SAR, son utilizados en el monitoreo ambiental, agricultura, detección de claros en bosques, inundaciones, detección de manchas de petróleo en el mar, y planeamiento urbano (Belmonte & Camaño, 2009).

Considerando las características de fragmentación natural y variabilidad temporal de los macroecosistemas de humedales, un sensor para la caracterización y monitoreo de sus procesos debería involucrar alta resolución espacial, alta frecuencia de pasada y una alta cobertura geográfica (Salvia, 2010). En este sentido, los datos SAR, particularmente los productos Hugel Region de COSMO SkyMed, abarcan grandes extensiones (200 km), ideales para un cubrimiento regional.

## 4.2. OBJETIVOS ABORDADOS EN EL CAPÍTULO

El presente capítulo consiste en determinar los cuerpos de agua con datos SAR - SCANSAR - Hugel Región de Cosmo SkyMed. El propósito de este objetivo está dirigido a explorar los datos SAR con las imágenes brindadas por la Comisión de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, y la Agencia Espacial Italiana (ASI); dentro de un período donde se registran mayores precipitaciones.

## 4.3. MARCO TEÓRICO

### 4.3.1. LOS SISTEMAS RADAR: PROPIEDADES DE LAS IMÁGENES

Los sistemas **RADAR** (Ratio Detection and Ranging), son sistemas activos, ya que son capaces de emitir su propio haz de energía y miden la onda reflejada. Operan en la porción del espectro electromagnético correspondientes a las microondas, de longitud de onda milimétrica, en teledetección, las mayores longitudes de onda utilizadas. La radiación electromagnética, a diferencia de otros tipos de ondas, se propaga en el vacío, a través de grandes distancias, útil para el sensoramiento remoto. Cada pixel en una imagen radar representa el coeficiente de retro-dispersión de esa área sobre el terreno, siendo el valor almacenado tanto mayor cuanto más intensa sea la señal de retorno (Chuvienco, 2010).

El radar mide la intensidad de la energía que vuelve al sensor denominado "Backscatter", y la cantidad de energía depende del scattering suministrado por el radar (figura 4.1).

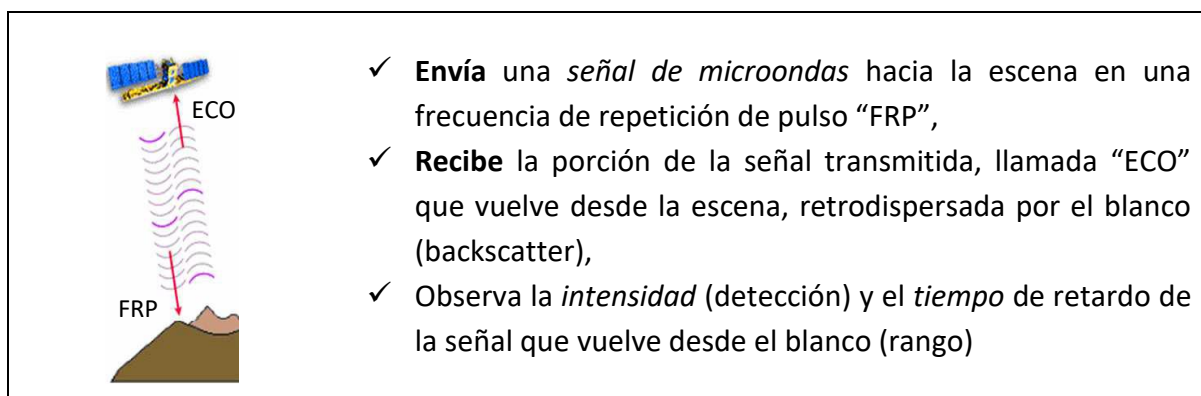


Figura 4.1. Funcionamiento de la señal de los sistemas activos de radar

Fuente: IAFE, 2013

El **coeficiente de retrodispersión o backscattering** ( $\sigma^0$ ), es la intensidad reflejada media normalizada respecto a un área. Es una variable física que describe la cantidad de energía electromagnética que es reflejada hacia el radar desde un pixel o celda respecto a la energía que incide sobre el blanco. Depende de diversos parámetros del terreno: como la geometría,

la rugosidad, el contenido de humedad (propiedades dieléctricas); y parámetros del radar como la longitud de onda, el ángulo de incidencia y la polarización.

Los datos del coeficiente de retrodispersión o backscattering se pueden expresar en diferentes magnitudes (Salvia, 2010).

La *Potencia* ( $P$ ), es el flujo promedio por unidad de tiempo que recibe la antena y es la representación de  $\sigma^0$  en potencia del coeficiente de retrodispersión. A su vez, la potencia ( $P$ ) es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda ( $A$ ) y por lo tanto la raíz cuadrada del  $\sigma^0$  en potencia es el  $\sigma^0$  en *amplitud*. Finalmente,  $\sigma^0$  puede ser también expresado en su forma logarítmica denominado *decibeles*, cuyo rango dinámico puede alcanzar varios órdenes de magnitud en potencias de diez (figura 4.2).

Cuando se transforma la imagen de potencia a amplitud o decibeles, la estadística se modifica; por lo tanto, cada magnitud tendrá un comportamiento diferente en cuanto a la distribución de los datos: En potencia, el histograma de la imagen tiene una distribución Gamma; en Amplitud una distribución Rayleigh; y en decibeles la distribución es Gaussiana (Normal), como se observa en la figura 4.2. Cuando se utilizan procedimientos numéricos como clasificaciones, se usan los valores de coeficiente de retrodispersión en decibels.

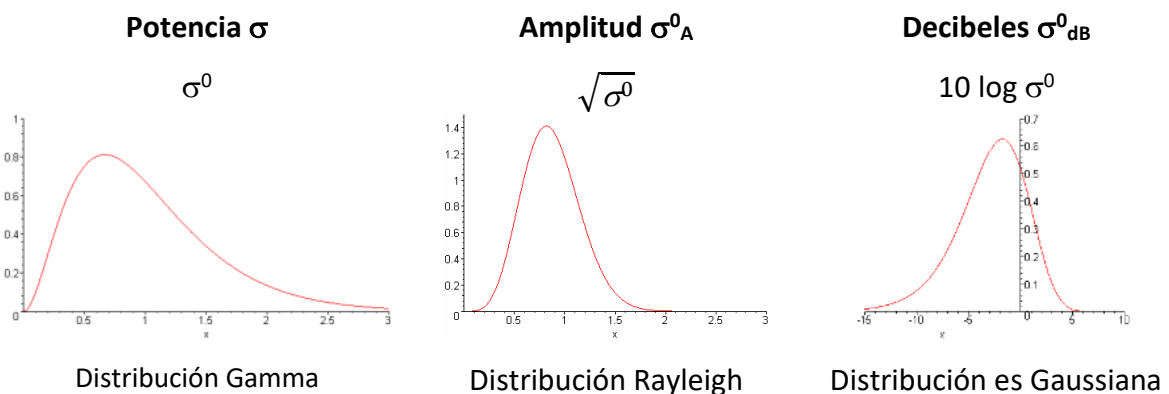


Figura 4.2. Magnitudes del coeficiente de Backscattering y la distribución de sus datos.  
Fuente: extraído de IAFE, 2013.

Las ondas *em* (electromagnéticas) se propagan por cambios en las oscilaciones de campos eléctricos ( $E$ ) y magnéticos ( $M$ ). La **polarización**, es la orientación del campo eléctrico, y se refiere a la orientación espacial del plano de oscilación del campo  $E$ . Los radares transmiten la radiación de microondas verticalmente ( $V$ ) u horizontalmente ( $H$ ), y la antena recibe la energía ya sea verticalmente u horizontalmente (algunos radares pueden recibir ambas) (figura 4.3).

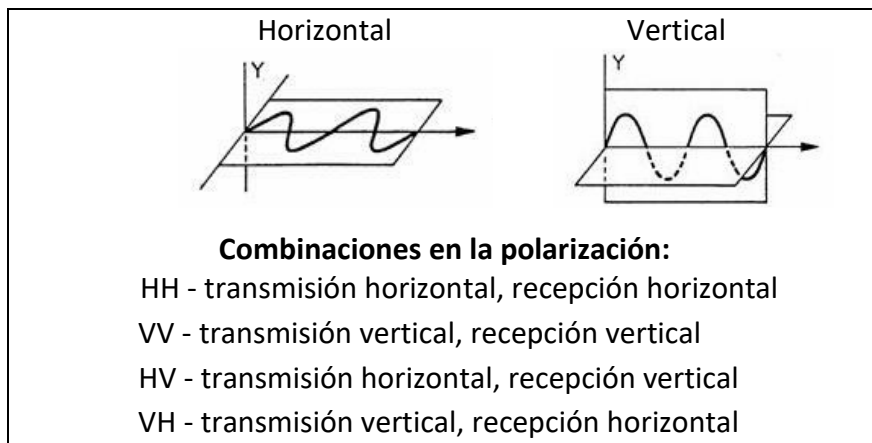


Figura 4.3. Diferentes formas de polarizaciones.

La polarización afecta a un radar en como se ve la superficie terrestre (Belmonte & Camaño, 2009). En relación a la conveniencia de las polarizaciones en las imágenes, Lanfri (2011), indica que cuando se centra en determinar cuerpos de agua, es preferible el modo de polarización HH dada la naturaleza horizontal del agua para diferenciar coberturas distintas. Además, existen evidencias teóricas y observacionales de que el coeficiente de retrodispersión  $\sigma_0$  con polarizaciones HH es más sensibles a cambios de altura del agua debajo de la vegetación (Grings et al., 2006).

Cuando se transmite una señal de microondas hacia la superficie terrestre, la señal retrodispersada será función de las características de la superficie. La *rugosidad* incide directamente en la intensidad de la señal de retorno, siendo mayor cuanto más elevada la rugosidad.

Existen diversos *métodos* para detectar cuerpos de agua con datos SAR, ya sean aquellos que requieren la supervisión del analista para la selección, o que se traten de métodos automatizados. Unos de las formas más comunes o tradicionales de detectar cuerpos de agua es la selección de umbrales sobre la intensidad de la imagen, los cuales requieren un método supervisado. Se utiliza esta técnica cuando hay una clara diferencia entre los objetos a extraer respecto al fondo de la escena (uniforme), es decir, similitudes entre los píxeles pertenecientes a un objeto y sus diferencias respecto al resto. Los cuerpos de agua actúan como una superficie especular, y por lo tanto su respuesta es baja (bajo coeficiente de retrodispersión), por lo que lucen como áreas oscuras; a diferencia de la reflexión difusa dada por las superficies rugosas (ej. tierra) que hacen que tengan mayor respuesta en la señal. Estas diferencias en las señales de retorno del agua y la tierra posibilitan una

adecuada discriminación entre las coberturas agua-tierra, características que hacen destacables a los sistemas radar (Lanfri, 2011; Belmonte & Camaño, 2009).

Para detectar umbrales generalmente se procede analizando el histograma de la imagen para un determinado objeto y su fondo distinto, entonces es de esperar que la representación de dicho histograma sea bimodal.

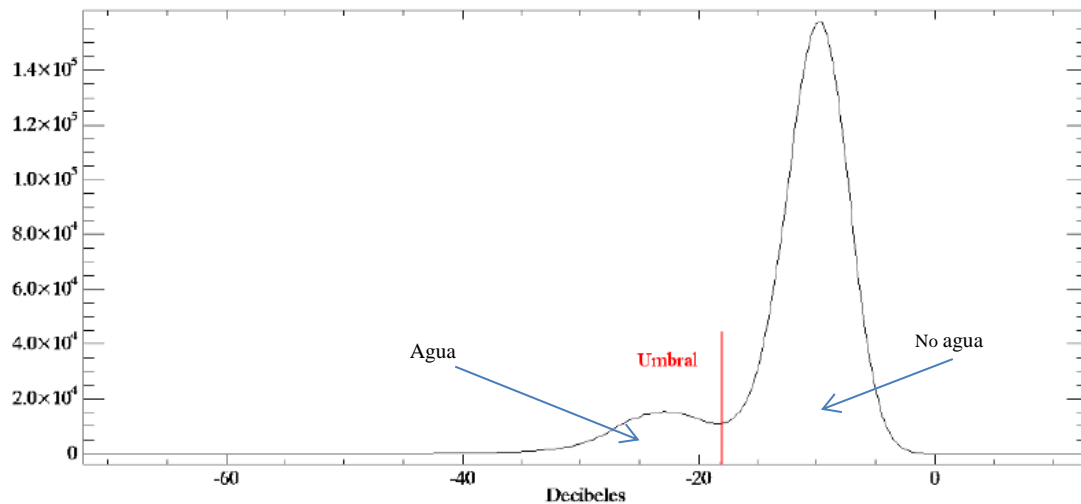


Figura 4.4. Ejemplo de un histograma de una imagen COSMO-SkyMed en decibios, mostrando el umbral entre los dos picos del histograma.

Fuente: Adaptado de Lanfri (2011).

### 4.3.2. RADAR DE APERTURA SINTÉTICA - SAR

Los **SAR** (Synthetic Aperture Radars) son sistemas activos ya que proporcionan su propia iluminación mediante pulsos de ondas electromagnéticas. Con el avance de la plataforma y un procesamiento especial en los ecos recibidos, los sistemas SAR simulan una antena muy larga y así aumentan la resolución en la dirección del movimiento.

Algunas de las características que hacen del SAR un instrumento único en sensado remoto son (Lanfri, 2011):

- ✓ Sensado diurno/nocturno y en todas las condiciones climáticas.
- ✓ Resolución geométrica independiente de la altura del sensor o longitud de onda.
- ✓ Características únicas propias de los datos de la región de microondas del espectro electromagnético.

A medida que el SAR avanza y un determinado blanco entra en el haz del radar, todos los ecos retrodispersados de ese objeto van siendo almacenados. El punto en el que el blanco deja de ser iluminado determina la longitud de la antena simulada.

La figura 4.5, es un ejemplo del comportamiento de un SAR durante la adquisición de las imágenes (Panno, 2012):

Cada vez que el radar envía una señal de microondas, lo hace en forma oblicua y perpendicular a la dirección de vuelo. Cada pulso enviado, ilumina un área de la superficie terrestre, dicha área se llama *pisada de la antena*, y retornan los ecos de cada *blanco* o *target* que ilumina.

En un sistema radar, la resolución tiene dos dimensiones, la dirección en azimut, y la dirección en rango. La dirección en *azimut* es la dirección paralela al movimiento de la plataforma, dada por el ancho angular del haz y la distancia en *rango oblicuo* que determina el patrón de iluminación. La dirección en rango determina la distancia que existe entre el sensor y el blanco.

En esta dirección los ecos del radar se separan utilizando las diferencias de tiempo entre dos ecos que provienen de distintos elementos de la superficie. Ambas direcciones dan como resultado el área iluminada por el radar.

La región iluminada para formar la imagen se llama *ancho de barrido*, y está determinada por el *rango cercano*, que representa el área iluminada más cercana al nadir (intersección entre la superficie terrestre y la normal a ella que pasa por el satélite; y el *rango lejano*, es decir el área iluminada más lejana al nadir).

El ángulo de incidencia, es el ángulo entre el rayo del radar y la superficie terrestre. Dicho ángulo aumenta desde rango cercano a lejano.

