

Estimación de Atributos Superficiales de Suelos Agrícolas Vinculados con su Dinámica Hídrica: Contribución de la Radiometría de Campo y Satelital

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires
(UBA)
Área Ciencias Agropecuarias*

MARCELA PISCITELLI
Ingeniera Agrónoma - UBA - 1980
Magister Teledetección y SIG - U.N.C.P.B.A - 2009

Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos. Facultad de Agronomía. U.N.C.P.B.A.



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

HÉCTOR F. DEL VALLE

Ingeniero Agrónomo, Especialista en Suelos (Universidad Nacional del Sur)
Master en Ciencias Edafológicas (Universidad Autónoma de Chapingo, México)
Doctor en Agronomía (Universidad Nacional del Sur)

Co-director

WALTER F. SIONE

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)
Doctor en Ciencias Aplicadas (Universidad Nacional de Luján)

JURADO DE TESIS

JURADO

Marcelo Scavuzzo
Licenciado en Física (UNC)
Doctor en Física (UNC)

JURADO

Carlos Di Bella
Ingeniero Agrónomo (UBA)
Doctor du Institut National Agronomique Paris- Grignon (INAP-G- Francia)

JURADO

Gabriela Cordón
Licenciada en Análisis Ambiental (UNSAM)
Doctora de la Universidad de Buenos Aires. (UBA)

Fecha de defensa de la tesis: 12 de mayo de 2022

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar en las siguientes líneas mi agradecimiento a las personas e instituciones que han contribuido en la realización de la presente tesis:

*A mi director, **Héctor F. del Valle**, por haber confiado en mí al haberme apoyado con este tema de investigación. Por su buena predisposición a responder mis consultas, a pesar de la distancia física. Sus aportes siempre fueron muy oportunos y esclarecedores.*

*A mi co-director, **Walter F. Sione**, por su buena predisposición a colaborar para la concreción de la tesis.*

*A la **Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)** por la realización del convenio (Res.5676/2015-UNCPBA) que me permitió disponer de radiómetros para las mediciones, además de brindarme colaboración y apoyo en la logística de las mediciones.*

*Al grupo de radiometría de CONAE **Guillermo Ibáñez, Jesús Pérez, Ivanna Tropper, Nathalie Horlent**, y muy especialmente a **Mariana Horlent** por todo su apoyo en las mediciones de radiometría a campo y laboratorio, como también en la discusión y ajuste de protocolos.*

*A **Claudia Marinelli** y **Rosana Cepeda**, por la valiosísima asistencia en la resolución y toma de decisiones en temas “no menores” vinculados a matemática y estadística.*

*A **Leo Morales** por su colaboración en las tareas de campo y en las determinaciones en laboratorio.*

*A **Priscilla Minotti** por su oportuna ayuda con determinados scripts empleados.*

*A **Mariano Piscitelli** por su valiosísimo “auxilio” en informática.*

*A **M. de los Ángeles Dublan** y **Laura Lázaro** por sus aportes en los temas vinculados a la estructura química de los rastrojos.*

*A **Adriana Confalone** por la información climática facilitada.*

*A las autoridades y personal de la **Facultad de Agronomía de Azul**, por facilitarme los medios para la concreción de las tareas de campo.*

*Por último, aunque no menos relevante, a mi familia, por acompañarme durante estos años de ejecución de la tesis. En especial a mi esposo **Alberto Sfeir** por su constante estímulo, además de colaborar en actividades de campo y muy especialmente en la ardua y prolongada tarea de laboratorio*

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
SIGLAS y ABREVIATURAS	viii
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1. Introducción General	1
1.1 Atributos superficiales vinculados a la dinámica hídrica de los suelos	1
1.2 Interacciones energía - superficies. Fundamentos teóricos	2
1.2.1 El espectro electromagnético	2
1.2.2 Origen de las formas de absorción	4
1.3 Estimación de propiedades edáficas	7
1.4 La condición de “suelo desnudo” y la problemática de los rastrojos	11
1.5 Hipótesis y Objetivos	14
1.5.1 Objetivo general	16
CAPÍTULO 2. Comportamiento espectral de diferentes superficies agrícolas	18
2.1 Introducción	18
2.2 Materiales y métodos	20
2.2.1 Área de estudio	20
2.2.2 Los sitios de medición	21
2.2.3 Diseño y distribución de las mediciones	23
2.2.4 Métodos	25
2.3 Resultados	32
2.3.1 Descripción de las coberturas en las transectas	32
2.3.2 Variabilidad de los atributos de superficie	37
2.3.3 Análisis de los espectros	39
2.3.3.1 Firmas adquiridas en igual fecha	39
2.3.3.2 Mediciones en las firmas espectrales adquiridas	41
2.3.3.2.1 Región entre 1950 nm y 2400 nm	41
2.3.3.2.2 Región entre 350 nm y 1800 nm	55
2.4 Discusión	76
2.4.1 Las firmas de la región entre 1950 nm y 2400 nm	77
2.4.1.1 Formas de absorción: “Concavidades”	77
2.4.1.2 Formas de absorción: “Picos”	82
2.4.2 Las firmas la región entre 750 nm y 1800 nm	85
2.4.3 Las firmas de la región entre 350 nm y 750 nm	60
2.5 Conclusiones	63
CAPÍTULO 3. Comportamiento de la línea de suelos en superficies agrícolas en barbecho conservacionista	88
3.1 Introducción	88
3.2 Materiales y Métodos	91
3.3 Resultados	96
3.3.1 Correlación de combinaciones de bandas centrales	96
3.3.2 Análisis de componentes principales entre variables en las	98

3.3.3	combinaciones de bandas seleccionadas	101
3.3.3	Separabilidad de suelo desnudo y suelo con rastrojo en las diferentes combinaciones de bandas	101
3.3.4	Análisis discriminante de los agrupamientos generados en el análisis de componentes principales	105
3.4	Discusión	110
3.5	Conclusiones	111
	CAPÍTULO 4. Respuesta espectral de los atributos de superficie en imágenes satelitales	113
4.1	Introducción	113
4.2	Materiales y Métodos	116
4.2.1	Datos satelitales	116
4.2.1.1	Características de las imágenes	116
4.2.1.1	Corrección atmosférica	119
4.2.1.3	Ubicación de las transectas en las imágenes e identificación de los píxeles	121
4.2.2	Datos radiométricos	124
4.2.3	Ajuste de los datos radiométricos a las imágenes satelitales	125
4.2.4	Ajuste de los datos radiométricos a las áreas de entrenamiento	126
4.2.5	Metodología de análisis	126
4.3	Resultados	127
4.3.1	Bandas de absorción en las firmas satelitales	127
4.3.2	“Línea de suelos” en las imágenes satelitales	138
4.4	Discusión	145
4.5	Conclusiones	147
	CAPÍTULO 5. Conclusiones y Recomendaciones	150
5.1	El aporte de la radiometría	150
5.2	La “Línea de Suelos” con datos radiométricos	153
5.3	Los atributos de superficie en imágenes satelitales	155
5.4	Conclusiones	156
5.5	Futuras investigaciones	158
	6. BIBLIOGRAFÍA	160
	APÉNDICE A - Capítulo 2	171
	APÉNDICE B - Capítulo 3	189