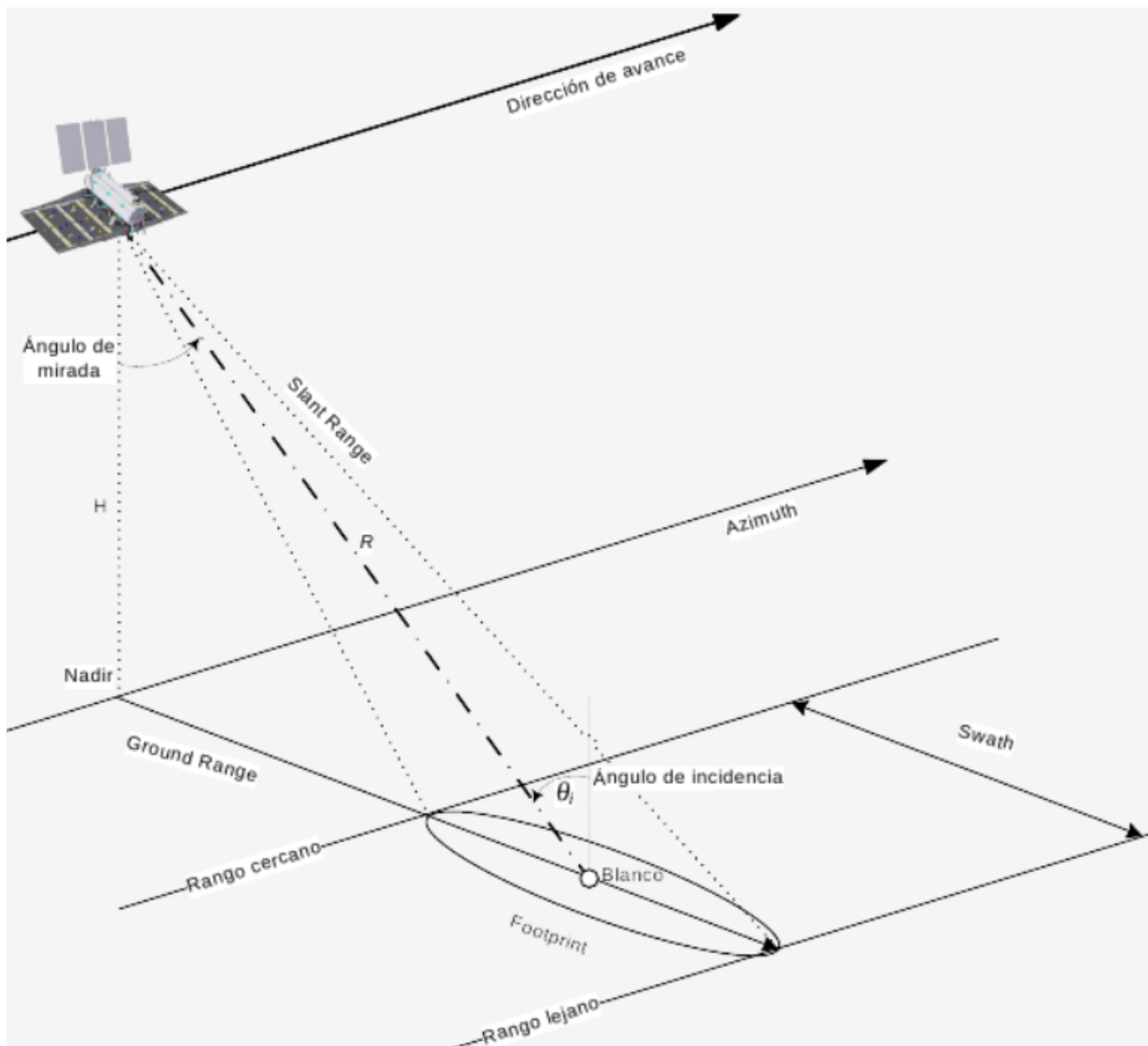


Figura 4.5 Ejemplo de la geometría de vuelo de un SAR

La **calibración** a nivel de usuario de las imágenes SAR se realiza para ajustar los posibles cambios temporales en la ganancia de la antena y en las condiciones de saturación de la señal, y para convertir los valores de amplitud de cada píxel (números digitales) a valores de brillo o de coeficiente de retrodispersión  $\sigma^0$  en potencia corregidos por rango, indispensable para estudios multitemporales (Salvia, 2010).

El *ruido* o *Speckle* es la interferencia a gran escala. Al ser los objetos reflectores irregulares, los rayos emitidos por el radar regresan al sensor habiendo recorrido distintas distancias y habiendo acumulado así diferencia de fase. El ruido, limita la capacidad para interpretar las imágenes SAR: reduciendo la capacidad de distinguir bordes, la segmentación de la imagen, el reconocimiento y la clasificación de blancos, y al generar incertezas en la inversión de parámetros biofísicos. Dentro de los procedimientos para reducir el efecto ruido o speckle, se



encuentra el multilooking, cuyo objetivo principal es reducir la varianza que introduce el speckle con respecto a la media de la imagen; el cual produce una división en el haz del radar en varios haces más angostos (angularmente). Cada sub-haz provee una “mirada” independiente de la escena iluminada, los datos se procesan en secciones que luego se combinan.

### 4.3.3. COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), es un SAR de la Agencia Espacial Italiana – ASI, y el Ministerio de Defensa de Italia. Opera en una constelación de cuatro satélites, radar de dimensión media y órbita baja (destinado para defensa civil y observaciones terrestres). Cada satélite está equipado con un Radar de Apertura Sintética (SAR) operando en banda X (de 2.4 a 3.75 cm / 12.5 a 8 GHz) del espectro electromagnético).

Entre las características que destacan al sistema COSMO se encuentran: disponibilidad de una constelación de satélites posibilitando un alto tiempo de revisita y capacidad de respuestas; permite una cobertura global tanto de día y de noche; alta resolución espacial y calidad de imágenes; además una alta cobertura y capacidad para el análisis de detección de cambios (a través de un plan de adquisición multitemporal).

Los modos de medición (adquisición) de COSMO SkyMed se presentan en la figura 4.6.

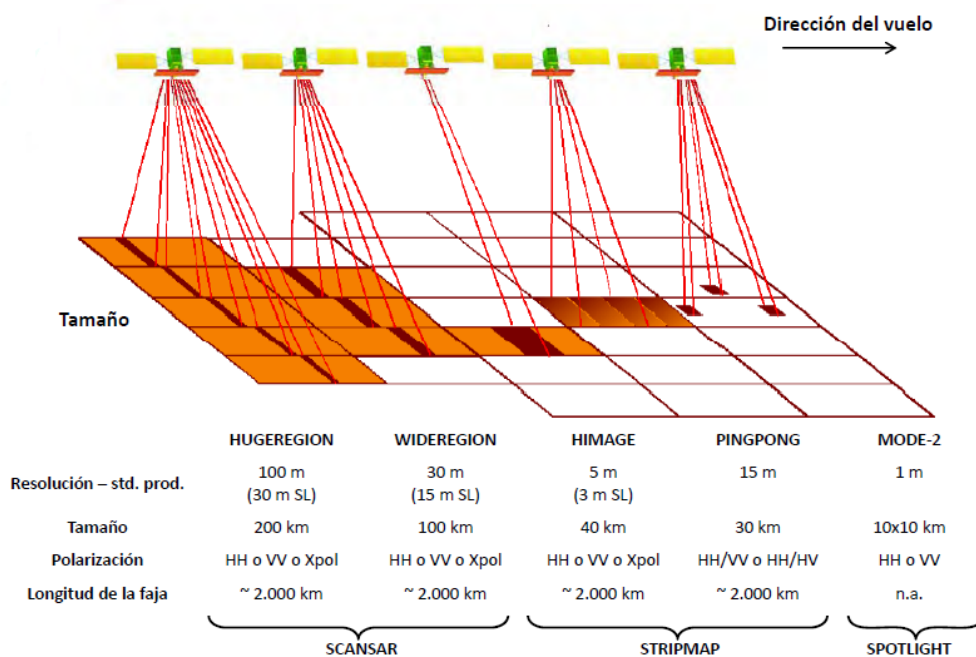


Figura 4.6. Modo de adquisición COSMO SkyMed.

Fuente: Adaptado de Roca, 2014.

Los productos de COSMO-SkyMed, están disponibles en diferentes niveles de procesamientos (COSMO-SkyMed SAR Products Handbook, 2009):

- **Nivel 0**, definido como datos crudos a bordo (después del descifrado y antes del desempaquetamiento) asociados con datos auxiliares incluyendo datos de calibración requeridos para producir productos de niveles mayores. Los datos son números complejos representado por un par de números: el componente en-fase real (I) y el componente de cuadratura imaginario (Q).

- **Nivel 1A**, producto Single-look Complex Slant (SSC): definido como datos crudos enfocados en formato complejo, y en proyección slant range-azimuth (proyección de adquisición natural del sensor). El procesamiento aplicado a los datos de nivel 0 es:

- Compensación de la ganancia del receptor.
- Calibración interna.
- Enfoque de datos.
- Estimación de estadísticas de los datos de salida.
- Formateo de datos de salida.

- **Nivel 1B**, producto Detected Ground Multi-look (DGM): obtenido mediante la detección, el multi-looking y la proyección sobre una grilla regular de los datos Single-look Complex Slant. Es un producto ecualizado radiométricamente de manera interna, sin speckle (detección en amplitud). El procesamiento aplicado a los datos de nivel 1A es el siguiente: Reducción del ruido speckle mediante multi-looking; detección de imagen (amplitud): la detección remueve la información de fase del archivo de datos; proyección elipsoide; evaluación de estadística; formateo de datos.

- **Nivel 1C** (GEC) y **1D** (GTC), producto geocodificado: obtenido mediante la proyección del producto 1A sobre una grilla regular en un determinado sistema de referencia cartográfico. En el caso del nivel 1C la superficie es el elipsoide terrestre, mientras que en el nivel 1D un DEM es utilizado para aproximar la superficie terrestre real.

## 4.4. METODOLOGÍA

### 4.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES UTILIZADAS

Las imágenes COSMO SkyMed fueron provistas por CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) en el marco de la maestría de Aplicaciones Espaciales y Respuesta Temprana a Emergencias. Debido al alcance regional del área de estudio, se escogieron imágenes con un cubrimiento regional. Dentro de los productos que posee COSMO SkyMed, se eligieron las ScanSAR - Huge Region cuyo ancho de barrido es de 200 km x 200 km aproximadamente, las cuales abarcan gran parte de la cuenca, para ello fueron necesarias 2 imágenes por cada mes de análisis (figura 4.7).

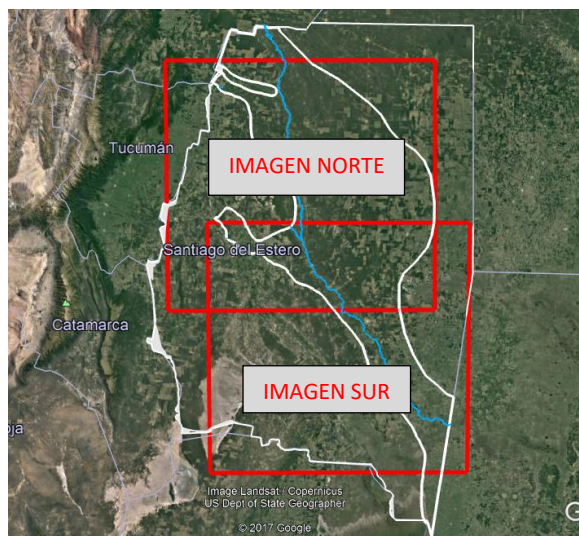


Figura 4.7. Cobertura de las imágenes Huge Region, modo ScanSAR

La tabla 4.1, presenta las características principales del sistema satelital utilizado.

Tabla 4.1. Características generales de las imágenes Scan SAR / Huge Region – COSMO SkyMed

	<b>COSMO Sky-Med - ScanSAR</b>
Agencia espacial	ASI (Agencia Espacial Italiana)
Modo	Huge Region
Ancho de barrido	200 km
Tamaño del pixel	100m x 100m
Polarización	Single HH
Angulo de incidencia	40
Longitud de onda	Banda X ~ 3 cm
Nivel de procesamiento	1C
Pass	Descendente
Sistema de referencia	WGS84

Los nombres de archivos de COSMO SkyMed se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Nominación de las imágenes SAR COSMO SKYMed utilizados

<b>Fecha y centro de escena</b>	<b>Nombre de archivo de las imágenes empleadas</b>
19/02/2014 27°9' lat y 63°32' long	CSKS4_GEC_B_HR_00_HH_RD_SF_20140219213438_20140219213508.h5
17/02/2014 28°43' lat y 63°11' long	CSKS1_GEC_B_HR_01_HH_RA_SF_20140217103506_20140217103536.h5
* 11/03/2014 27°10' lat y 63°32' long	CSKS1_GEC_B_HR_00_HH_RD_SF_20140311213431_20140311213501.h5
24/04/2014 27°10' lat y 63°31' long	CSKS4_GEC_B_HR_00_HH_RD_SF_20140424213419_20140424213449.h5
13/04/2014. 28°41' lat y 63°8' long	CSKS4_GEC_B_HR_01_HH_RD_SF_20140413212848_20140413212919.h5
14/05/2014. 27°10' lat y 63°32' long	CSKS1_GEC_B_HR_00_HH_RD_SF_20140514213417_20140514213447.h5
15/05/2014 28°42' lat y 63°8' long	CSKS4_GEC_B_HR_01_HH_RD_SF_20140515212840_20140515212910.h5

La descripción de la nomenclatura de la identificación de los archivos de las imágenes se expone en el anexo 4.

#### **4.4.2. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES COSMO SKYMED**

Se monitorearon los cuerpos de agua durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo. En el procesamiento de las imágenes se utilizaron dos tipos de softwares: El software SNAP, y el ENVI. En la figura 4.8, se presenta el esquema general del procedimiento metodológico llevado a cabo.

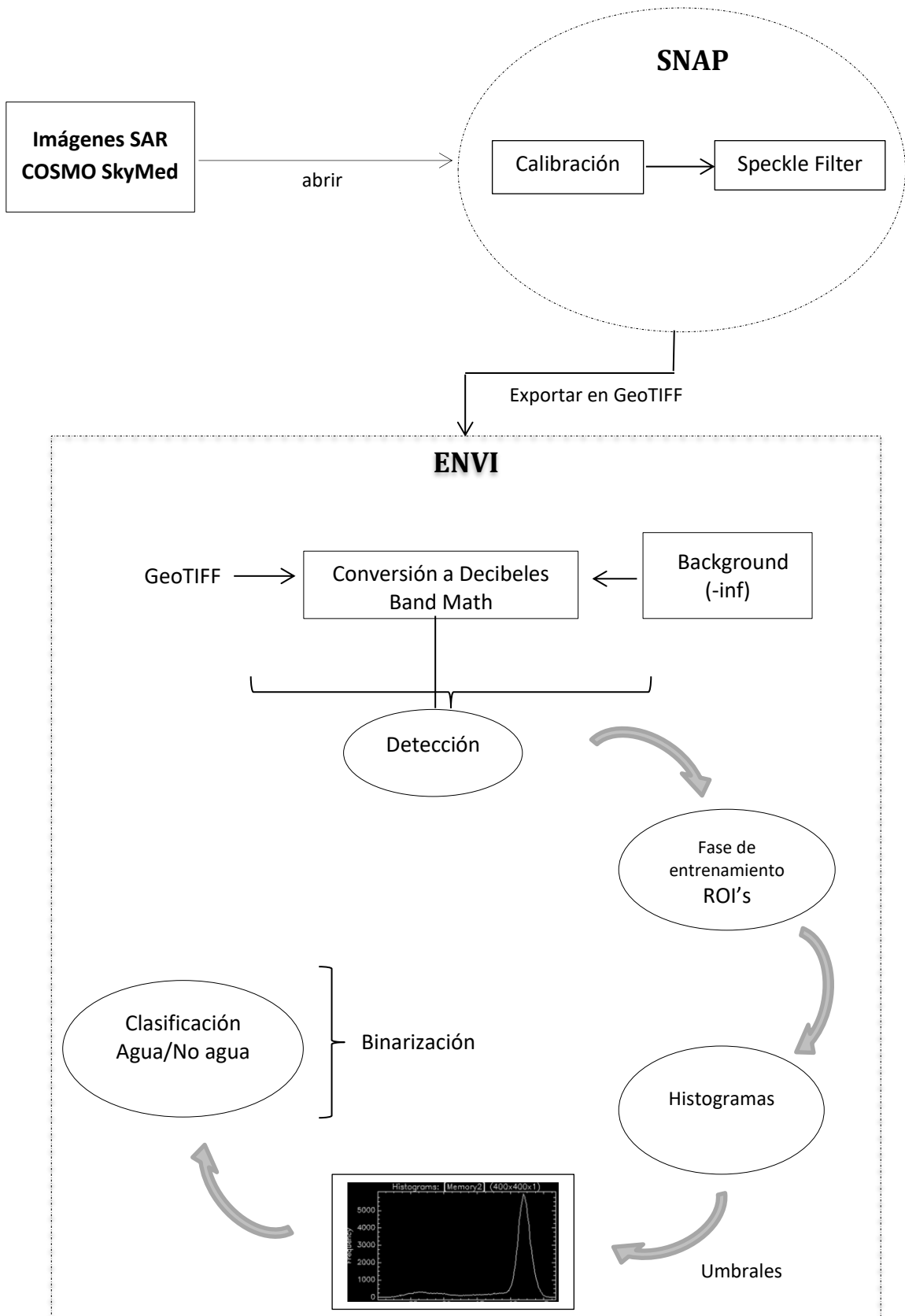


Figura 4.8. Esquema del Proceso metodológico utilizado

A continuación se especifica cada paso del esquema metodológico expresado en la figura 4.8.

## Programa computacional SNAP:

*Calibración radiométrica:* se calibraron las imágenes en forma automática con el software SANP mediante los siguientes módulos (figura 4.9). Con este procedimiento se convirtieron los datos de las imágenes de Números digitales (amplitud) a potencia.