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1.1	Ventajas, dificultades y precisión de los métodos de estimación de textura y materia orgánica basados en información espectral	11
CUADRO 2.1	Altura del radiómetro en cada transecta	27
CUADRO 2.2	Proporción de los componentes de la cobertura en la transecta S2014	34
CUADRO 2.3	Proporción de los componentes de la cobertura en la transecta M2014	35
CUADRO 2.4	Proporción de los componentes de la cobertura en la transecta S2017	36
CUADRO 2.5	Resumen de estadísticos de los atributos medidos en cada transecta	37
CUADRO 2.6	Condiciones meteorológicas en los sitios medidos	41

CUADRO 2.7	Región espectral, profundidad de absorción y banda central en espectros de referencia	43
CUADRO 2.8	Regiones de absorción “cóncavas” entre 1950 nm y 2400 nm	44
CUADRO 2.9	Regiones de absorción en “picos” entre 1950 nm y 2400 nm	45
CUADRO 2.10	Profundidad de absorción y banda central en formas “cóncavas” entre 2023 nm y 2179 nm	47
CUADRO 2.11	Profundidad de absorción y banda central en formas “cóncavas” entre 2285 nm y 2373 nm	47
CUADRO 2.12	Profundidad de absorción y banda central en formas con “picos alrededor de 2000 nm”	50
CUADRO 2.13	Autovalores y autovectores del análisis de Componentes Principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2000 nm” en S2017	51
CUADRO 2.14	Autovalores y autovectores del análisis de Componentes Principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2000 nm” en S2014	52
CUADRO 2.15	Autovalores y autovectores del análisis de Componentes Principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2000 nm” en M2014	53
CUADRO 2.16	Profundidad de absorción y banda central en formas con “picos alrededor de 2200 nm” en S2017	55
CUADRO 2.17	Autovalores y autovectores del análisis de Componentes Principales en las adquisiciones con picos “alrededor de 2200 nm ” en S2017	55
CUADRO 2.18	Regiones espectrales, profundidad de absorción y banda central entre 350 nm y 1800 nm en la firma de referencia de rastrojo puro de soja	58
CUADRO 2.19	Regiones espectrales, profundidad de absorción y banda central entre 350 nm y 1800 nm en la firma de referencia de suelo desnudo	58
CUADRO 2.20	Regiones espectrales, profundidad de absorción y banda central entre 350 nm y 1800 nm en la firma de referencia de rastrojo puro de maíz	59
CUADRO 2.21	Regiones de absorción en formas con “picos” entre 750 nm y 1800 nm	60
CUADRO 2.22	Regiones de absorción “cóncavas” entre 750 nm y 1800 nm	60
CUADRO 2.23	Profundidad de absorción y banda central en formas con “picos” entre 910 nm y 994 nm	61
CUADRO 2.24	Profundidad de absorción y banda central en formas con “picos” entre 1103 nm y 1184 nm	62
CUADRO 2.25	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos” entre 750 nm y 1800 nm en S2017	62
CUADRO 2.26	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos” entre 750 nm y 1800 nm en S2014	64
CUADRO 2.27	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos” entre 750 nm y 1800 nm en M2014	65
CUADRO 2.28	Profundidad de absorción y banda central en concavidades	67

	entre 941 nm y 1144 nm	
CUADRO 2.29	Profundidad de absorción y banda central en concavidades entre 1137 nm y 1330 nm	68
CUADRO 2.30	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “concavidades” entre 750 nm y 1800 nm en S2017	68
CUADRO 2.31	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “concavidades” entre 750 nm y 1800 nm en S2014	70
CUADRO 2.32	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “concavidades” entre 750 nm y 1800 nm en M2014	72
CUADRO 2.33	Profundidad de absorción y atributos vinculados en las regiones espectrales entre 750 nm y 1800 nm	73
CUADRO 2.34	Regiones de absorción, profundidad y banda central entre 604 nm y 745 nm	74
CUADRO 2.35	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las firmas con concavidades entre 350 nm y 750 nm en S2014	74
CUADRO 2.36	Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las firmas con concavidades entre 350 nm y 750 nm en M2014	76
CUADRO 2.37	Regiones de absorción de cromóforos químicos de los rastros	79
CUADRO 3.1	Correspondencia de las muestras de suelo utilizadas en laboratorio con los puntos medidos con radiómetro a campo	93
CUADRO 3.2	Coefficientes de correlación entre reflectancias en observaciones de suelo desnudo (SD) y con rastros (SCR) para los datos de S2014	97
CUADRO 3.3	Coefficientes de correlación entre reflectancias en observaciones de suelo desnudo (SD) y con rastros (SCR) para S2017	97
CUADRO 3.4	Correlaciones de las variables en los tres primeros componentes principales para las combinaciones de bandas en S2014	99
CUADRO 3.5	Correlaciones de las variables en los tres primeros componentes principales para las combinaciones de bandas en S2017	101
CUADRO 3.6	Descripción de los parámetros considerados para la elección de la combinación óptima de bandas para S2014	108
CUADRO 3.7	Descripción de los parámetros considerados para la elección de la combinación óptima de bandas para S2017	109
CUADRO 4.1	Distribución por pixel de los puntos medidos a campo en las áreas de entrenamiento para cada imagen y resolución espacial	124
CUADRO 4.2	Descripción de las coberturas de las parcelas con rastrojo de soja enmalezado (SRE)	125
CUADRO 4.3	Correlación entre banda y atributo del área de entrenamiento en Sentinel-2, resolución 10 m	130
CUADRO 4.4	Correlación entre banda y atributo del área de entrenamiento en Sentinel-2 resolución 20 m	133

CUADRO 4.5	Correlación entre banda y atributo del área de entrenamiento en Landsat-8	136
CUADRO 4.6	Correspondencia entre resultados radiométricos y satelitales	138
CUADRO 4.7	Ajuste de las diferentes combinaciones de bandas VIS-NIR de ambos satélites	140
CUADRO 4.8	Ajuste de las diferentes combinaciones de bandas SWIR-SWIR de ambos satélites	143
CUADRO 4.9	Ajuste de la combinación de bandas R-IR en Sentinel-2	144

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Espectro electromagnético en la región del óptico	4
FIGURA 1.2	Procesos electrónicos y vibracionales	5
FIGURA 1.3	Formas de absorción en el VIS-NIR	6
FIGURA 2.1	Ubicación de los sitios experimentales	21
FIGURA 2.2	Esquema de medición en transectas S2014 y M2014	24
FIGURA 2.3	Esquema de medición en transecta con rastrojo de soja S2017	25
FIGURA 2.4	Protocolo de adquisición de los datos radiométricos	28
FIGURA 2.5	Vista de la cobertura de rastrojos en la transecta S2014	34
FIGURA 2.6	Vista de la cobertura de rastrojos en la transecta M2014	35
FIGURA 2.7	Vista de la cobertura de rastrojos en la transecta S2017	36
FIGURA 2.8	Dispersión de los diferentes componentes granulométricos en las transectas	39
FIGURA 2.9	Espectros obtenidos el 30 de octubre de 2014	40
FIGURA 2.10	Posiciones en el espectro y formas de absorción entre 1950 nm y 2400 nm en las firmas de referencia	44
FIGURA 2.11	Proporción relativa de los valores porcentuales de PA, PCT y HR en S2017	48
FIGURA 2.12	Proporción relativa de los valores porcentuales de PA, PCT y HR en S2014	49
FIGURA 2.13	Proporción relativa de los valores porcentuales de PA, PCT y HR en M2014	49
FIGURA 2.14	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2000 nm” y los atributos medidos en S2017	51
FIGURA 2.15	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2000 nm” y los atributos medidos en S2014	53
FIGURA 2.16	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2000 nm” y los atributos medidos en M2014	54
FIGURA 2.17	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2200 nm” y los atributos medidos en S2017	56
FIGURA 2.18	Formas de absorción y bandas centrales entre 350 nm y 1800 nm en las firmas de referencia	57
FIGURA 2.19	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2017	63
FIGURA 2.20	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2014	65
FIGURA 2.21	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en M2014	66

FIGURA 2.22	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “concavidades entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2017	69
FIGURA 2.23	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “concavidades entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2014	71
FIGURA 2.24	Biplot de las adquisiciones radiométricas con “concavidades entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en M2014	72
FIGURA 2.25	Biplot de las adquisiciones radiométricas y los atributos medidos en S2014 entre 350 nm y 750 nm	75
FIGURA 2.26	Biplot de las adquisiciones radiométricas y los atributos medidos en M2014 entre 350 nm y 750 nm	76
FIGURA 3.1	Adquisiciones radiométricas a campo y en laboratorio	92
FIGURA 3.2	Secuencia metodológica - Diagrama de pasos realizados	94
FIGURA 3.3	Dispersión de las reflectancias de las observaciones (campo y laboratorio) para las combinaciones de bandas consideradas	98
FIGURA 3.4	Biplot CP1 y CP2 para las observaciones en S2014, combinación 2083/2336	102
FIGURA 3.5	Biplot CP1 y CP2 para las observaciones en S2014, combinación 935/1006	103
FIGURA 3.6	Biplot CP1 y CP2 para las observaciones en S2017, combinación 681/935	104
FIGURA 3.7	Grupos considerados en el análisis discriminante y criterios de agrupamientos	105
FIGURA 3.8	Agrupamientos de las mediciones en la combinación de las bandas 1485/2083 en S2014	107
FIGURA 3.9	Agrupamientos de las mediciones en la combinación de las bandas 1190/1485 en S2017	107
FIGURA 4.1	Respuestas espectrales de Landsat-8 y Sentinel-2 entre 400 nm y 900 nm	118
FIGURA 4.2	Ubicación pixeles y transectas de campo en bandas con resolución de 10 metros en Sentinel-2	122
FIGURA 4.3	Distribución de las transectas en diferentes resoluciones espaciales	123
FIGURA 4.4	Firmas espectrales de los datos de radiometría y de Sentinel-2 en bandas con 10 m de resolución espacial	128
FIGURA 4.5	Firmas espectrales de los datos de radiometría y de Sentinel-2 en bandas con 20 m de resolución espacial	130
FIGURA 4.6	Firmas con el continuo removido de Sentinel-2 en banda 3, 10 m de resolución espacial	131
FIGURA 4.7	Firmas con el continuo removido de Sentinel-2 en banda 4, 10 m de resolución espacial	132
FIGURA 4.8	Firmas espectrales de los datos de radiometría y de Landsat-8	134
FIGURA 4.9	Firmas con el continuo removido de Sentinel-2 para 20 m de resolución espacial	135
FIGURA 4.10	Firmas con el continuo removido de Landsat-8	137
FIGURA 4.11	Gráfico de dispersión de las observaciones en las combinaciones de bandas en el VIS-NIR	139
FIGURA 4.12	Relación lineal entre bandas VIS-NIR	140
FIGURA 4.13	Gráfico de dispersión de las observaciones en las combinaciones de bandas en el SWIR-SWIR	141

FIGURA 4.14	Relación lineal entre bandas SWIR-SWIR	142
FIGURA 4.15	Gráfico de dispersión en la región R/IR en Sentinel-2	143
FIGURA 4.16	Relación lineal entre banda 5 y banda 8a en Sentinel-2	144
FIGURA 5.1	Síntesis sobre los patrones de absorción en las regiones del espectro óptico	152

SIGLAS y ABREVIATURAS

ACP	Análisis de Componentes Principales
AD	Análisis Discriminante
AG	Análisis Gráfico
AOT	En inglés; espesor óptico de aerosoles
arc	Arcilla
ARE	Arena
BRDF	En inglés; Función de distribución de reflectancia bidireccional
CHIME	En inglés; Misión Copernicus de Imágenes hiperespectrales para el medio ambiente
CP1	Componente Principal 1
CP2	Componente Principal 2
CP3	Componente Principal 3
CSIRO	En inglés; Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth
δ FOV	En inglés; Diámetro del campo de visión
EnMAP	En inglés; Mapeo del medio ambiente y programa de análisis
EODC	En inglés; Cubo de datos de observación de la Tierra
EROS Data Center	En inglés; Centro de ciencia y observación de recursos de la Tierra
ESA	En inglés; Agencia Espacial Europea
ETM+	En inglés; Mapeo temático mejorado
FC	Función canónica
FIR	En inglés; Infrarrojo lejano
FOV	En inglés; Campo de visión
GCP	En inglés; Punto de control terrestre
GLONASS	En inglés; Sistema global de navegación satelital
GPS	En inglés; Sistema de posicionamiento global
GSFC	En inglés; Centro de vuelo espacial Goddard
IRC	En inglés; Infrarrojo cercano
HA	Humedad Absoluta
HISUI	En inglés; Paquete de imágenes hiperespectrales
HYPXIM	En inglés; Imágenes hiperespectrales
HyspIRI	En inglés; Imágenes hiperespectrales infrarrojas
HR	Humedad del rastrojo
HS	Humedad del suelo
ISO	En inglés; Organización internacional de estandarización
Level-2A o S2A	En inglés; Nivel 2A (se refiere a la imagen SENTINEL-2 corregida a nivel de reflectancia de superficie)
Li	Limo
L1C - TOA	En inglés Nivel 1C (se refiere a la imagen SENTINEL-2 corregida