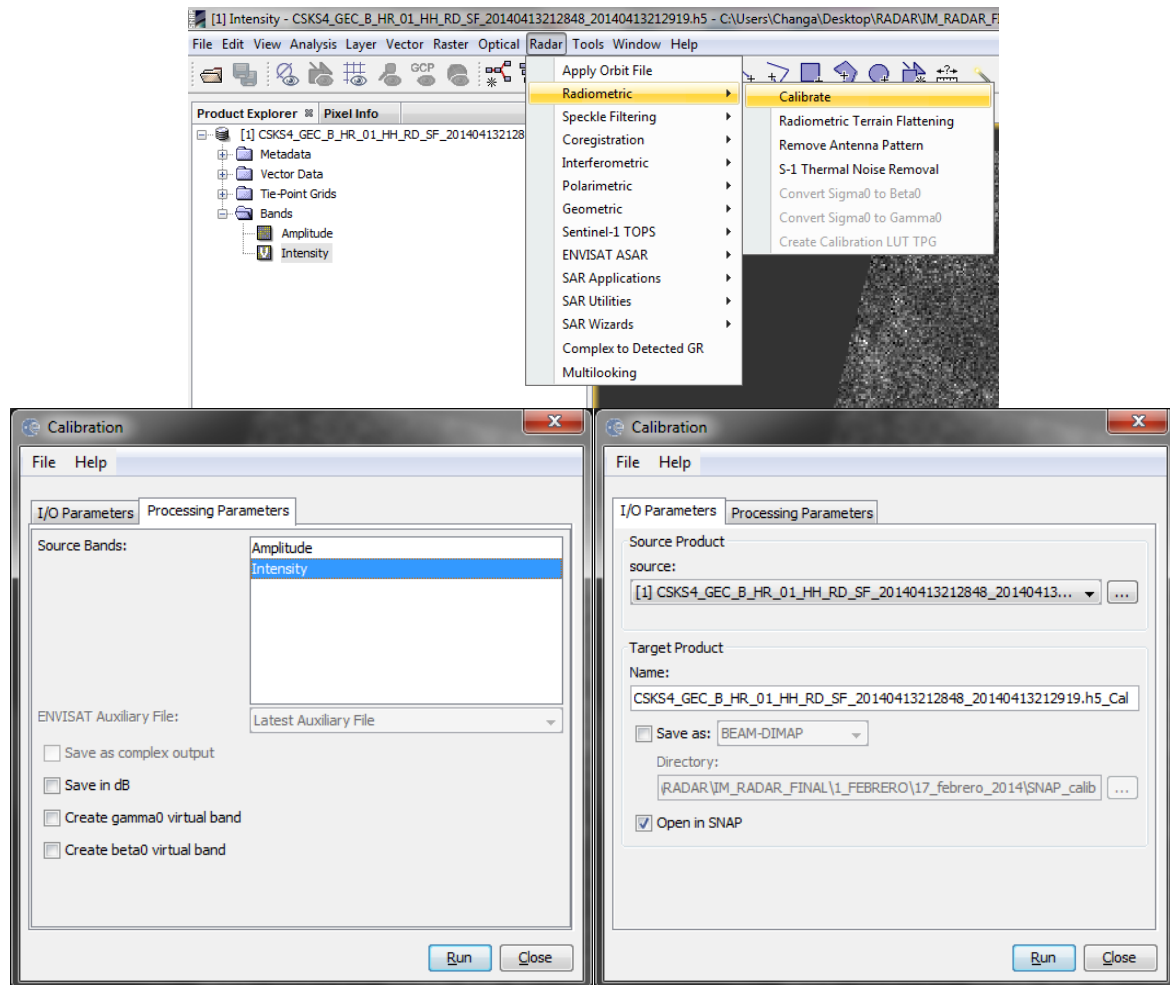


Figura 4.9. Calibración de las imágenes con el Software SANP

*Speckle Filter:* Para el proceso de filtrado se escogió el filtro denominado “Refined Lee”. Figura 4.10.

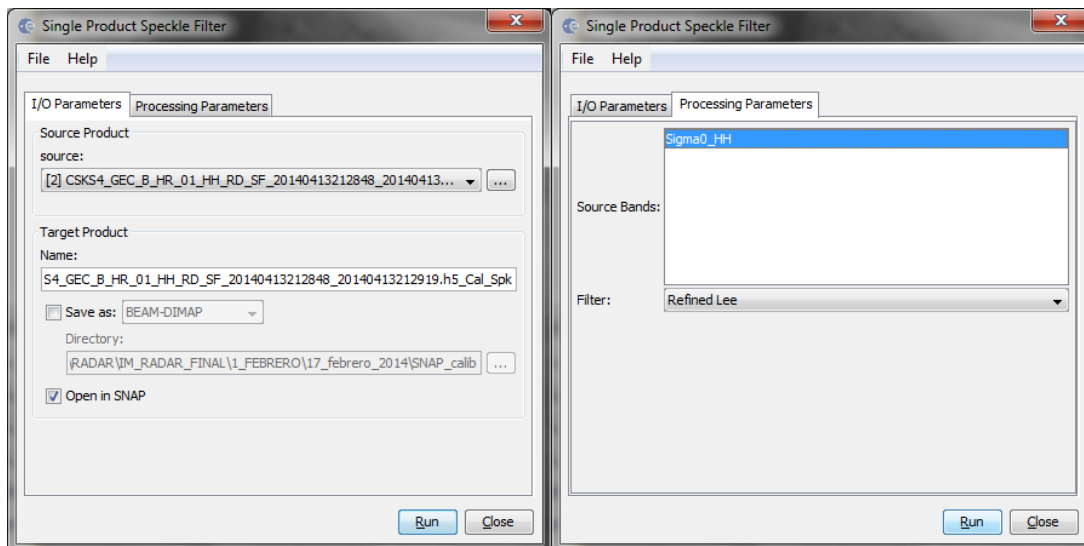


Figura 4.10. Aplicación del filtro “Refined Lee”

- 1- *Exportar como GeoTIFF*: Una vez procesadas las imágenes, es decir, calibradas y con el filtro correspondiente, se exportaron las imágenes en GeoTIFF.

### Programa computacional ENVI:

*Conversión a Decibeles*: Las imágenes exportadas en formato GeoTIFF, previamente calibradas y filtradas contienen los valores de los datos en amplitud. Para poder clasificar las imágenes, es necesario normalizar los datos, este procedimiento se realiza convirtiendo los valores a Decibeles mediante el módulo *Band Math* (figura 4.11).

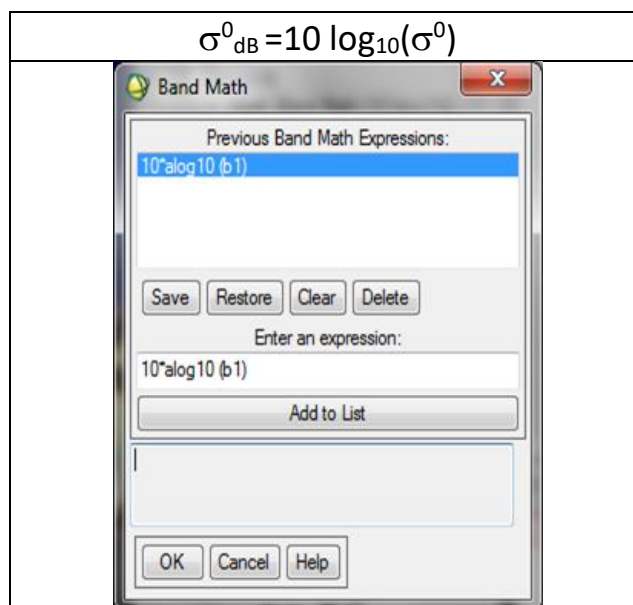


Figura 4.11. Conversión a dB mediante el módulo Band Math

- 1- *Extracción del Background*: Se generó una máscara para extraer los valores identificados como “-infinity” (background) que se generan luego de pasar a dB a cada una de las imágenes. Los procedimientos en ENVI fueron:  
Módulo Basic Tools => Masking => Build Mask (figura 4.12). Con lo cual se genera una máscara con los valores de background igual a cero.

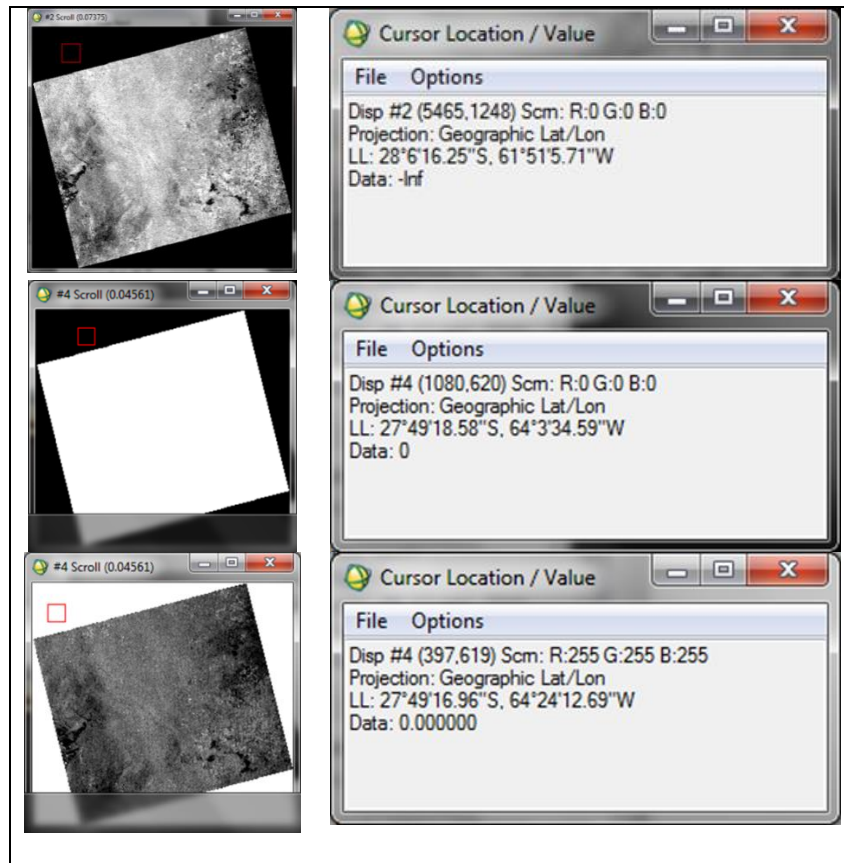


Imagen 4.12. Extracción del background de los valores que generan los dB (-inf), y aplicación de la banda con background 0. Resultado final, background con valor 0.

## Detección de los cuerpos de agua: Fase de entrenamiento

En la figura 4.13, se ilustra el procedimiento usado para la detección de los cuerpos de agua. Se seleccionaron las muestras de entrenamiento de las clases agua – tierra.

*Selección de muestras ROI's*: Mediante el módulo Regiones de Interés (ROI's - Region of Interest), se detectaron sub-muestras del volumen de datos de la imagen sobre el que serán calculados los datos los valores de reflectancia (backscattering) de las clases “agua” y “no agua”, tomando cantidades similares y homogéneos de píxeles de cada categoría (figura 4.13 - a).



*Histogramas:* Desde el menú ROI => Statistics => Select plot => Histograms for all ROI, se seleccionaron todas las muestras para identificar el valor umbral en la distribución de los datos. Un histograma muestra con qué frecuencia aparece cada valor de la magnitud representada en una banda. En este caso, como muestra la figura 4.13 – b, para el conjunto de datos de dos muestras (agua – no agua), se observan dos picos. Se toma un valor aproximado entre los dos picos para calcular la separación de ambas clases, en este caso, el valor escogido es de -13.

*Clasificación:* Mediante el módulo Band Math se extrajo la clase agua como se muestra en el ejemplo de la figura (4.13 – c) para un valor umbral de -13; con lo cual se generan la clasificación requerida.

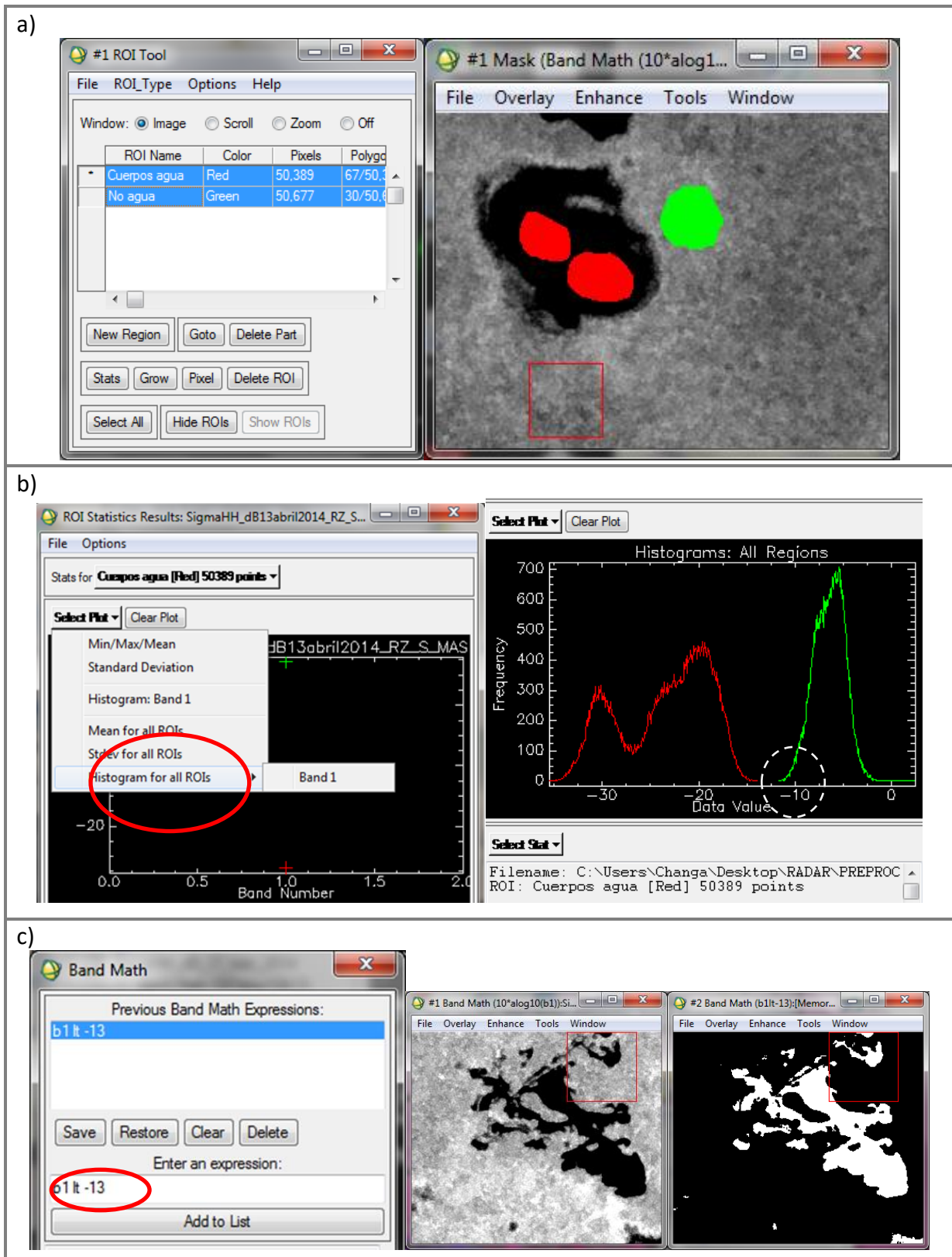


Figura 4.13. Procedimiento para la detección de cuerpos de agua.

## 4.5. RESULTADOS

A continuación en la figura 4.14, se muestra un ejemplo de los resultados de las imágenes calibradas con el software SNAP.

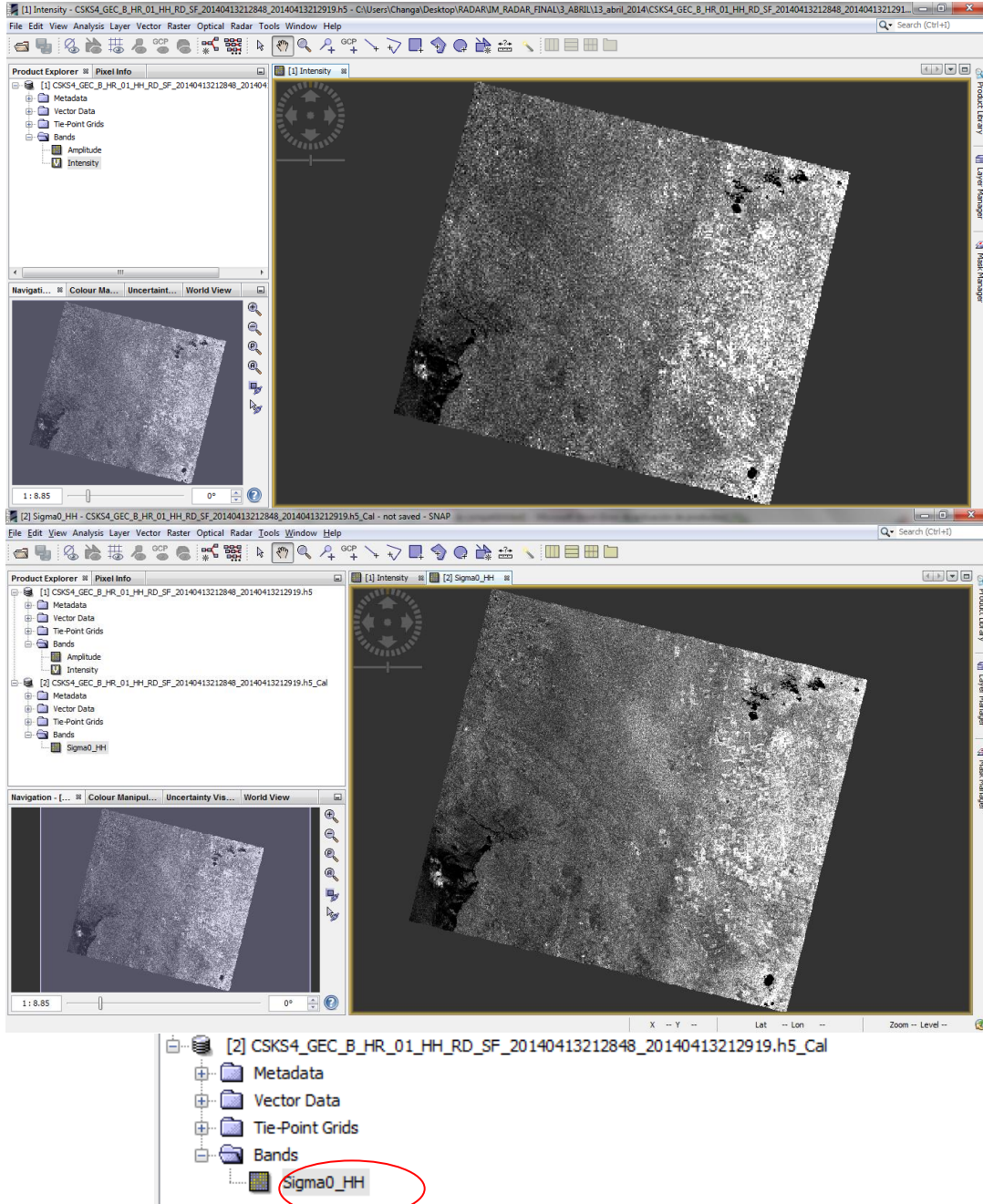


Figura 4.14. Resultados de una imagen calibrada. Conversión de potencia a Sigma0.

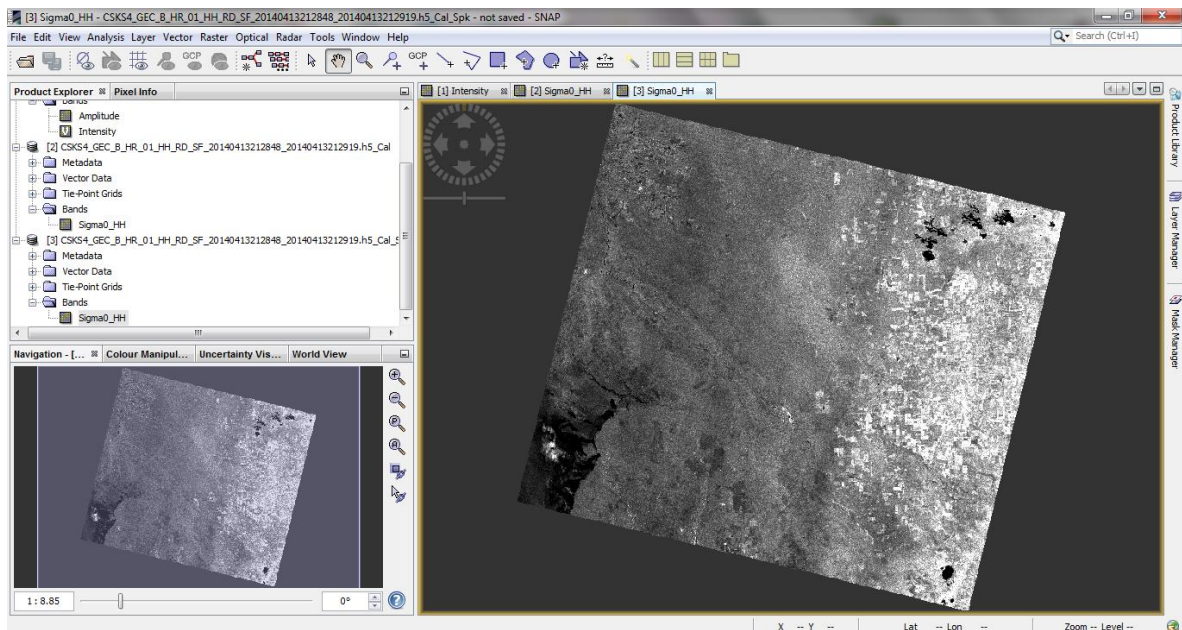


Figura 4.15. Aplicación del filtro Lee.

#### 4.5.1. COMPARACIÓN DE LOS DATOS SAR Y ÓPTICOS LANDSAT

En la siguiente figura 4.16, se visualizan los productos ópticos y radar, destacándose la transparencia de las coberturas nubosas de las imágenes.

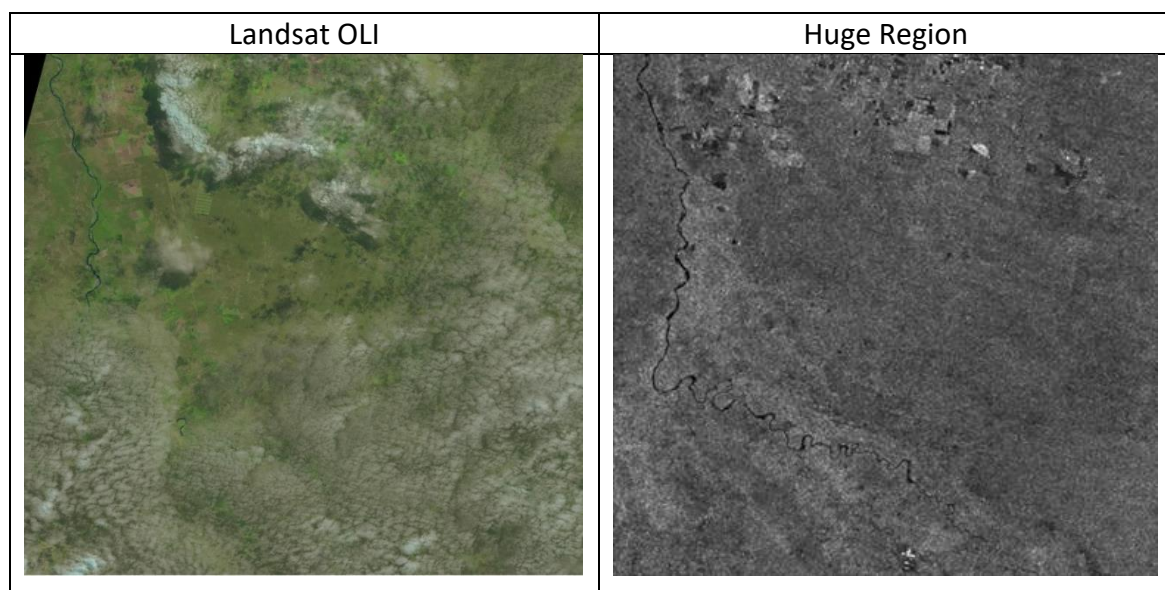


Figura 4.16. Comparación entre una imagen Landsat y Radar, mostrando la transparencia a las coberturas nubosas de una imagen radar.

La señal del backscattering en decibeles, muestran valores bajos en las áreas cubiertas de agua respecto a su entorno tierra (figura 4.17).

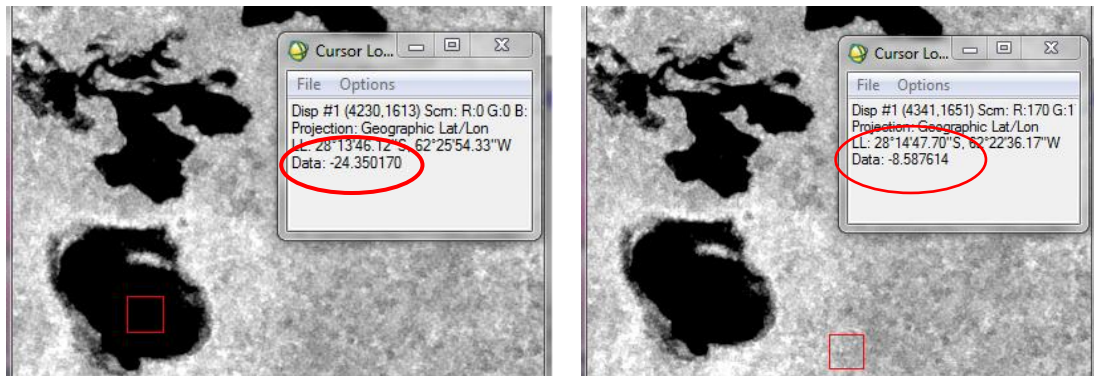


Figura 4.17. Comparación de los valores de reflectancia en dB. Valores “agua” y “tierra”.

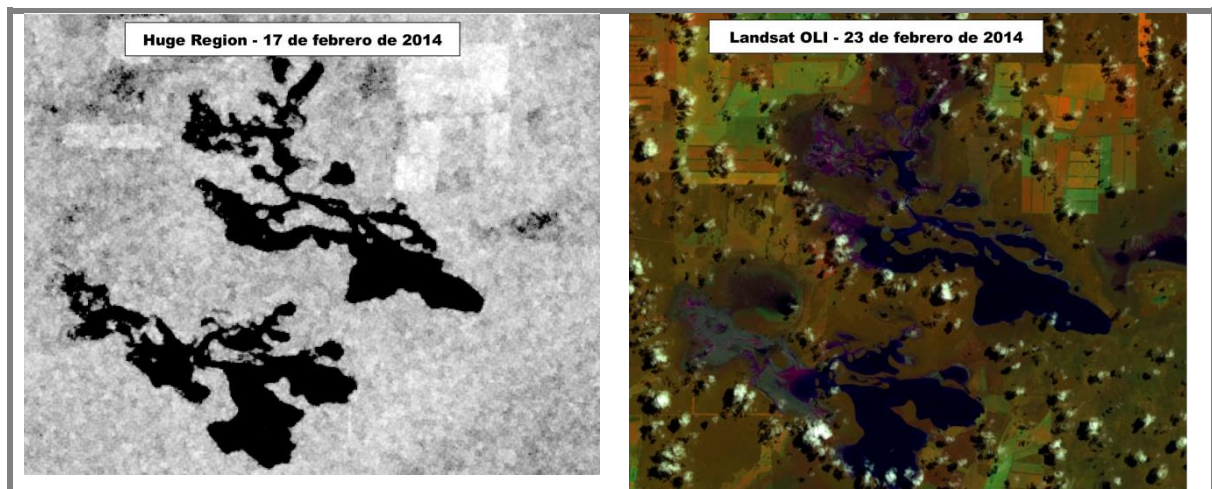


Imagen 4.18. Visualización de un cuerpo de agua en una imagen radar y en una imagen óptica.

La imagen 4.18 expresa el alto contraste y la claridad en los umbrales que existen entre los sistemas SAR y los ópticos.

#### 4.5.2. ANÁLISIS DE LOS CUERPOS DE AGUA EN LAS IMÁGNES RADAR

A continuación en la figura 4.19, se muestran los cuerpos de agua que han resultado producto del procesamiento de las imágenes HUGE REGION – SCAN SAR durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo del año 2014. En relación al mes de marzo, sólo se tuvo disponibilidad de la imagen Norte, con fecha 11 de marzo.

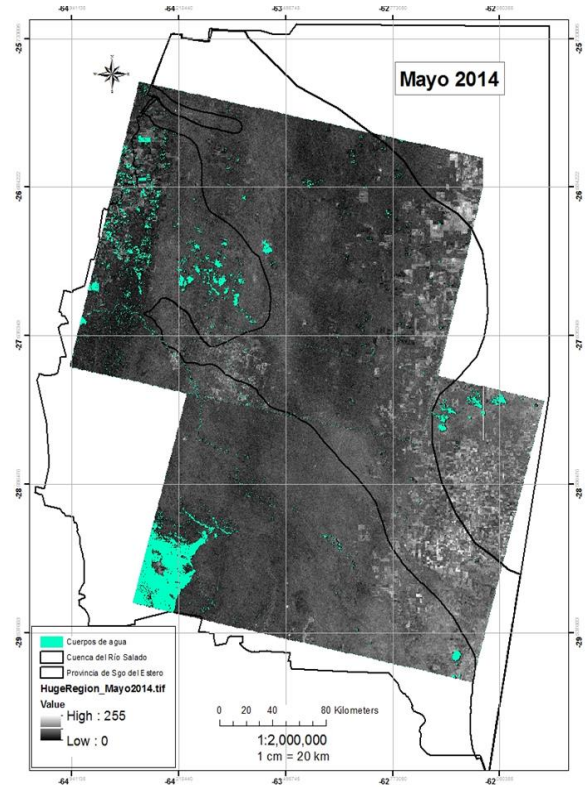
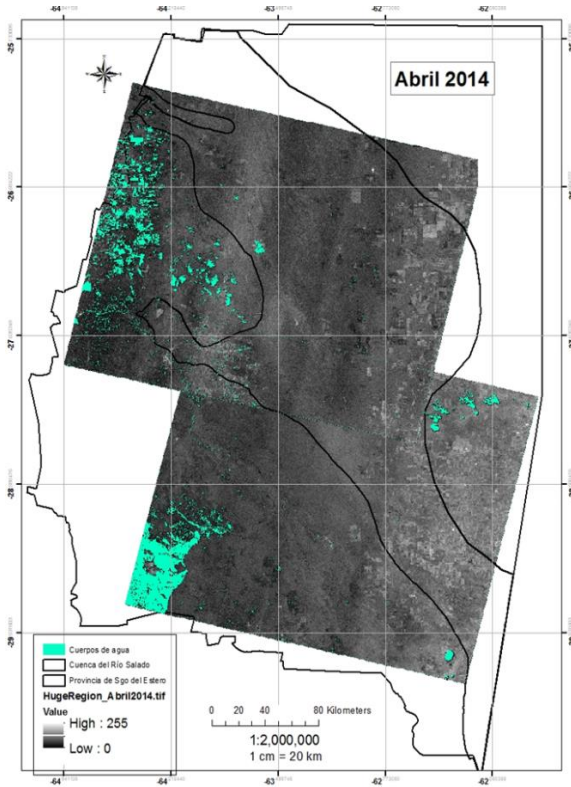
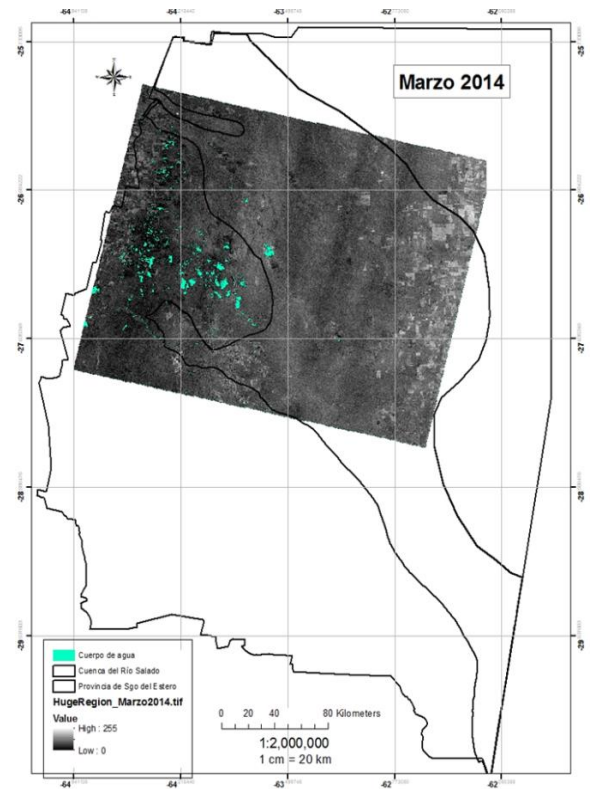
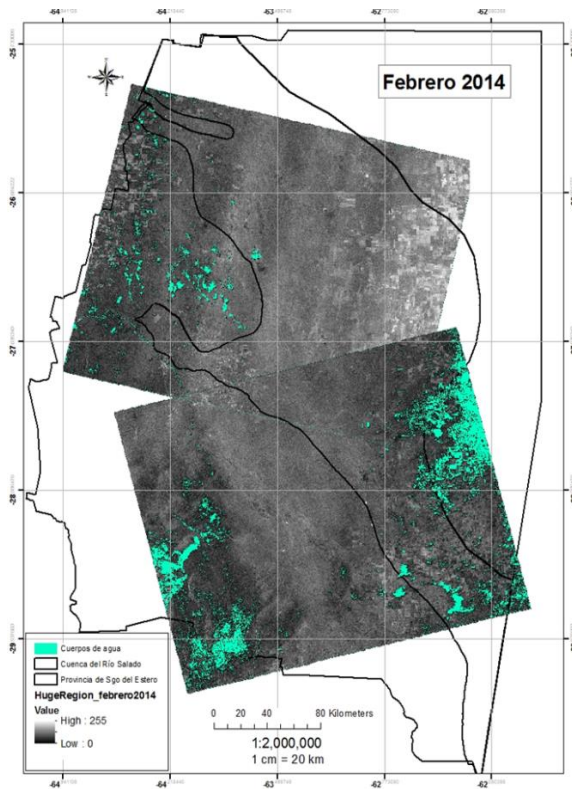


Imagen 4.19. Mapas de cuerpos de agua presentes durante los meses febrero, marzo, abril y mayo del año 2014. Fuente: elaboración propia

### 4.5.3. ANÁLISIS DE LA IMAGEN-SUR DEL MES DE FEBRERO

En el período analizado, se destaca la imagen de la zona Sur de la figura 4.20, con fecha del 17 de febrero, donde se observan mayores superficies de cuerpos de agua respecto de los demás meses. Hay distintas cuestiones a analizar respecto a esta imagen. En primer lugar, la imagen de febrero tiene una órbita ascendente, lo que sugiere como primer punto de análisis que las zonas oscuras sean producto de la dirección de enfoque. La posibilidad de adquirir imágenes tanto en órbita ascendente como descendente, hace posible que en una misma zona geográfica pueda observarse desde lados opuestos, bajo distintas condiciones de iluminación (Marchionni & Cavayas, 2014).