	a nivel de reflectancia al tope de atmósfera)
L8 SR	En inglés; Satélite LANDSAT-8 con nivel de reflectancia de superficie
LaSRC	En inglés; Algoritmo para obtener el producto LANDSAT-8 con nivel de reflectancia de superficie
M2013 RP	Rastrojo puro de maíz del año 2013
M2014	Rastrojo de maíz del año 2014
MIR	En inglés; infrarrojo medio
MO	Materia orgánica
MODIS	En inglés; Espectro-radiómetro de imágenes de resolución media
MSC	En inglés; Corrección del efecto multiplicativo de dispersión
MSI	En inglés; Instrumento multi-espectral
MSS	En inglés; Scanner multi-espectral
NASA	En inglés; Administración Espacial Aeronáutica de Estados Unidos
NAVSTAR	En inglés; Sistema satelital de navegación de sincronización de tiempo y rango
NDVI	En inglés; Índice de vegetación de Diferencia Normalizada
NIR	En inglés; infrarrojo cercano
PCT	Porcentaje de cobertura total
PRISMA	En italiano; Hiper-espectral avanzado de la misión para aplicaciones
RE	Rango espectral
RM	Rastrojo de maíz
RS	Rastrojo de soja
SCR	Suelo con rastrojo
S2	SENTINEL-2
S2014	Transecta de Soja año 2014
S2017	Transecta de Soja año 2017
S2017RP	Soja 2017 rastrojo puro
SD	Suelo desnudo
Sen2Cor	En inglés; Nombre de la aplicación para corregir atmosféricamente imágenes SENTINEL-2
SHALOM	En inglés; Misión radiómetro hiper-espectral aplicado a la tierra y el océano
SRE	Suelo con rastrojo enmalezado
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SNAP	En inglés; Acrónimo de Plataforma de aplicación de Sentinel
SNV	En inglés; Variante normal standard
SRF	En inglés; Función de respuesta espectral
SWIR	En inglés; Infrarrojo lejano
TEMP	Temperatura
T1	Transecta 1
T2	Transecta 2
T3	Transecta 3
T4	Transecta 4
T5	Transecta 5

T6	Transecta 6
TM	En inglés; Mapeo temático
USGS	En inglés; Servicio Geológico de Estados Unidos
VIS	En inglés; Visible
VNIR	En inglés; Visible infrarrojo cercano
WAB	En inglés; Bandas asociadas con el agua

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Estimación de Atributos Superficiales de Suelos Agrícolas Vinculados con su Dinámica Hídrica: Contribución de la Radiometría de Campo y Satelital

RESUMEN

Estimar atributos de superficie es esencial en agricultura de precisión y en múltiples aplicaciones vinculadas con el agua, degradación y manejo del suelo. Pero es arduo y costoso. Las metodologías para estimación de estos atributos con imágenes satelitales tienen imprecisiones. La interacción, propiedades de suelos y atributos de superficie (rastros) contribuye a esta incertidumbre. Se encontró que la radiometría en campo mejoró la precisión en la respuesta espectral de atributos, al permitir detectar las regiones en las cuales éstos absorben. Los rastros sólo absorben en infrarrojo de onda corta, en formas cóncavas, cuya profundidad varía con el tipo y estado de descomposición de éstos. Formas de picos en esta región espectral se vincularon a materia orgánica y arcilla. El visible-infrarrojo cercano contiene información sobre la granulometría. La variabilidad en profundidad de las formas de absorción se vinculó a la correlación entre granulometría, humedad del rastrojo, humedad de suelo y materia orgánica. Las formas de picos estuvieron directamente relacionadas al tamaño de partícula dominante en cada medición. La exploración en imágenes multiespectrales mostró coincidencia con lo hallado mediante radiometría en campo. SENTINEL-2 con mejores resultados que LANDSAT-8. De las 10 bandas con alta resolución espacial del SENTINEL-2, cuatro mostraron correlación con limo y/o arcilla, demostrándose, como en radiometría, que la proporción de cobertura no modifica estos resultados. Un análisis discriminante con datos radiométricos encontró combinaciones óptimas de bandas para definir una “línea de suelo” que separa gráficamente, suelo desnudo de suelo con rastrojo. Con imágenes satelitales, si bien se encontró factible discriminar estas condiciones de coberturas en las combinaciones planteadas, al explorar la incidencia de malezas en la línea de suelo, sólo la combinación con bandas en el infrarrojo de onda corta, mostró buenos resultados. La línea de suelo es un instrumento eficiente para predecir la “condición de suelo desnudo” si se analiza en el espacio espectral adecuado. Estos resultados contribuyen en mejorar el análisis digital de imágenes.

Palabras claves: Rastros; Humedad del rastrojo; Porcentaje de cobertura del rastrojo; Textura del suelo; Humedad del suelo; Materia orgánica; Radiometría de campo; SENTINEL-2; LANDSAT-8 OLI.

Estimation of the Agricultural Soil Surface Attributes Linking remote and proximal sensing

ABSTRACT

Even though estimations of soil surface attributes are hard and expensive to obtain, it is essential data for precision agriculture and in many other research fields related to water, soil management and degradation. Remote sensing methodology for soil surface attributes estimation needs to be improved in terms of accuracy; interaction between soil properties and surface attributes such as crop residues still leads to uncertainty. As regards the spectral response of the attributes, accuracy has been improved by proximal sensing techniques showing, as a result, wide absorption features and narrow ones. Crop residues only absorb at short infrared wide features which vary in depth according to their type and state of decomposition. Narrow features were associated with organic matter and clay. Visible near infrared, evidenced granulometry. Variability concerning wide features was associated with correlation among granulometry, crop residues moisture, soil moisture and organic matter. Narrow features were related to the size of the prominent particle in every measurement. There was coincidence between the soil proximal sensing data and the findings in multispectral images. SENTINEL-2 proved better data than LANDSAT-8 OLI. Four out of ten bands with high spatial resolution from SENTINEL-2 were associated with silt and/or clay proving that crop residue cover percentage does not interfere in the results. The same occurred with proximal sensing techniques. Discriminant Analysis evidenced suitable band combinations to reach the soil line and separate bare soil from soil with crop residue through proximal sensing. Exploratory research on images evidenced the impact of weeds on the soil line proving the viability of making a graphic distinction between bare soil and with crop residue in every available combination. To predict any of the three covers, the SWIR/SWIR combination proved to be the best one. The soil line is an effective tool to predict the bare soil condition provided that the suitability of the spectral space is considered in the analysis. Most certainly, these results lead the way to making improvements in image analysis.

Keywords: Crop residues; Crop residues moisture; Crop residues cover percentage; Soil texture; Soil moisture; Organic matter; Soil proximal sensing; SENTINEL-2; LANDSAT-8 OLI.

Estimación de atributos superficiales de suelos agrícolas vinculados con su dinámica hídrica: Contribución de la radiometría de campo y satelital

CAPÍTULO 1. Introducción General

1.1. Atributos superficiales vinculados a la dinámica hídrica de los suelos

El suelo es un sistema abierto que interactúa con el clima atmosférico e interviene en procesos cruciales para la vida vinculados a, la dinámica del agua y a la degradación de las tierras. Los atributos de los suelos agrícolas que en gran medida controlan estos procesos son propiedades edáficas como textura y materia orgánica, y la cobertura remanente de los cultivos cosechados que permanece en superficie. Estos atributos inciden sobre dichos procesos con acciones directas e indirectas.

Las propiedades de suelo, a estimar en esta tesis (textura y materia orgánica), intervienen en múltiples procesos vinculados con la dinámica hídrica de los mismos. Por un lado, controlan la retención hídrica y la porosidad del suelo, las cuales a su vez, condicionan las tasas y mecanismos de infiltración, percolación, evaporación y escurrimiento, y en consecuencia el almacenamiento de agua del suelo. Por otra parte, condicionan a otras propiedades como la estructura, influyendo, no sólo en la velocidad de movimiento del agua dentro del suelo sino también en la susceptibilidad del suelo a procesos de degradación, en especial, física, por erosión hídrica, y eólica (Brady et al. 1996).