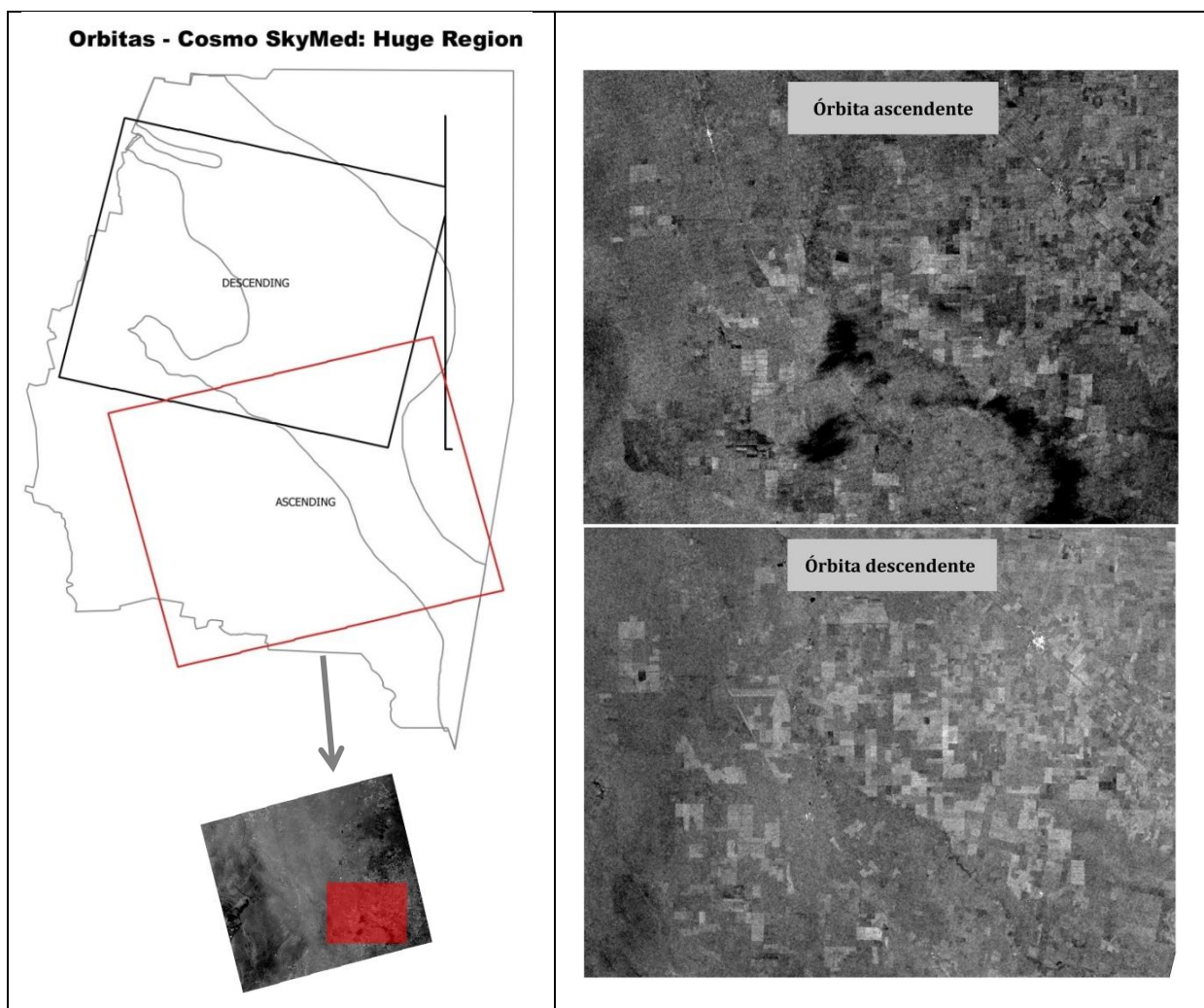


Figura 4.20. Primer recuadro: Mapa ilustrativo de las órbitas descendentes y ascendentes del modo ScanSAR. Segundo recuadro: Comparación de la misma escena en imágenes de diferentes órbitas. La imagen de órbita ascendente corresponde al febrero. La imagen descendente corresponde al mes de abril. Fuente: Elaboración propia  
Para validar la información se recurrió a diferentes fuentes:

La validación de la información no se pudo realizar con las imágenes Landsat debido a la gran cobertura de nubes presentes, lo cual imposibilitó determinar fehacientemente si se trata de zonas inundadas, o debido a las condiciones de iluminación del sensor.

Por otro lado, se recurrió a los registros en los medios de comunicación:

Entre los reportes de inundaciones durante el mes de febrero, se informaron sobre inundaciones localizadas en el paraje “El Cuadrado” y zonas aledañas [<http://www.lanacion.com.ar/1672714-santa-fe>, fecha de redacción: domingo 16 de marzo de 2014]. El paraje El Cuadrado, se localiza en la zona limítrofe a la provincia de Santa Fé. En la figura 4.21, se muestra la localización cartográfica del paraje El Cuadrado.

Otra de las informaciones que fue suministrada por “Página 12”, informaron sobre las pérdidas de superficies de áreas sembradas por inundación en los departamentos Taboada, Aguirre y Belgrano. *“En Santiago del Estero, en tanto, el Ministerio de la Producción estimó que se inundaron unas 400 mil hectáreas de campos con cultivos, cuyas estimaciones de pérdida rondarían unos 600 millones de pesos en el sudeste de la provincia. Los campos anegados se encuentra en los departamentos de Belgrano, General Taboada, Aguirre y Robles, con cultivos de soja, maíz, algodón, alfalfa y cebolla”* [<https://www.pagina12.com.ar/diario/ultimas/20-267616-2014-03-28.html>, fecha de redacción: Jueves 28 de marzo de 2014] (Figura 4.21).



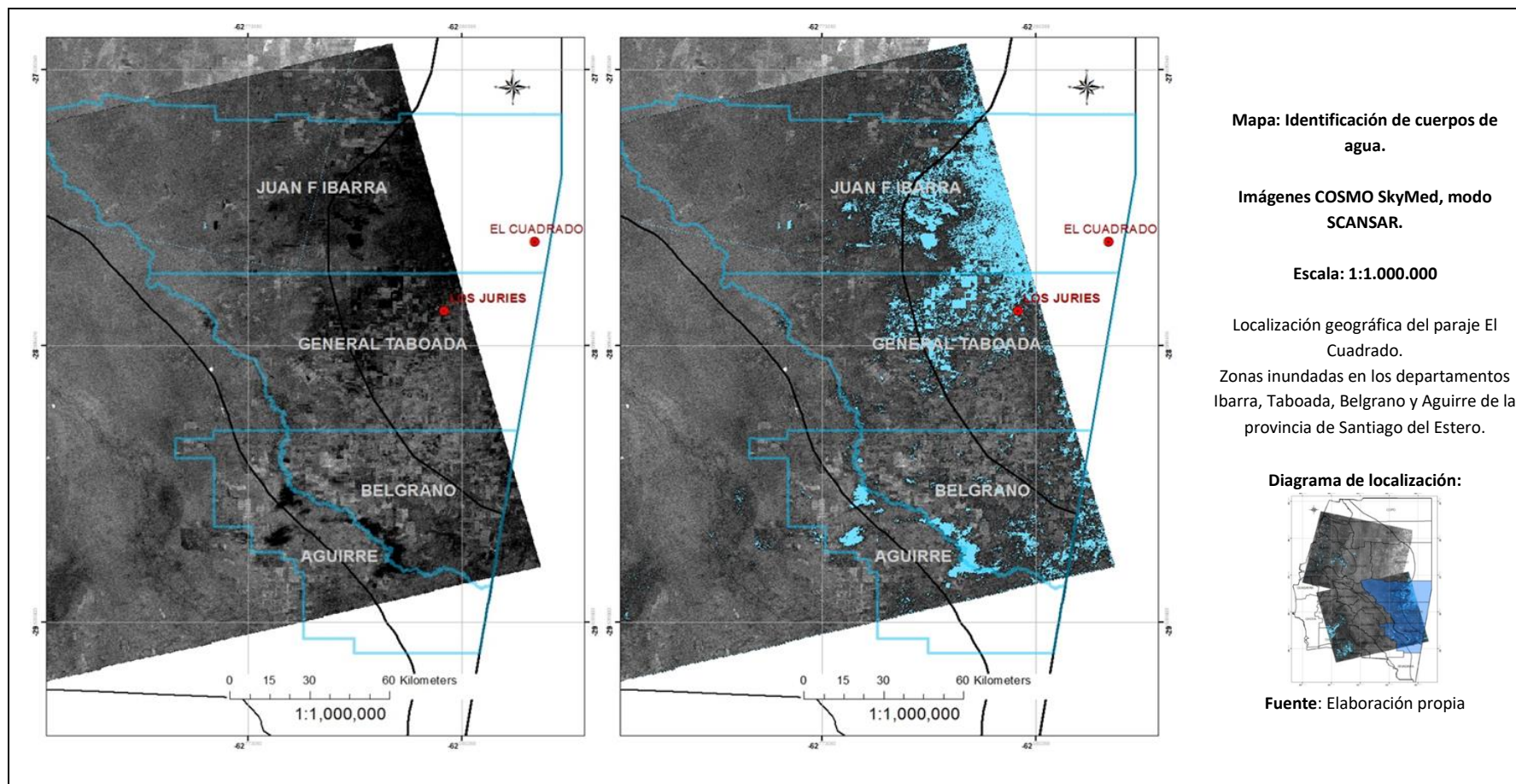


Figura 4.21. Cuerpos de agua en el Sureste de la provincia de Santiago del Estero.

La distribución de las zonas inundadas del mes de febrero detectadas por los datos SAR tiene una distribución similar con los datos de la plataforma SUMA (registro de inundaciones históricas determinados desde el año 2010 hasta el año 2015). Al comparar los cuerpos de agua de las imágenes de febrero con los registros de los “Productos de inundaciones historicas” de la Plataforma SUMA, se muestra cierta similitud en cuanto a la distribución de las zonas inundadas, determinado por el número de veces que un pixel está cubierto de agua, mediante imágenes MODIS de resolución espacial de 500 metros (Andreo, 2015).

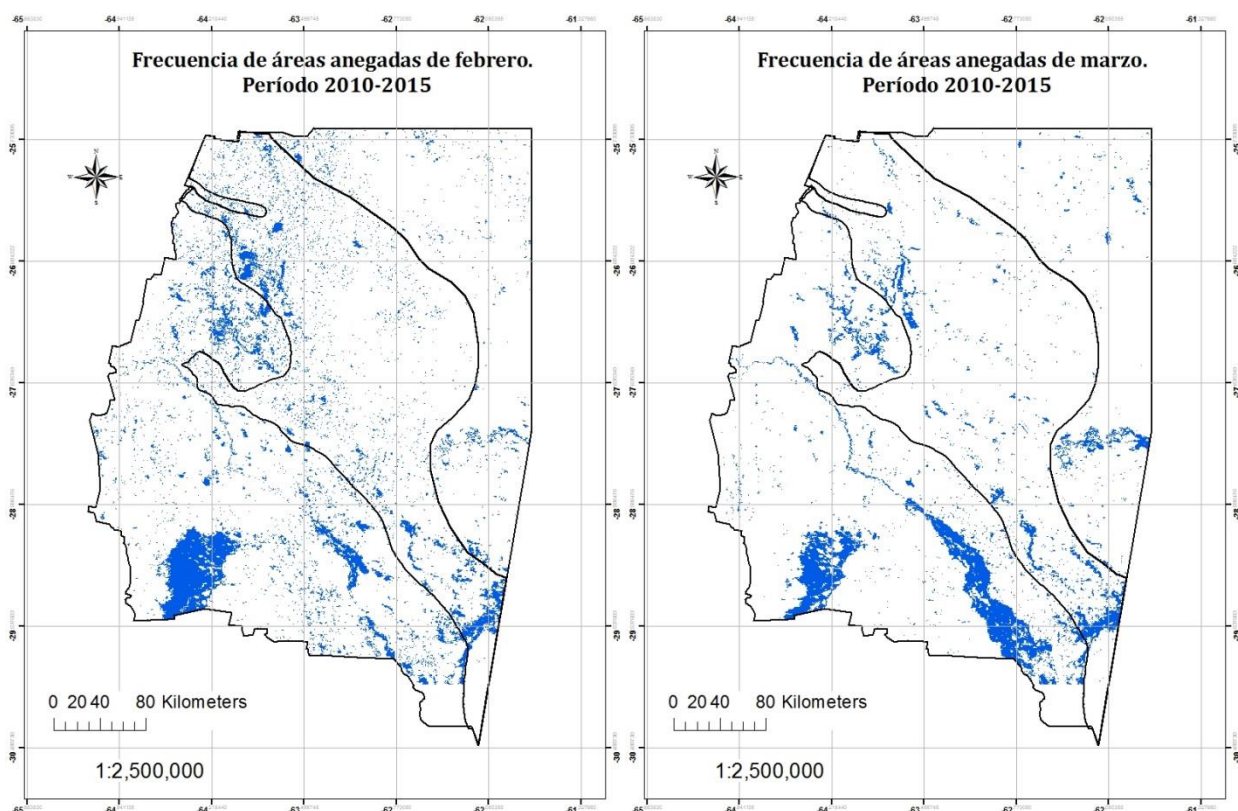


Figura 4.22. Frecuencia de anegamientos.

Fuente: Elaboración propia.

Fuente de datos: Plataforma SUMA [<http://udege-admin.unc.edu.ar/udegeide/composer/>]

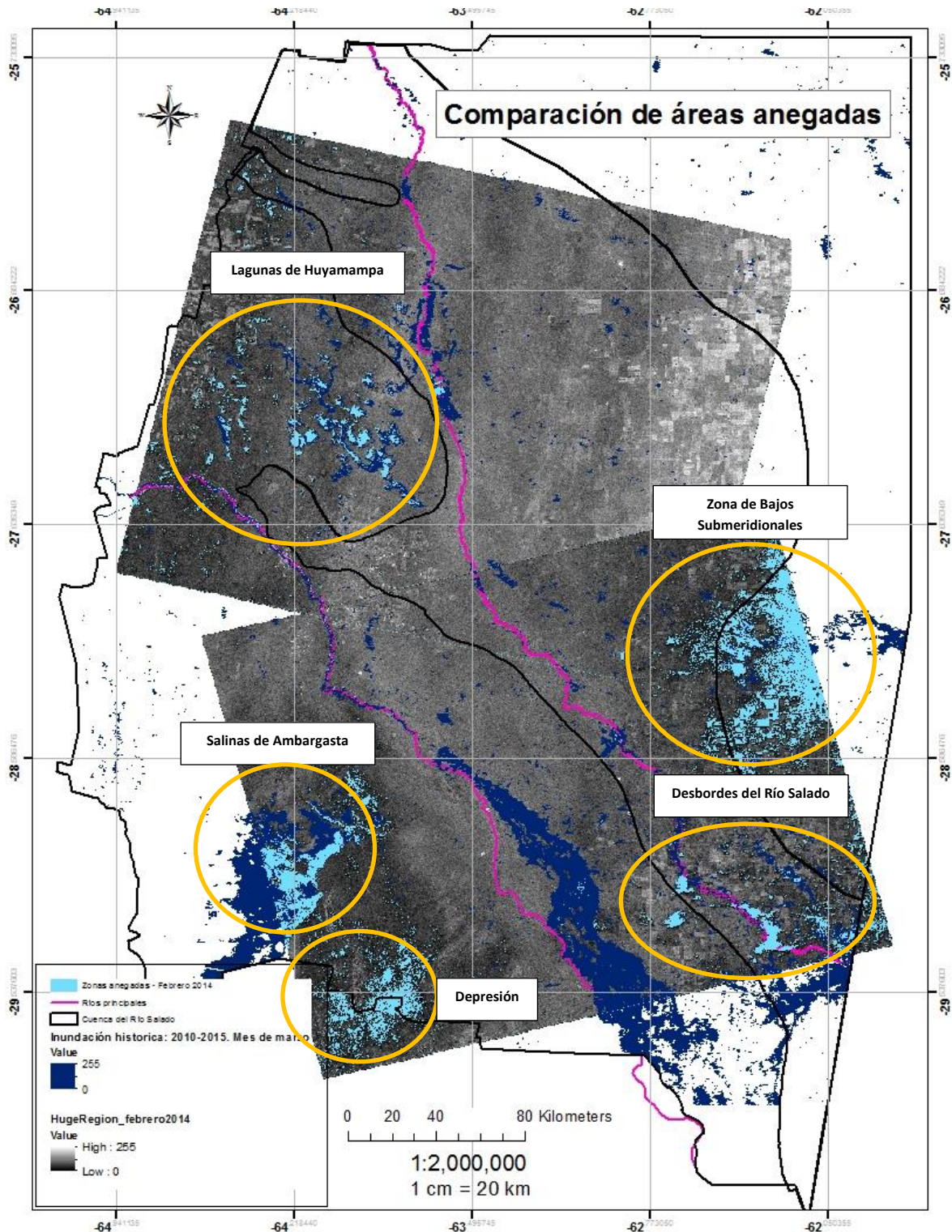


Figura 4.23. Interpretación y comparación de las áreas anegadas en las imágenes SAR del mes de febrero y las inundaciones históricas de la plataforma SUMA.

## 4.6. DISCUSIONES

Tanto las imágenes radar como las ópticas ofrecen distintas perspectivas de información respecto a la superficie terrestre. Cuando se desea monitorear eventos tales como las inundaciones, que generalmente coinciden con las épocas donde se producen las mayores precipitaciones, uno de los inconvenientes de trabajar con datos ópticos, es la dificultad en la obtención de imágenes desprovistas de coberturas nubosas. En el caso de los datos SAR, las ventajas más significativas es que la señal de las microondas atraviesan nubes y lluvia con un muy bajo o nulo deterioro de la señal (Panozzo, 2012).

Para requerimientos de estudios de grandes extensiones, los sensores satelitales resultan ser herramienta de gran utilidad, incluso con compleja variabilidad estacional, reduciendo el costo y el tiempo (Lanfri, 2011). En este sentido, las imágenes Hige Region utilizadas en el presente capítulo, tienen un cubrimiento regional, abarcando gran parte de la cuenca. Los resultados monitoreados entre los meses de febrero, marzo, abril y mayo no mostraron grandes variaciones en relación a la identificación de los cuerpos de agua.

Básicamente, la necesidad de trabajar con datos Hige Region se vio reflejada al tratarse de un cubrimiento regional que abarcase la cuenca en estudio. La clasificación automática no permitió diferenciar zonas de inundación. Es posible que las zonas inundadas o la dinámica del flujo de los humedales no hayan sido eficazmente perceptibles por el sensor utilizado, cuyo tamaño de píxel pudieron haber excedido la percepción de los cuerpos de agua, por lo que se recomienda focalizar la investigación en aquellas áreas más propensas a los fenómenos de inundaciones con imágenes de mayor resolución espacial como por ejemplo el modo PingPong de COSMO-SkyMed.

En general, los eventos de inundaciones en áreas planas son producidos por la acumulación de precipitaciones, y su evolución es relativamente lenta (Belmonte & Camaño, 2009). La cartografía de las zonas con peligro de inundaciones, es una tarea de suma importancia para preservar la vida y las propiedades en muchas partes del planeta, debido a que este tipo de peligro natural afecta a regiones muy diferentes en casi todo el mundo, y por lo general sus causas están asociadas a modificaciones del terreno producidas por prácticas agrícolas inadecuadas (Montecelos Zamora, *et al.*, 2011).

En la cuenca del río Salado son frecuentes los problemas relacionados a las inundaciones fluviales afectadas generalmente a eventos meteorológicos con altos cúmulos de lluvias, así como por las características morfológicas que posee, fomentadas por la intensidad del uso del suelo, provocando proceso de deforestación de las márgenes de los ríos y de la cuenca en general para incrementar las áreas de cultivos.

En el presente trabajo, se ha estudiado la aplicabilidad de la teledetección radar como herramienta para detectar cuerpos de agua. En los últimos años se han incrementado los trabajos sobre el uso de datos radar, como una alternativa importante en la aplicabilidad a eventos de inundaciones. A fin de encontrar mejorar la aplicabilidad de los sistemas radar en la cuenca del río Salado, se propone ampliar la escala temporal de análisis y combinar diferentes escalas.

## **CAPITULO 5**

### **CONSIDERACIONES FINALES**

En general, la metodología empleada resultó adecuada en lo que refiere a la obtención de información sinóptica a gran escala. La generación de datos de percepción remota se ha convertido en una herramienta útil para aplicaciones y seguimientos de fenómenos ambientales, dinámicos y complejos. Estas características sumadas a la posibilidad de reflejar los cambios en una base de datos con reducción en tiempo y costo, reflejan la potencia que poseen en la toma de decisiones y en la formulación de políticas de conservación en los ámbitos públicos y privados. Las técnicas utilizadas para la obtención de los datos originales y la delineación de los productos obtenidos fueron apropiadas, sencillas y de rápida implementación.

La cuenca del río Salado, se caracteriza no solamente por su amplia extensión, sino también por la gran diversidad de ambientes que la caracterizan. Representa una importante región forestal del Chaco Seco, de relictos de bosques con características únicas que aún se conservan. Sin embargo, sus condiciones de uso carecen de una planificación territorial adecuada. Abordar los estudios ambientales desde el punto de vista de cuencas hidrográficas como unidad territorial, permite una visión holística y funcional entre todos los componentes que la integran, incluyendo la componente antrópica.

Las cuencas son configuradas y modificadas continuamente de acuerdo a la región donde se encuentren, y de acuerdo a las políticas económicas que regulan, para lo cual, en la región de estudio se ha visto impulsada y reflejada teniendo en cuenta el modelo funcional y económicamente viable de la región pampeana, con el reemplazo de las cubiertas boscosas de alta diversidad por una agricultura extensiva y de alto impacto.

Los resultados del presente trabajo evidencian la importante ocupación del suelo en la extensa región que comprende la cuenca del río Salado. Una agricultura de rápida expansión y de fuerte impacto durante el período analizado. Como consecuencia, las coberturas boscosas disminuyeron de un 70 % a un 43% durante los 30 años de análisis, por lo que se puede pensar como un ambiente en vías de transición hacia una transformación en la configuración de sus ecosistemas, en lo que respecta de una predominancia boscosa hacia una predominancia agrícola al final del periodo analizado.

El manejo de una cuenca a menudo necesita de la identificación puntual de prioridades de conservación, en este sentido abordar la calidad ambiental mediante el desarrollo de indicadores como instancia preliminar podría considerarse una alternativa eficaz. En este sentido, las unidades territoriales de grandes dimensiones que constituyen una unidad funcional como en el caso de las cuencas hidrográficas, necesitan ser analizadas como un todo, determinando sus urgencias ambientales, para luego volcar estudios más concretos y locales bajo un fundamento general hacia donde focalizar esfuerzos de conservación o restauración.

La degradación ambiental, tiende a ser relevante en condiciones de semiaridéz, en tal caso, implementar una metodología con carácter holístico abordada en términos de calidad ambiental constituye una alternativa eficaz. En términos generales en cuanto a la influencia que presentan los indicadores, se puede pensar que el uso del suelo no sólo genera una marcada influencia, sino también que interviene en el peso de los demás indicadores tales como las frecuencias en las inundaciones, la continuidad y la vigorosidad de la vegetación leñosa.

Es necesario proponer medidas urgentes tanto mitigatorias y restrictivas en las zonas definidas en las áreas más sensibles a la degradación de la cuenca. En primer lugar, es imperativo regular el uso de la tierra. Además, una rápida implementación de medidas preventivas, es crítica en aquellas áreas que todavía no han sido afectadas con severidad.

La búsqueda de estrategias implica la búsqueda de un instrumento legal que declare la cuenca en procesos de ordenamiento, determinación de zonas críticas y estableciendo zonas de protección estrictas. En base a los instrumentos legales vigentes se encuentra la Ley 26.331, la cual se sancionó en el año 2007, denominada “Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos”. Esta ley establece “los presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, conservación, aprovechamiento y manejo sostenible de los bosques nativos y de los servicios ambientales que éstos brindan a la sociedad”. Entre los objetivos más propicios de analizar en este contexto se mencionan: “Promover la conservación mediante el Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN) y la regulación de la expansión de la frontera agropecuaria y de cualquier otro cambio de uso del suelo; implementar las medidas necesarias para regular y

controlar la disminución de la superficie de bosques nativos existentes, tendiendo a lograr una superficie perdurable en el tiempo.

Este trabajo constituye una primera aproximación al estudio sistémico de la cuenca, de carácter regional y general. A partir de esta integración sería de suma importancia dar continuidad a la investigación más detallada en escalas ecológicas menores.

En relación a los resultados obtenidos de los cuerpos de agua con los datos Radar, parte de los objetivos consistían en realizar una exploración de los productos que brindaba la ASI (Agencia Espacial Italiana). Para los objetivos propuestos, las imágenes escogidas en esta ocasión necesitaban un carácter de amplio barrido para abarcar el área de estudio, por ello se procedió a utilizar las imágenes Huge Region. Sin embargo, la identificación de los cuerpos de agua en la cuenca no tuvo un resultado óptimo, ya que se considera que debido a la naturaleza de las imágenes con un tamaño de pixel de 100x100 metros, muchos cuerpos de agua no fueron identificados por el sensor. Por lo que se recomienda continuar la investigación con imágenes con mayor resolución.



## BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, R; Salmerón, O. (2000). Detección de cambio de uso del suelo y vegetación. Atlas Regional. Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Andreo, V. (2015). Producto de áreas anegadas basado en índices de agua y vegetación obtenidos a partir de reflectancia. Datos MODIS. Productos MOD09A1 y MOD44W. MAGyP-INTA-CONAE. Plataforma SUMA.

Ariza, A. 2013. Productos LDCM - Landsat 8. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Versión 1.0. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.

Atlas de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina – Versión 2010. (2011). Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación- Instituto Nacional del Agua. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1797-05-9.

Azcuy Ameghino, E. (2008). Trincheras en la historia. Historiografía, marxismo y debates. Buenos Aires, Imago Mundi.

Bacchiega J. D.; Bertoni J. C.; Maza J. A. (2003). Anexo V: Dinámica Hídrica de la Cuenca del Río Salado. Pericia Hidráulica correspondiente al Expediente N° 1341/2003 Poder Judicial de la Provincia de Santa Fe.

Basán Nickisch, M. (2005). Propuestas técnicas y organizativas para lograr una adecuada planificación del uso del Río Salado en Santiago del Estero. GTRecursos Naturales, INTA Estación Experimental Santiago del Estero. [[www.produccion-animal.com.ar](http://www.produccion-animal.com.ar)].

Belmonte, I.; Camaño, S. (2009). Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina. Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Berlanga-Robles, C.; Ruiz-Luna, A.; Covarrubias-Legaspi, O; Hernández- Guzmán, R. (2011). Patrones de escurrimiento en la Cuenca Lechuguilla-Ohuira- Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: Una aproximación con el modelo del número de curva. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 63, n° 1. 39-52 p.

Bianchi, A. R.; Cravero S. A. (2010). Atlas climático de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Laboratorio de Teledetección de la EEA Salta. Estación Experimental Agropecuaria Salta.

Bisang, R.; Gutman, G. (2003). Un equilibrio peligroso. Nuevas dinámicas en la producción agropecuaria. En: Encrucijadas, UBA, Buenos Aires, 8-19.

Blum, W.H. (1998). Basic concepts: degradation, resilience and rehabilitation. In: Lal R, Blum WH, Valentine C, Stewart BA (eds.), *Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press, Boca Ratón, pp. 1-16.

Boletta, P.E.; A.C. Ravelo; A. M. Planchuelo; M. Grilli. (2006). Assessing deforestation in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management* 228, 108e114.

Bolleta, P. (2001). Utilización de información agrometeorológica y satelital para la evaluación de la desertificación en el Chaco Seco - Departamento de Moreno, Santiago del Estero. Tesis de maestría en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Bruno, J. (2000). Manejo de Cuencas Hidrográficas, Análisis Conceptual. Magister Scientiae en Manejo de Cuencas Hidrográficas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

Bran, D.E; Gaitán, J.J; Wilson, M. G. (2017). Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. 1a ed. Entre Ríos: Ediciones INTA. Libro digital, PDF. Pp. 15-17.

Burkart, R; Bárbaro, N; Sánchez, R; Gómez, D. (1999). Ecorregiones de la Argentina. Componente Política Ambiental. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Programa Institucional Ambiental (PRODIA) y Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires. Argentina.

Bustos, Oscar. (2009). Introducción a los procesos markovianos en el análisis y procesamiento de imágenes. CIEM - FaMAF - Universidad Nacional de Córdoba.

Bustos, Oscar H., Frery, Alejandro C., Lamfri, Mario A., Scavuzzo, Carlos M. (2004). Técnicas estadísticas en Teledetección Espacial. FaMAF - Universidad Nacional de Córdoba.

Cabido, M., & Zak, M. (2010). Deforestación, agricultura y biodiversidad. HOY – La Universidad Digital, 22 de junio de 2010.

Cabrera. A. L. (1976). Regiones Fitogeográficas Argentinas. En: *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Tomo II, Fascículo 1. Ed. Acme SACI. Buenos Aires, Argentina.

Campbell, J.B. (1996). *Introduction to Remote Sensing*, 2nd edition. Guilford Press, New York, USA.

Cantú, P.; Becke, A; Bedano, J.; y Schiavo H. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36 km 601. Córdoba.

Cantú, P.; Becke, A; Bedano, J.; y Schiavo H. (2001). Indicadores e Índices de degradación de suelos en la región central templada húmeda a subhúmeda de la República Argentina. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. CD. Trabajo VII-15, 4 pp.

Cantú, P.; Becke, A; Bedano, J.; Musso T.; Schiavo H. (2002). Evaluación de la calidad ambiental y calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD. 6 pp.

Carr, D.L.; Murtinho F.; Pan W.; Barbieri A.; Bilsborrow R. E.; Suchindran C.; Whitmore T. M. (2008). Un análisis multinivel de población y deforestación en el Parque Nacional Sierra de Lacandón. Petén, Guatemala. Doc. Anál. Geogr. 52, 2008. 49-67.

Chen, Z. P, Deng, P., Chong, J. S. (2002). Application of textural features to change detection in SAR image. Remote Sensing Technology and Application, 17(3), pp.162-166.

Cosmo-SkyMed SAR Products Handbook. (2009). COSMO-SkyMed Mission. Italian Space Agency.

Chuvienco, E. (2010). Teledetección ambiental, la observación desde el espacio. Nueva edición actualizada. Editorial Ariel. ISBN 978-84-344-3498-1. España.

Chuvienco, E. (2002). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Ed Ariel. Barcelona.

Cruzate, G., Gomez, L., Pizarro, M.J., Mercuri, P., Banchemo, S. (2007). Suelos de la República Argentina. SAGyP - INTA - Proyecto PNUD ARG/85/019. Actualizada en 2007 por: Angueira, G.; Prieto, D.; Lopez, J.; Ibarraza, G. (Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero SIGSE 2.0 INTA Centro Regional Tucumán – Santiago del Estero – EEA Santiago del Estero, Publicación en CD).

Da Silva, C. (2012). Geoprocessamento com utilização do satélite landsat 5 TM para estudo de caso do município de Betim. MundoGEO.

Doran, J. W; Zeiss M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. Appl. Soil Ecol. 15: 3-11.

Dos Santos, J. R. 1994. Técnicas de percepción remota espacial para el monitoreo de la deforestación de la Amazonia Brasileira. Second Euro-Latin American Space Days, Proceedings of the conference held 9-13 May, 1994 in Buenos Aires, Argentina. Edited by Norman Longdon. ESA SP-363. European Space Agency, 1994., p.103

Dunne T., y Leopold, L. (1978). Water in environmental planning. Freeman 86. San Francisco, USA. 819 pp.

Food and Agriculture Organization. (2012). El estado de los bosques del mundo. Principales Resultados. ISBN 978-5-307292-7. Roma.

Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA). (2016). Publicado por Servicio de Prensa y Divulgación Científica y Tecnológica: [<http://sobrelatierra.agro.uba.ar/santiago-del-estero-lidera-el-ranking-mundial-de-desmontes/>]

Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA) y Fundación para el Desarrollo en Justicia y Paz (FUNDAPAZ). (2007). Zonificación de los Bajos Submeridionales del Norte

Santafesino. Una Herramienta para la Planificación del Desarrollo Productivo y la Conservación de la Biodiversidad del Humedal. Buenos Aires. Vida Silvestre Argentina.

Forman, R.T.T, & Collinge, S.K. (1997). Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning. *Landscape and Urban Planning*. 37. [1]. 129-135.

Gallopin, G. (1997). Indicators and their use :information for decision making. Part 1 Introduction. In: B Moldan & S Billharz (eds.). *Sustainability indicators*. Wiley, Chichester-New York.

García León, J.; García Martín, A.; Torres Picazo, M. 2013. gvSIG: guía para el aprendizaje autónomo. Universidad Politécnica de Cartagena. ISBN: 978-84-616-4200-7. Cartagena, Colombia.

Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I.; Rodríguez Vagaría, A. y S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 pp.

Geist, H. J.; Lambin E. F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*. Vol. 52 No. 2. Pp. 143-150.