Los sistemas de cultivos conservacionistas, en contraposición con los tradicionales, dejan una cantidad variable de residuos post cosecha en superficie (rastros). Éstos, manejados adecuadamente, contribuyen a la intercepción y retención del agua de lluvia y a la disminución de la evaporación del agua desde el suelo. En

consecuencia, se incrementa la infiltración de agua, que en combinación con el efecto de disminución de flujo de calor latente (por causa de la masa de rastrojos existente en superficie) deriva en más humedad disponible para los cultivos (Crow et al. 2012). Además, los rastrojos son fuente principal de materia orgánica en el suelo superficial luego de su descomposición y transformación (Unger 1994). Los rastrojos en superficie contribuyen a disminuir la pérdida potencial de suelo por erosión a causa de que estos actúan disipando la velocidad del agua en el caso de erosión hídrica, o bien, del viento erosivo en procesos de erosión eólica (Sfeir y col. 2005, Unger 1994). Es sabido que, como consecuencia de la ocurrencia de estos procesos erosivos de degradación del suelo, se producen redistribuciones de los componentes superficiales en el paisaje, en especial de la textura y la materia orgánica (Hudson 1982).

Los rastrojos y las propiedades como textura y materia orgánica, no solo interactúan con el medio ambiente “extra” edáfico, sino que además lo hacen entre sí. Estas interacciones resultan muy dispares otorgando a los suelos un carácter dinámico-funcional con amplia diversidad espacial. Tanto los suelos como las condiciones de sus superficies resultan ser complejos y funcionalmente variables, espacial y temporalmente.

1.2. Interacciones energía - superficies. Fundamentos teóricos

1.2.1. El espectro electromagnético

La radiación electromagnética es una forma dinámica de energía que se propaga a través del vacío o a través de un medio o materia. El campo electromagnético puede hacerse manifiesto solamente a través de su interacción con la materia. Para este fin, es necesario considerar la “materia” a un nivel atómico o molecular. Estas interacciones ocurren con ciertos tipos de materia como: a) gases diatómicos (ej. O₂, N₂, CO), b) gases poli-atómicos (H₂O y CO₂), c) .moléculas complejas de materiales orgánicos (ej.

hidratos de carbono, materia orgánica) y d) sustancias sólidas inorgánicas (minerales) (Mulders 1987).

El proceso involucrado en la generación de radiación produce energía con fotones, frecuencia y longitud de onda específicos. Sus cantidades proporcionan una escala y pueden ser acomodadas en un espectro electromagnético. En la Fig. 1.1 se muestra la porción del espectro electromagnético que integra la región del óptico (100 Å-1 mm) según la Organización Internacional de Standarización (ISO) (Jaín et al. 2020). El infrarrojo (entre 0.78 μm – 1 mm) por definición comprende las bandas más largas que el visible y las más cortas que microondas. En la figura 1.1 se amplió el espectro óptico indicando las subregiones del infrarrojo según la OSI (Jaín et al. 2020). Estas subregiones se denominaron, infrarrojo cercano entre 0,78 μm y 3 μm (Near infrared-NIR); infrarrojo medio entre 3 μm y 50 μm (Mid infrared-MIR); e infrarrojo lejano entre 50 μm y 1000 μm (Far infrared-FIR). Jaín et al. 2020 indagan sobre las diferencias que existen en la comunidad científica sobre los rangos y denominaciones de las regiones en el infrarrojo.

Algunos modelos de espectroradiómetros miden la energía obtenida en el rango visible- infrarrojo (VNIR) de 350 nm a 2500 nm (Fig. 1.1). En sensores remotos el infrarrojo es subdividido en dos porciones, la que limita con el visible se denomina infrarrojo cercano (NIR-de 780 nm a 1000 nm) y la de onda más corta que la anterior región que se denomina infrarrojo de onda corta (SWIR-de 1000 nm a 2500 nm) (Fig.1.1) (Chabrilat 2013).

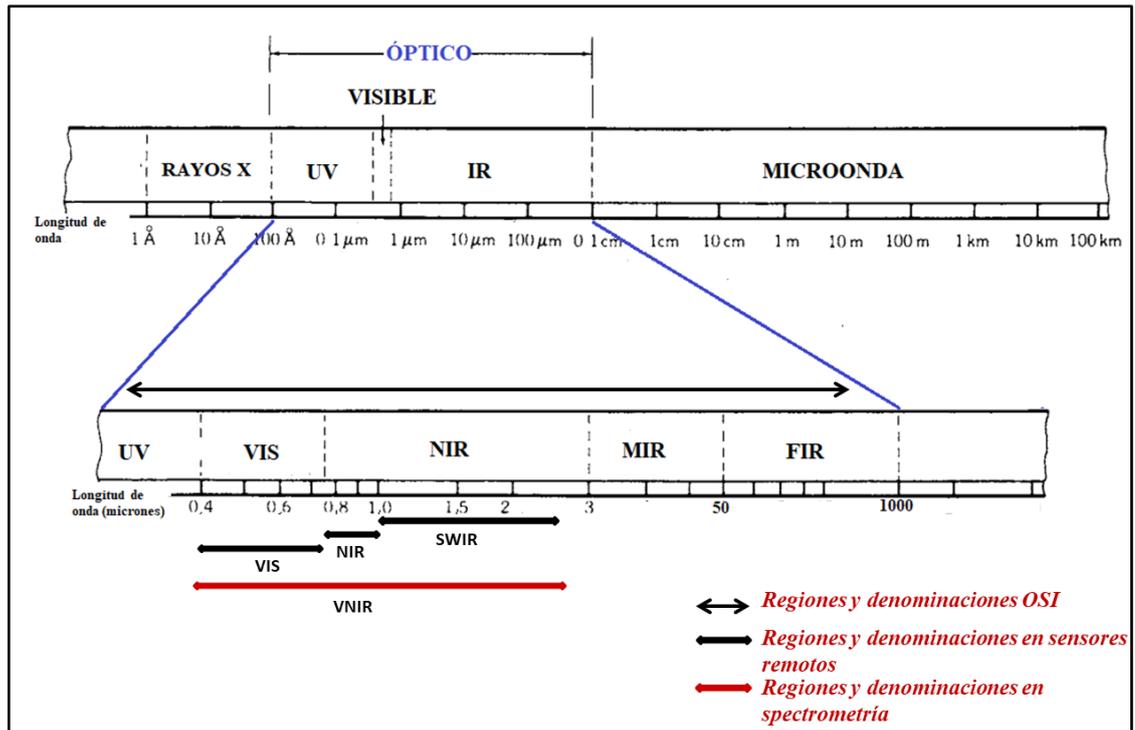


FIGURA 1.1. Espectro electromagnético en la región del óptico. Las flechas señalan los rangos espectrales y denominaciones considerados en espectrometría, en sensores remotos y por OSI: Organización Internacional para la Standardización. UV= ultravioleta, VIS = visible, IR = infrarrojo, NIR= infrarrojo cercano, MIR = infrarrojo medio, FIR= infrarrojo lejano, SWIR = infrarrojo de onda corta, VNIR = visible infrarrojo.

1.2.2. Origen de las formas de absorción

A través del tiempo se han desarrollado dos conceptos para describir el comportamiento y las interacciones de la radiación electromagnética con la materia. El concepto clásico considera a la radiación electromagnética como una onda continua de dos campos oscilantes (magnético y eléctrico). Este enfoque describe y predice la propagación en un comportamiento **macroscópico**, pero no logra esclarecer interacciones observadas entre la radiación y la materia a niveles atómicos y moleculares. Estas interacciones **microscópicas** son explicadas por medio del concepto de fotón, como un haz de partículas discretas que lleva determinada cantidad de energía. La luz tiene un comportamiento dual, por ejemplo, fotones de baja energía (ej. ondas de radio), tienen un comportamiento similar al de una onda. En cambio, fotones de alta energía (rayos X), tienen un comportamiento semejante al de una partícula.

A determinada longitud de onda, según como se altere el nivel energético en la estructura interna de cualquier componente del suelo, éste emitirá o bien absorberá radiación electromagnética. Estas modificaciones pueden ocurrir tanto a escala atómica como molecular.

A nivel atómico, ocurren **procesos electrónicos**. El mecanismo se basa en el **desplazamiento orbital de los electrones** (Mulders 1987). Si la radiación incide en un átomo con bajo nivel energético, parte de esta energía es absorbida y el electrón es inducido, por excitación, a cambiar a una órbita superior (Fig. 1.2). Por el contrario, el electrón pasará a una órbita inferior si el nivel energético del átomo es superior al de la energía incidente, y por ende la materia radiará (Shunji Murai 1993). Para que estos mecanismos ocurran se requiere de altos niveles de energía, por lo tanto, se manifiestan en la región del visible y ultravioleta del espectro.

A nivel molecular ocurren **procesos vibracionales** (Fig.1.2) como consecuencia de oscilaciones de átomos o iones presentes en las uniones entre moléculas (Mulders 1987).

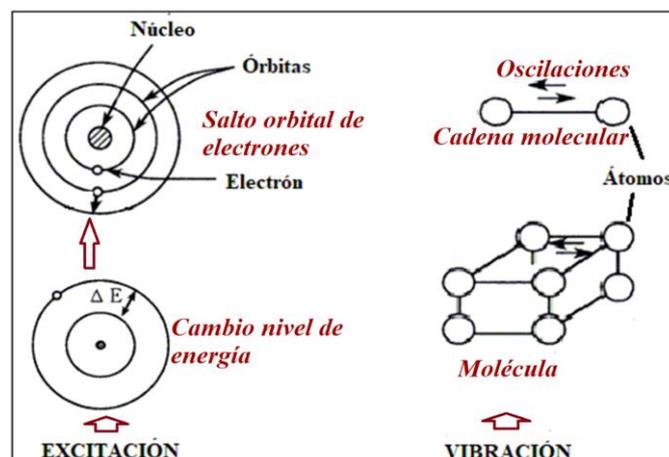


FIGURA 1.2. Procesos electrónicos y vibracionales. Izquierda, uno de los procesos electrónicos (excitación). A la derecha, vibración de moléculas. (Adaptado de Murai et al. 1993).

Cuando en el infrarrojo medio (MIR) ocurren transiciones entre un nivel de energía (el más bajo para determinada molécula), a otro, energéticamente más alto, se

generan bandas de absorción que se denominan “**bandas fundamentales**”. Estos mecanismos se expresan con formas de absorción profundas y evidentes (Ben Dor y Epema, 1997). En el infrarrojo cercano (NIR) la interacción radiación- materia genera “**overtones**” con formas de absorción atenuadas, amplias y de intensidad débil. En la región del infrarrojo de onda más corta que el “cercano” ocurren, además de overtones, “**combinaciones de bandas**” donde se superponen dos o más transiciones entre niveles energéticos. Esto es debido a que la energía de un fotón se distribuye entre más de un estado energético o modos vibracionales. Las formas son amplias con bandas sobrepuestas (Ben Dor y Epema, 1997; Viscarra Rossel y Mc Bratney, 2008). En el visible (VIS) las formas de absorción son muy amplias y de intensidad débil. En la figura 1.3 se presentan estas formas de absorción en tres suelos diferentes, medidos por Stenberg 2010 en el VIS-NIR.

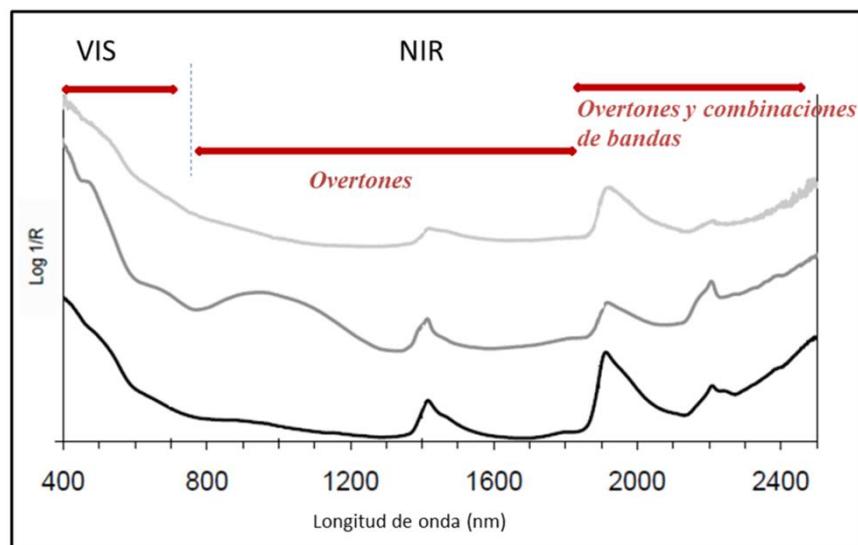


FIGURA 1.3. Formas de absorción en el VIS-NIR. Firmas espectrales de tres suelos medidas en unidades de absorbancia utilizando la transformación $\text{Log } 1/R$, donde R = reflectancia. Formas muy suaves en el visible (VIS). Overtones en región del infrarrojo cercana al VIS (NIR). Combinaciones de bandas y overtones en región del infrarrojo más lejana al VIS (NIR). (Adaptado de Stenberg 2010).

Los átomos y moléculas que participan de los mecanismos antes comentados, así como también ciertos parámetros físicos, afectan significativamente la forma y naturaleza del espectro. A éstos se los denominan **cromóforos** (Ben Dor 2002, Ben Dor

et al.2008, Escribano et al. 2017). Los de naturaleza química que se reconocen como más importantes en el suelo (Ben Dor 2002) son: a) minerales (de arcillas y óxidos de hierro), b) arenas, c) carbonatos (calcio-magnesio), d) agua (en las tres fases, sólida, líquida y gaseosa), e) materia orgánica (en diferentes estados de descomposición). Los cromóforos físicos vinculados al suelo (Ben Dor y Epema, 1997) son: a) tamaño de partícula (granulometría), b) tamaño del agregado (clase estructural), c) rugosidad. Entre los cromóforos de los rastros, se citan como importantes (Daughtry 2001): a) lignina, b) celulosa.

Un proceso físico trascendente que tiene lugar en la interacción suelo-radiación es el de “**scattering**” como producto de la convergencia de una multitud de fotones que interactúan mecánicamente con un enorme número y variedad de átomos, moléculas y cristales en un volumen macroscópico de suelo. Por ende, muchas características resultantes del proceso de scattering no pueden atribuirse a una interacción mecánica única, con un fotón específico como se observa con los procesos de absorción o reflexión (Ben Dor y Epema, 1997).

1.3. Estimación de propiedades edáficas

La adquisición de datos cuantitativos sobre los atributos y propiedades citados contribuye a la profundización del conocimiento de los procesos antes mencionados. Además, resulta esencial contar con estos datos para un eficaz manejo de los suelos, como también en múltiples aplicaciones en el entorno de la agricultura de precisión (Hbirkou 2011).

Los muestreos sistemáticos y las técnicas de laboratorio usadas en relevamientos convencionales para la adquisición de estos datos, resultan prolongados y costosos (Viscarra Rosell y Mc Bratney, 2008).

Entre los métodos no convencionales están los que utilizan la información espectral de las superficies. Éstos suelen dividirse en, 1) aquellos que se ejecutan “*in situ*”, basados en espectrometría, ya sea de laboratorio o de campo (denominados “Proximal Soil Sensing”), y 2) los que analizan la información adquirida a distancia, provista por imágenes obtenidas desde aviones o bien desde satélites (denominados “Sensores Remotos”) (Viscarra Rosell et al. 2011).

1) Desde hace alrededor de cinco décadas se generan estimaciones de propiedades edáficas con espectrometría de laboratorio, en especial, materia orgánica, textura y mineralogía, dentro de la región del óptico (Stoner et al 1980a; Brown et al. 2006; Gholizadeh et al. 2013; Soriano-Disla et al 2014; Adeline et al. 2017; Dotto et al. 2018; Angelopoulou et al. 2019). Estos procedimientos, si bien brindan muy buenos resultados, se ejecutan en condiciones ambientales controladas, con suelo tamizado y disturbado.

Cuando estas propiedades son estimadas a campo, tanto las condiciones ambientales como la presencia de rastrojos no pueden ser controlada (Stenberg, 2010).

Con un número de experiencias sustancialmente menor a las de laboratorio, los estudios basados en espectrometría de campo son ejecutados predominantemente sobre “suelo desnudo”. Las condiciones reales que presentan los sistemas agrícolas conservacionistas, tal como son vistas desde un satélite, no son consideradas en la gran mayoría de estos estudios. En las investigaciones realizadas en los últimos 15 años se proponen diferentes metodologías en un intento de mejorar la precisión en la estimación de propiedades de suelo. Hay una tendencia creciente en desarrollar sensores montados en vehículos frente a la utilización de radiómetros manuales. Las propiedades más estudiadas son materia orgánica, textura, contenido hídrico y mineralogía. Mejores resultados se han logrado en predicción de arcillas (Waiser et al. 2007; Viscarra Rossel

et al. 2009; Ackerson et al. 2017) que en materia orgánica (Bricklemyer y Brown, 2010; Ge et al. 2014; England y Viscarra Rossel, 2018). Estos autores coinciden en que la humedad del suelo es el parámetro que más contribuye a la disminución de precisión.

2) Entre los sensores remotos, las imágenes hiperespectrales, constituyen una de las herramientas más prometedoras para estimar propiedades de suelos bajo enfoques cuantitativos en grandes dominios espaciales, fundamentalmente, debido a que proveen una representación del espectro de reflectancia en cada pixel (Ben Dor 2008). Sin duda esto resulta de utilidad para los suelos considerando la complejidad y heterogeneidad antes comentada.

Estimaciones desde datos hiperespectrales provenientes de imágenes con sensores montados en aviones, constituyen el mayor número de trabajos realizados (Selige, 2006; Hively et al. 2011; Gerighausen et al., 2012; Gómez et al 2012; Castaldi et al. 2018a). Los resultados, si bien, todos mostraron buenas correlaciones con texturas; no fueron coincidentes al momento de correlacionar los datos espectrales con materia orgánica. En este sentido, Dvorakova et al. 2020, sostienen que la humedad del suelo, la presencia y proporción de rastros, la rugosidad del suelo y la presencia de vegetación verde constituyen factores que subestiman o sobreestiman la predicción de materia orgánica

Con respecto a investigaciones desde imágenes satelitales hiperespectrales, además de que existen muy pocos estudios, los resultados mostraron imprecisión en la predicción de las propiedades de suelos consideradas en esta tesis (Zhang 2013; Lu et al. 2013; Schmid et al. 2016; Gómez et al. 2018).

El mayor número de investigaciones apoyadas en datos multiespectrales está basado en procedimientos cualitativos focalizados a discriminar suelos a nivel taxonómico, o bien, para complementar técnicas mixtas de cartografía de suelos (por

ejemplo, utilizando fotos aéreas) (Nanni et al., 2001; McBratney et al., 2003; Demattê et al., 2009a; Mulder et al. 2011).

Estrategias de estimación cuantitativa de propiedades de suelo con imágenes multiespectrales, comenzaron a difundirse en los últimos años. Estos intentos se apoyaron en la identificación de áreas continuas de suelo desnudo mediante técnicas de superposición, y luego reducción de colecciones multitemporales, a una sola imagen, tal como propone Demattê et al. 2016, 2018. Algunos autores utilizaron similares estrategias con el fin de mapear propiedades de suelo (Fongaro et al. 2018; Gallo et al. 2018), pocos con el propósito de predecirlas (Diek et al. 2017). Todas las rutinas se basaron en la detección de píxeles libres de vegetación verde como indicadores de suelo desnudo.

Estos antecedentes revelan que la estimación cuantitativa de propiedades de suelo resulta menos precisa con sensores remotos que con sensores “in situ”. No obstante, las imágenes satelitales resultan valiosas dado que proporcionan mayor cantidad de datos, espacial, y temporalmente, de manera rápida y con menores costos que los procedimientos in situ. Entre las dificultades mencionadas que causaron imprecisión en las investigaciones con imágenes, las más importantes son las vinculadas a, la contaminación atmosférica, la baja resolución espectral (en sensores multiespectrales), y las variaciones de reflectancia en una superficie dada (efecto BRDF). Precisamente, este último inconveniente se encuentra muy vinculado con la variabilidad y complejidad, antes aludida, existente en las superficies agrícolas (Ben Dor, 2002; Chavda 2005; Ben Dor et al., 2009; Mulder et al., 2011; Gerighausen et al., 2012, Chabrillat et al. 2019).

Castaldi et al. 2016, compararon imágenes multiespectrales con hiperespectrales encontrando mejores resultados para estimar textura y materia orgánica en estas últimas.

Concluyen que los datos hiperespectrales de las misiones venideras, en comparación con las imágenes actuales, podrían mejorar el mapeo y monitoreo de textura y materia orgánica debido a que, en las futuras misiones, se pretende articular una mayor resolución espectral con mejor relación señal/ruido.

En el Cuadro 1.1 se señalan las ventajas, dificultades y la precisión lograda en la estimación de la textura y materia orgánica, según las investigaciones antes citadas. Los métodos de validación de la precisión obtenida utilizados en los diferentes trabajos fueron muy dispares.

MÉTODO	VENTAJAS y PRECISIÓN	DIFICULTADES
Espectrometría Laboratorio	Precisión Alta en Textura y Materia Orgánica.	Dato Puntual. Humedad/temperatura ambiental controladas. Suelo desnudo/disturbado/tamizado.
Espectrometría en campo	Suelo Fresco (No disturbado). Precisión variable (Moderada/Baja) en Materia orgánica. Precisión Buena en Textura.	Dato Puntual. Humedad/temperatura ambiental no controladas. Rugosidad y humedad del suelo. Presencia rastrojo. Presencia vegetación verde.
Imágenes Multiespectrales	Altos dominios espaciales y Temporales. Precisión Moderada en Textura. Precisión Baja en Materia orgánica.	Interferencia atmosférica. Rugosidad y humedad del suelo. Presencia rastrojo. Presencia vegetación verde. Baja resolución espectral.
Imágenes Hiperespectrales	Altos dominios espaciales y temporales. Alta resolución espectral. Precisión Buena en Textura (aviones). Precisión variable (Moderada/Baja) en Materia orgánica (aviones). Precisión Baja en Textura y Materia orgánica (imágenes).	Interferencia atmosférica. Rugosidad y humedad del suelo. Presencia rastrojo. Presencia vegetación verde.

CUADRO 1.1. Ventajas, dificultades y precisión de los métodos de estimación de textura y materia orgánica basados en información espectral.

1.4 La condición de “suelo desnudo” y la problemática de los rastrojos

Para estimar las propiedades de los suelos a través de la reflectancia, es condición indispensable contar con superficies libres de cultivos. El período de barbecho es una etapa recomendable para este fin. En la actualidad confluyen dos sistemas de manejo de barbechos, uno conservacionista, que deja las superficies

agrícolas con rastrojos, y otro tradicional, en el cual la superficie resta totalmente desnuda.

La reflectancia de los suelos en superficies con rastrojos puede estar controlada por otros factores además de la textura y materia orgánica. Una amplia bibliografía (Serbin et al. 2009a; Serbin et al. 2009b; Cierniewski y Kusnierek, 2010; Stenberg et al. 2010; Najafi et al. 2018) muestra que, tanto la presencia de rastrojos, como la mezcla de los componentes del suelo, la humedad (suelo y rastrojo), y, por último, la rugosidad de la superficie, pueden causar cambios significativos en la reflectancia de propiedades como textura y materia orgánica.

La cuantificación en forma puntual de rastrojos en superficie, ampliamente empleada a campo, (Laflén et al. 1981, Morrison et al. 1993) no sólo es dificultosa, sino que suele ser inapropiada para estimaciones a niveles de percepción poco detallados. Ante esta problemática se han propuesto diversos métodos en imágenes satelitales para detectar la “condición de suelo desnudo”. Uno muy utilizado, es el basado en la identificación del color del píxel, es cualitativo, y puede conducir a errores de interpretación cuando se usa aisladamente, requiriendo, por ende, de información adicional (Nanni y Demattê, 2006; Piscitelli 2009). Otro método, se basa en la aplicación de índices espectrales. Los de identificación de la vegetación fotosintéticamente activa, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), no da cuenta sobre la presencia de rastrojos. Esto fue demostrado por Demattê et al. 2018, quienes con espectroscopía en laboratorio determinaron un NDVI de 0.19 para suelo desnudo. Este valor incrementó con la incorporación de vegetación verde, llegando a 0,71 con 100% vegetación. Pero además, encontraron que al incorporar proporciones crecientes de rastrojos a las muestras de suelo desnudo el valor

del NDVI disminuía. Concluyeron que es necesario complementar la información para detectar suelos desnudos con índices específicos que midan la presencia de rastrojos.

Los índices desarrollados para identificar rastrojos únicamente se han validado en coberturas menores o iguales al 30 %. Los resultados obtenidos han sido muy dispares, mostrando que estos índices responden a las variaciones en la humedad, cantidad, y grado de descomposición de los rastrojos, además de la diversidad en humedad, materia orgánica, textura y mineralogía, que tienen los suelos. (Nagler et al. 2000; Daughtry 2001; Serbin et al. 2009a; Serbin et al. 2009b, Aguilar 2012a, Aguilar 2012 b, Zheng 2013 y Dvorakova et al. 2020).

Un procedimiento adicional para detectar píxeles con suelos desnudos es la identificación de la “línea de suelos” con los datos de áreas de entrenamiento desde imágenes. La línea de suelos ha sido definida como una relación linear que guardan los valores de reflectancia de los píxeles con suelo desnudo en el espacio del infrarrojo cercano y el rojo (Baret et al. 1993). Esta técnica es ampliamente utilizada para distinguir suelo desnudo de superficies con vegetación verde (Wiegand y Richardson, 1982; Jasinski y Eagleson, 1989; Baret y Guyot, 1991; Xu y Guo, 2013; Ahmadian et al. 2016), pero no; en el entorno de establecer “la condición de suelo desnudo” en superficies con rastrojos.

Últimamente se ha propuesto (Demattê et al 2009b) adicionar a la información antes comentada, la obtenida a partir de firmas adquiridas en librerías espectrales de suelos. La metodología contrasta firmas de librerías personales (en laboratorio), o bien de librerías globales (disponibles *online*), con firmas espectrales de “suelos desnudos” obtenidas desde imágenes. Si bien las librerías disponibles basadas en firmas obtenidas en laboratorio corresponden a suelos con diferentes propiedades, éstas se refieren a suelos desnudos y disturbados. Estas condiciones de suelo, precisamente, como se

argumentó en el ítem anterior sobre estimaciones de propiedades edáficas, no son las circunstancias reales que presentan las superficies agrícolas al momento de ser vistas desde un satélite.

Los antecedentes explorados evidencian que las técnicas basadas en información espectral a partir de espectroscopía sin duda proveen una alternativa muy precisa para mejorar o reemplazar métodos convencionales de análisis de suelos.

Por otro lado, obtener información sobre la complejidad espacio temporal de los atributos de superficie (textura, rastrojos, materia orgánica) tiene un valor potencialmente amplio. Los antecedentes acumulados en décadas sobre las interacciones existentes entre los componentes del suelo y la energía electromagnética, acreditan que las imágenes satelitales se constituyen en una virtual herramienta para el mapeo y monitoreo de propiedades de suelo. Sin embargo, a pesar de los avances logrados, aún es necesario mejorar la precisión de cuantificación de estos atributos de superficie desde imágenes. En este sentido, dilucidar sobre las modificaciones que, atributos como humedad de suelo, y presencia de rastrojo, generan en la reflectancia de superficies agrícolas, constituye un