Grings, F.M.; Ferrazzoli, P.; Jacobo-Berlles, J.C.; Karszenbaum, H.; Tiffenberg, J.; Pratolongo, P.; Kandus, P. (2006). Monitoring flood condition in marshes using EM models and Envisat ASAR observations. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol.44, no.4, pp. 936-942.

Guichón M. L.; Angelini M. E.; Benítez A.; Serafini M. C. y Cassini M. H. (1999). Caracterización ambiental de la cuenca del río Luján (Argentina) aplicando dos metodologías de procesamiento de información satelitaria. GEMA, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján.

Hueck, K. (1978). *Los bosques de Sudamérica*. GTZ, Eschborn. López.

IAFE - Instituto de Astronomía y Física del Espacio. (2013). *Teledetección en microondas: fundamentos físicos y extracción de información*. (Clase 1.1): Principios básicos de Teledetección de Radar, características de los sistemas actuales. Universidad de Buenos Aires

INTA-PRORENOA. (2015). *Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de sensores remotos*. Campañas agrícolas consultadas: 2000/2001 a 2014/2015. Laboratorio de teledetección y sistemas de información geográfica proyecto relevamiento de cultivos del NOA - PRO.RE.NOA. INTA EEA SALTA. Disponible en: [\[http://www.inta.gov.ar/prorenea/info/monitoreo.htm\]](http://www.inta.gov.ar/prorenea/info/monitoreo.htm)

Kosmas, C.; Ferrara, A.; Briasouli, H.; Imeson, A. (1999). Methodology for mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification. In: *The Medalus project*:

Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. European Union 18882, ISBN 92-828-6349-2, pp. 31-47.

Lavado Contador, J.; Schnabel, S.; Gómez Gutiérrez, A. y Pulido Fernández M. (2010). Sensibilidad ambiental a la degradación en Extremadura (España). En: Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N.º 53 - 2010, págs. 147-164.

Lanfri, S. (2011). Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Linsley, R.; Kohler, M. y J. Paulhus. (1993). Hidrología para ingenieros. Segunda edición. Editorial McGraw-Hill. 386 pp.

López Cadenas del Llano, F. (1998). Restauración hidrológica forestal y control de la erosión. Ingeniería Ambiental. Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España. 945 pp.

Matteucci, S.; Colma, A. (1997). Agricultura sostenible y Ecosistemas Áridos y Semiaridos de Venezuela. *Interciencia*, 22(3), 123-130.

Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (1993). *Wetlands*. New York. Van Nostrand Reinhold. 722p.

Montenegro, C.; Gasparri, I.; Manghi, E.; Strada, M.; Bono, J y Parmuchi, G. (2015). Informe Sobre Deforestación en Argentina. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Dirección de Bosques, Ministerio de Salud y Ambiente.

Montecelos Zamora, Y.; Sánchez, D. B. Puebla, A. R.: Suarez, N.; Cruz Y. B. (2011). Diseño metodológico para la elaboración de mapas de peligrosidad por inundaciones. Aplicación a la cuenca del Río Cauto. Sector Provincia Granma, Cuba. Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Programa de Estudios Geográficos (PROEG). Universidad Nacional de Luján, Argentina.

Morello, J., & Adamoli, J. (1968). Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Primera parte: Objetivos y Metodología. Serie Fitogeográfica N° 10., 125. Buenos Aires: INTA.

Morello, J; Matteucci, S.; Rodriguez A. (2012). Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. 1ª ed. Buenos Aires. ISBN 978-987-1922-00-0.

Moschione, F. (2007). Bañados de Figueroa. En Di Giacomo, A. S., M. V. De Francesco y E. G. Coconier (editores). (2007). Áreas importantes para la conservación de las aves en Argentina. Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: 450-451.

Temas de Naturaleza y Conservación 5. CD-ROM. Edición Revisada y Corregida. Aves Argentinas/Asociación Ornitológica del Plata, Buenos Aires.

Moscuzza, C; Pérez Carrera, A; Garaicoechea, J; Fernández Cirelli A. (2003). El agua en Iberoamérica; Aspectos de la problemática de las tierras secas. Edit. Alicia Fernández Cirelli y Elena Abraham. Publ. por CYTED XVII. 35-53. Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Fac. de Cs. Veterinarias, Univ. de Buenos Aires.

Olaya, V. (2011). Sistemas de Información Geográfica. Versión 1.0. Disponible en [[http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro\\_SIG](http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG)].

Pannozzo, M. (2012). SAR Image quality Assesment. Seminar final report. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Universidad Nacional de Córdoba.

Paruelo J.M; Guerschman J.P y Verón S.R. (2005). Cambios en el patrón espacial de uso de la tierra en Argentina. Ciencia Hoy 15: 14-23.

Pérez Cabello, F; De La Riva Fernández, J. (1998). El empleo de las imágenes Landsat TM para la detección y cartografía de las áreas incendiadas en el Prepirineo Occidental Oscense. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio Universidad de Zaragoza. Pp. 131-145

Pérez, M.E; y García, P. (2006). Aplicaciones de la teledetección en hidrología. Observatorio Medioambiental, 9, pp. 171-186.

Preda, G. (2010). La Expansión del capital agrario en el proceso de transformación territorial. El caso del Departamento de Río Seco en la provincia de Córdoba. Argentina, Memorias ALASRU 2010. Porto de Galhinas.

Puyravaud J., (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. Forest Ecology and Management 177:593-596.

Ramankutty, N.; Evan A. T.; Monfreda C.; and Foley J. A. (2008). Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year year 2000. Global Biogeochem. Cycles, 22, GB1003, doi: 10.1029/2007GB002952.

Rebolledo, R. (2009). Modelo de sensibilidad ambiental basado en la valoración de relaciones espaciales. En: Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-26 de septiembre de 2009. Pp. 229-232.

Reboratti, C. (2011). Impactos de la expansión agropecuaria sobre la sociedad y el ambiente. En REBORATTI, C. (coord.) Agricultura, sociedad y ambiente. Miradas y conflictos, Maestría en Estudios Sociales Agrarios, FLACSO.

Reboratti, C. (2007). El espacio rural en América Latina: procesos, actores, territorios, en FERNANDEZ CASO, M. V. y GUREVICH, R. (coord.) Geografía. Nuevos temas, nuevas preguntas. Un temario para su enseñanza. Buenos Aires, Editorial Biblos.

Red Agroforestal Chaco Argentina (REDAF). (1999). Estudio Integral de la Región Chaqueña. SAyDs. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas. BIRF N° 4085 – AR.

Roughgarden, J., Running, S. W.; Matson, P. A. (1991). What does remote sensing do for ecology?. Ecology. 72: 1918-1922.

Sacristan, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. Universidad Complutense de Madrid c/ Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid (España). Revista AquaTIC, n° 24, pp. 13-41. ISSN 1578-4541. [<http://www.revistaaquatic.com/aquatic/art.asp?t=p&c=196>]

Salizzi, E. (2013). Reestructuración productiva y nueva agricultura: la expansión de la frontera agraria y sus efectos ambientales. X Jornadas de Sociología. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Salvia, M. (2010). Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del macrosistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Sandía Randón, L; y Vásquez, A. (2009). Sensibilidad Ambiental y Sistemas de Información Geográfica. Centro Interamericano de Desarrollo e investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida, Venezuela.

Santana, L. M. & Salas, J. (2007). Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat. GeoFocus (Artículos), n° 7, p. 281-313, ISSN: 1578-5157.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Proyecto Manejo Sustentable de los Recursos Naturales (SAyDS). 2009. Prácticas forestales en los bosques nativos de la República Argentina Ecorregión Forestal Parque Chaqueño. BIRF 7520-AR – PNUD 08/008. Componente Bosques Nativos y su Biodiversidad.

Serra, P.; Pons, X. y Sauri, D. (2003). Post-classification detection with data from different sensors: some accuracy considerations. International Journal of Remote Sensing, 24 (16), pp. 3311-3340.

Sierra, E.; Hurtado, R.; Spescha, I. (1994). Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la región pampeana. Revista de la Facultad de Agronomía. 14 (2): 139-144. Universidad de Buenos Aires. Sarandón

Sombroekand, W., Scene, E.H. (1993): Land degradation in arid, semi-arid and dry sub-humid areas: rainfed and irrigated lands, rangelands and woodlands. FAO presentation at INCD, Nairobi.

Swedish Space Corporation (SSC), (1999). Methods for change detection. Disponible en Internet: [<http://www.ssc.se/rst/rss/project/change.html>]

Steven, D. & Toner, M.M. (2004). Vegetation of upper coastal plain depression wetlands: environmental templates and wetland dynamics within a landscape framework. *Wetlands*, 24, pp. 23–42.

Torrella, S. A.; Adámoli J. (2005). Situación Ambiental de la Ecorregión del Chaco Seco. Laboratorio de Ecología Regional de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN), Universidad de Buenos Aires (UBA). Buenos Aires.

Torres, R.; P. Michelutti. (2007). Reserva de Uso Múltiple Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita. En Di Giacomo, A. S., M. V. De Francesco y E. G. Coconier (editores). Áreas importantes para la conservación de las aves en Argentina. Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: 134-137. Temas de Naturaleza y Conservación 5. CD-ROM. Edición Revisada y Corregida. Aves Argentinas/Asociación Ornitológica del Plata, Buenos Aires.

Turner, M. G.; Gardner; R. H., O'Neill. (2001). *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer-Verlag New York, Inc.

Trisorio-Liuzzi, G; y Hamdy, A. (2002). Desertification: Causes and strategies to compete. *Options Méditerranéennes, Serie A n° 50*.

Umsef - Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. (2015). Monitoreo de la Superficie de Bosque Nativo de Argentina – Período 2013-2015. Dirección de Bosques Nación. SAyDS. Jefatura de Gabinete de Ministerios. Presidencia de la Nación. Argentina

Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF). (2005). Primer Inventario de Bosques Nativos: Informe Región Parque Chaqueño. Dirección de Bosques Nación. SAyDS. Jefatura de Gabinete de Ministerios. Presidencia de la Nación. Argentina.

Vila Subirós J., Linde V. D., Pascual L. A., Palom R. A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (Landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. Universitat de Girona. Unitat de Geografia i Institut de Medi Ambient. Plaça Ferrater Mora, 1. 17071. Girona.

Volante J.N., Paoli H.P. y Bianchi A.R. (2005). Monitoreo de Cultivos Extensivos del Noroeste Argentino a Partir de Sensores Remotos. Campaña Agrícola 2004/05. Cultivos de Verano. Lab. Teledetección y SIG Recursos Naturales. INTA EEA Salta. En: [<http://www.inta.gov.ar/region/noa/prorenea/>]. 27 pp.



Zerda, R. (2009). Estrategia metodológica de teledetección para el monitoreo de la deforestación en el Chaco argentino. En: Conferencia presentada en el Workshop “Percepción Remota como Herramienta de Estudios de Cambios en Recursos Forestales”, XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Natal-RN, Brasil. 25-30.04.

Zerda, H. R.; Moreira, M. L. (2006). Monitorización Satelital del Patrón Espacial del Uso de la Tierra en el N.E de la Provincia de Santiago del Estero. Revista de la SeCyT. UCSE. Nº 9, agosto de 2.006, 75-84.

### **PAGINAS CONSULTADAS**

The United States Geological Survey [<https://earthexplorer.usgs.gov/>]

Instituto Geográfico Nacional (IGN) [<http://www.ign.gob.ar/sig>]

Ministerio del Agua y Medio Ambiente – Santiago del Estero  
[<http://www.sde.gob.ar:84/secAgua/sda.html>]

Sitios AICA's (Programa de las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves)  
[<http://avesargentinas.com.ar.elsever.com/AICAS/home.html>]

Atlas de Suelo de la Rep. Argentina (INTA, 1990). Actualizada por (Angueira et al., 2007).  
[ <http://www.geointa.inta.gob.ar/category/suelos/>]

Atlas de Suelos de la República Argentina - GeoINTA [<http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/> ]

## ANEXOS

### ANEXO Nº 1. HUMEDALES: SITIOS AICA'S

AICA's (Programa de las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves). Constituye una iniciativa de carácter global de *Bird Life International* para la identificación, documentación y conservación de una red de sitios críticos para las aves del mundo, cuyo objetivo es contribuir a la conservación de sitios de importancia. En la Argentina, un total de 273 AICAs han sido identificadas. Se basan en la determinación de poblaciones de aves globalmente amenazadas (especies de la "lista roja"), especies de distribución restringida (endémicas de las "Áreas de Endemismo de Aves" – EBAs), especies confinadas a biomas sudamericanos y especies congregatorias.

En la Argentina:

- un 99% de las AICAs son importantes para especies globalmente amenazadas,
- un 70% para endémicas de EBAs,
- un 81% para características de biomas;
- y un 18% para aves congregatorias.

En el siguiente portal, se especifican los listados de especies presentes en los tres sitios AICA's ubicados en la provincia de Santiago del Estero:

[\[http://avesargentinas.com.ar.elsever.com/AICAS/home.html\]](http://avesargentinas.com.ar.elsever.com/AICAS/home.html),

### ANEXO Nº 2.

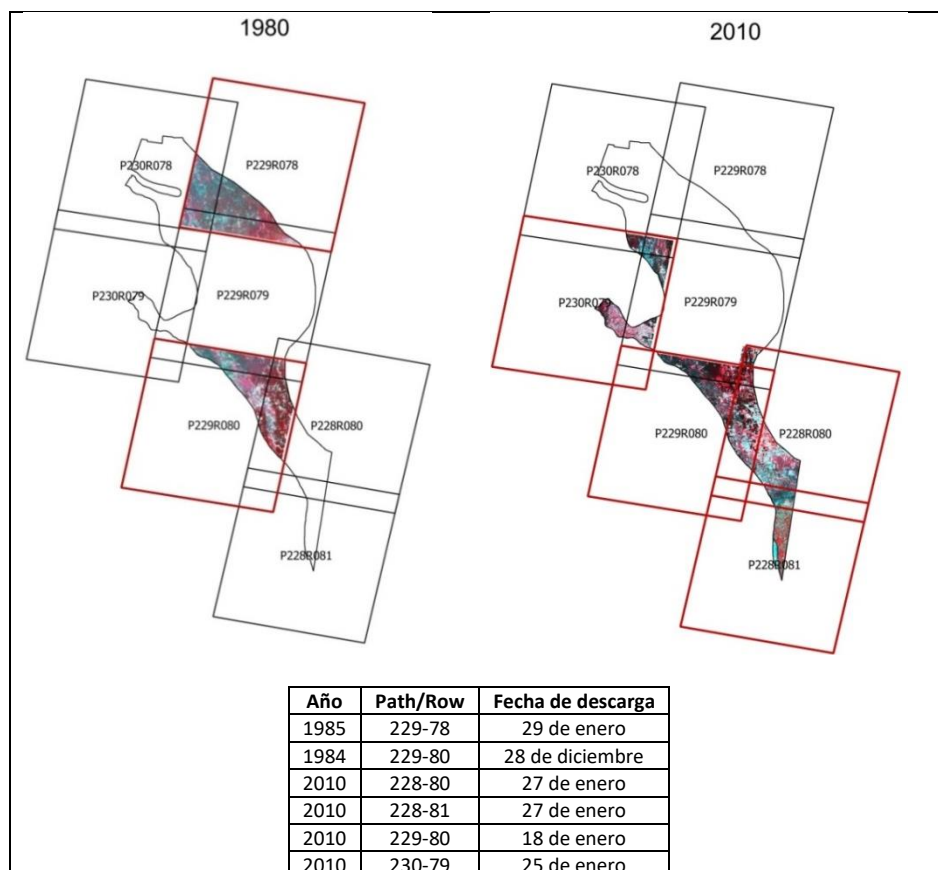
#### a) IMÁGENES LANDSAT DE LOS SENSORES TM Y OLI

Década	Path/Row	Fecha de captura	Sensor y satélite	SCENE_CENTER_TIME
1980	228-80	04/05/1987	TM - LANDSAT_5	13:25:05.1420060Z
1980	228-81	01/05/1986	TM - LANDSAT_5	13:27:00.5740190Z
1980	229-78	29/01/1985	TM - LANDSAT_5	13:37:21.4700440Z
1980	229-79	31/08/1987	TM - LANDSAT_5	13:33:50.5510380Z
1980	229-80	28/12/1984	TM - LANDSAT_5	13:37:58.2560750Z
1980	230-78	30/09/1984	TM - LANDSAT_5	13:43:15.1780310Z
1980	230-79	30/09/1984	TM - LANDSAT_5	13:43:39.0090060Z
1990	228-80	31/07/1990	TM - LANDSAT_5	13:21:35.9690630Z
1990	228-81	16/08/1990	TM - LANDSAT_5	13:21:56.1330880Z
1990	229-78	22/07/1990	TM - LANDSAT_5	13:27:01.3220690Z
1990	229-79	22/07/1990	TM - LANDSAT_5	13:27:25.1900630Z
1990	229-80	24/09/1990	TM - LANDSAT_5	13:27:30.6460500Z
1990	230-78	29/07/1990	TM - LANDSAT_5	13:33:11.1850380Z
1990	230-79	27/06/1990	TM - LANDSAT_5	13:33:41.7530750Z
2000	228-80	28/09/2000	TM - LANDSAT_5	13:39:59.2100560Z
2000	228-81	27/08/2000	TM - LANDSAT_5	13:39:50.4360630Z
2000	229-78	03/09/2000	TM - LANDSAT_5	13:45:00.9220250Z
2000	229-79	03/09/2000	TM - LANDSAT_5	13:45:24.7650130Z

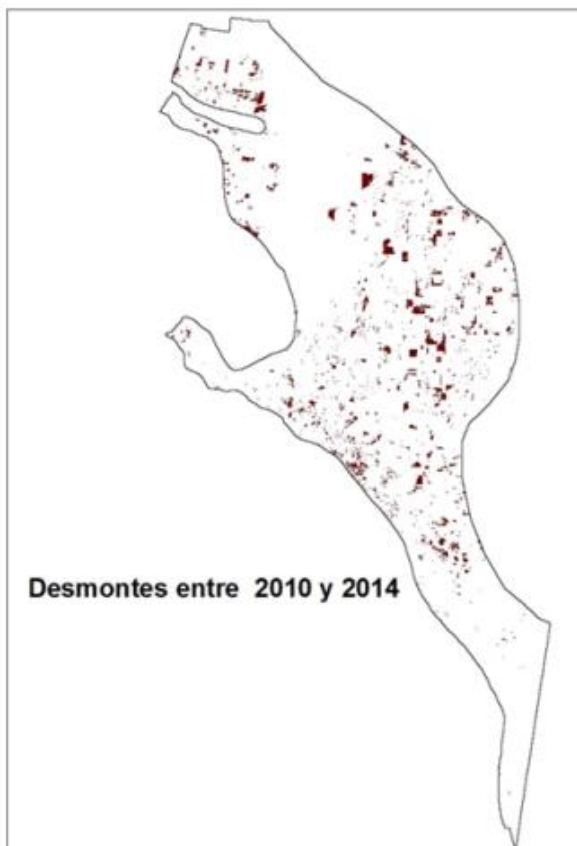
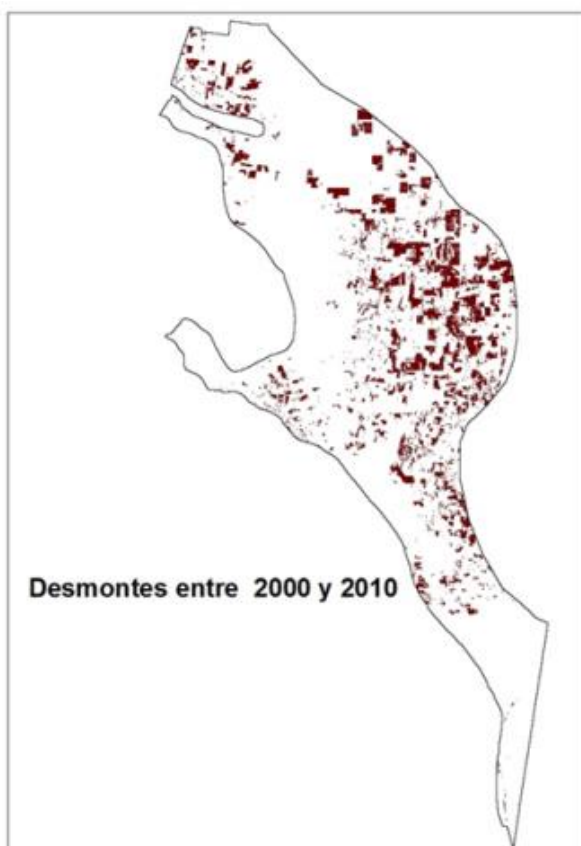
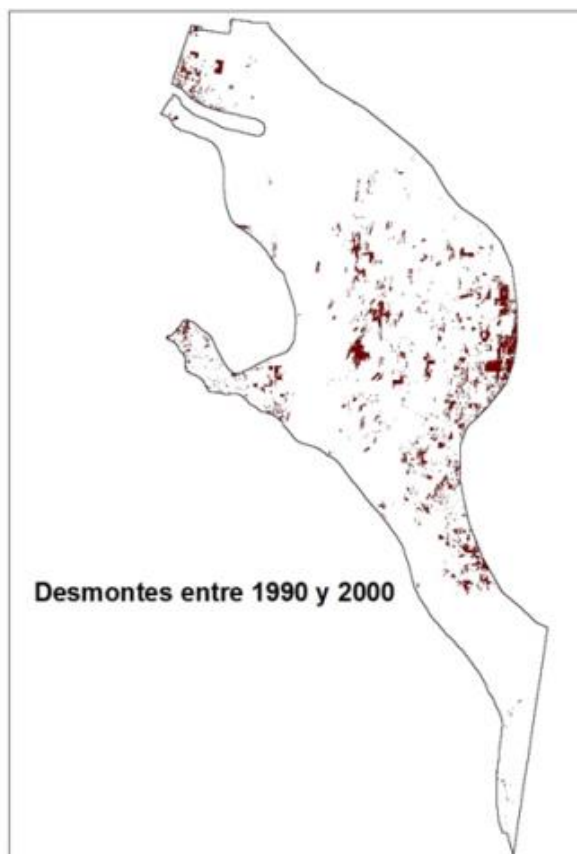
<b>2000</b>	229-80	03/09/2000	TM - LANDSAT_5	13:45:48.6080060Z
<b>2000</b>	230-78	26/09/2000	TM - LANDSAT_5	13:51:30.4230190Z
<b>2000</b>	230-79	24/07/2000	TM - LANDSAT_5	13:50:38.2350500Z
<b>2010</b>	228-80	27/01/2010	TM - LANDSAT_5	13:52:25.1640310Z
<b>2010</b>	228-81	27/01/2010	TM - LANDSAT_5	13:52:48.9940690Z
<b>2010</b>	229-78	13/07/2010	TM - LANDSAT_5	13:57:28.9750810Z
<b>2010</b>	229-79	15/09/2010	TM - LANDSAT_5	13:57:33.0060750Z
<b>2010</b>	229-80	18/01/2010	TM - LANDSAT_5	13:58:33.7560380Z
<b>2010</b>	230-78	20/07/2010	TM - LANDSAT_5	14:03:37.7710690Z
<b>2010</b>	230-79	25/01/2010	TM - LANDSAT_5	14:04:22.4180060Z
<b>2014</b>	228-080	18/08/2014	OLI - LANDSAT_8	14:01:38.9985542Z
<b>2014</b>	228-081	18/08/2014	OLI - LANDSAT_8	14:02:02.9411398Z
<b>2014</b>	229-78	24/07/2014	OLI - LANDSAT_8	14:06:50.1013955Z
<b>2014</b>	229-79	25/08/2014	OLI - LANDSAT_8	14:07:26.1985001Z
<b>2014</b>	229-80	25/08/2014	OLI - LANDSAT_8	14:07:50.1508206Z
<b>2014</b>	230-78	16/08/2014	OLI - LANDSAT_8	14:13:12.4234921Z
<b>2014</b>	230-79	16/08/2014	OLI - LANDSAT_8	14:13:36.3697931Z

### b) PATH/ROW DE IMÁGENES LANDSAT - ESTACIÓN HÚMEDA

El siguiente gráfico muestra los path/row (en recuadro rojo), correspondientes a las décadas de 1980 y 2010, cuyas fechas de descarga pertenecen a la estación húmeda, correspondiente al sensor TM:

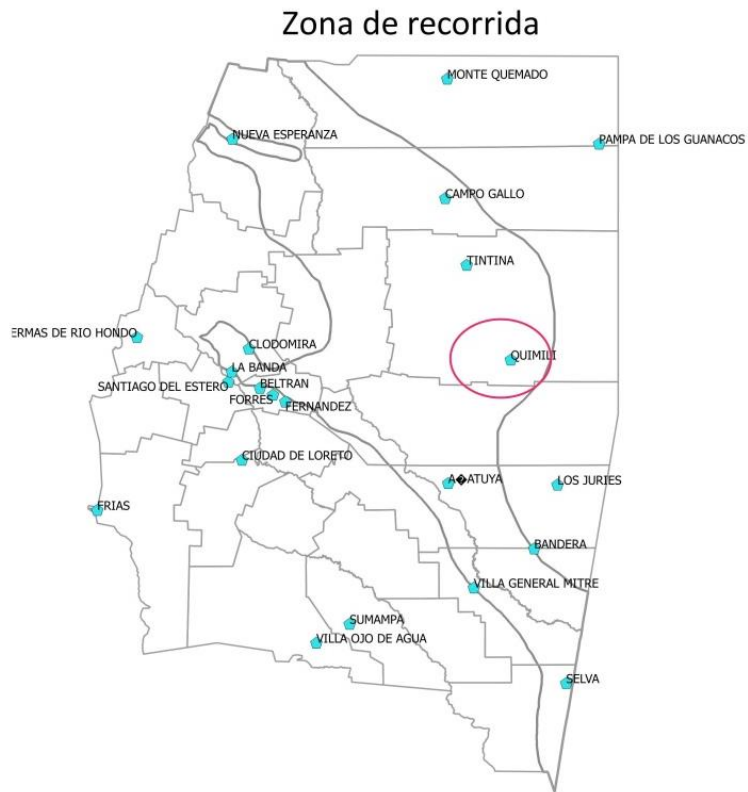


**c) CAMBIO DE USO DEL SUELO POR PERÍODO.**



#### d) IMÁGENES FOTOGRÁFICAS TOMADAS EN ESTE DE LA CUENCA DEL RÍO SALADO

Se realizó el recorrido junto a la comisión del INTA E.E.A. Quimilí – Santiago del Estero, quienes brindaron los medios y el apoyo necesario en cuanto a la provisión y recolección de información para llevar a cabo las validaciones del uso del suelo.



Campos de soja



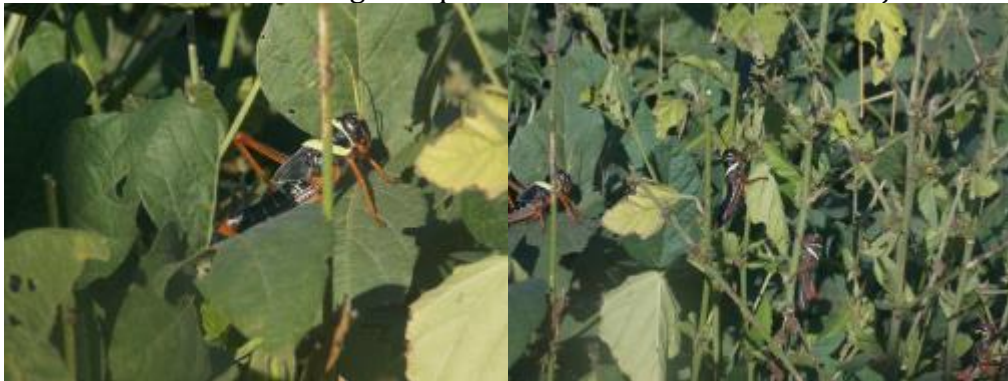
Humedales, fauna y cobertura boscosa característica



Viviendas campesinas abandonadas, inmersas en la matriz agrícola.



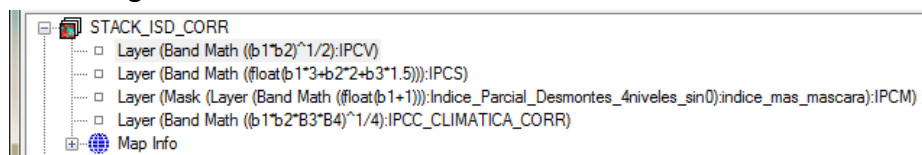
Invasión de la langosta quebrachera en los cultivos de soja



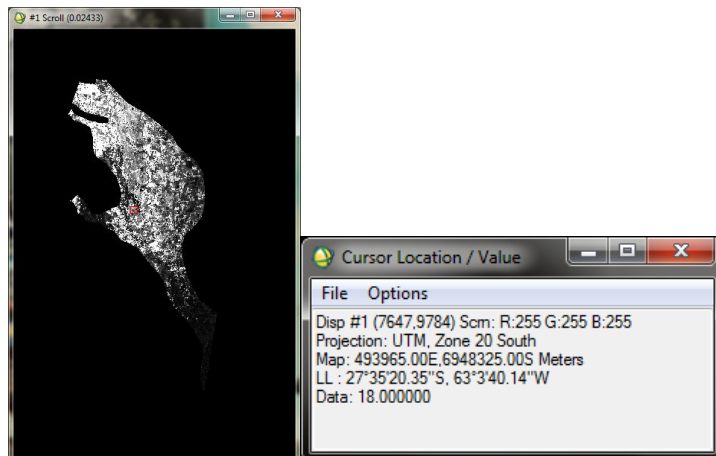
### ANEXO N° 3.

#### PASOS EN LA OBTENCIÓN DE LOS ÍNDICES: COMUNES PARA ISD / ISPC

##### 1. Layer Stacking – bandas

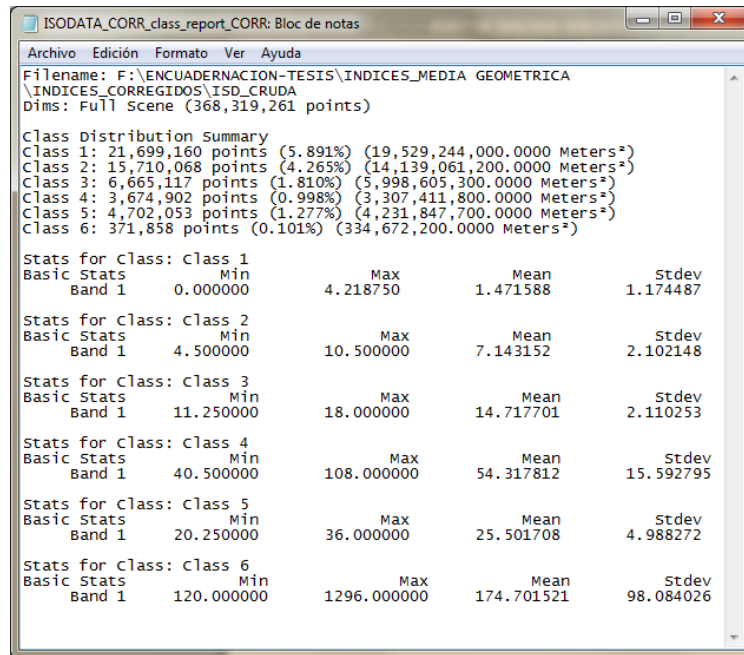


##### 2. Aplicación del índice ISD con band math (ENVI)

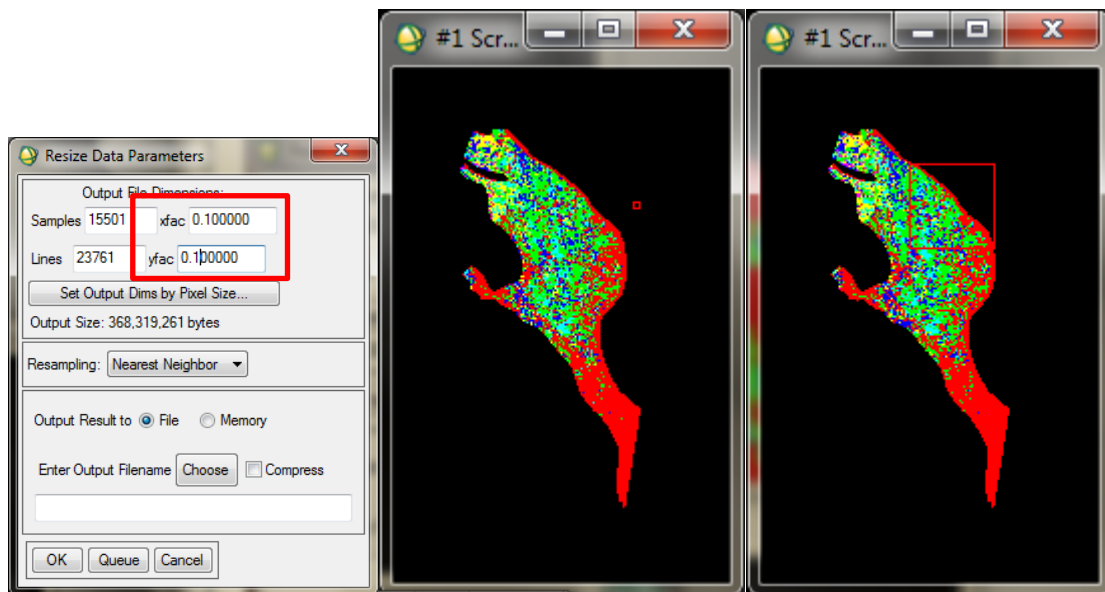


3. Clasificación no supervisada – ISODATA (6 imput)

4. Vinculación de las bandas (ISODATA - Indice) con el módulo *Class Statistic*. Definición de categorías



5. Remuestreo de la banda ISODATA: Dimensión 0.1 veces más chico



0.1 veces mas chico (significa que es 10 veces mas grande)



6) Filtro mayoriti a la banda Isodata remuestreada:

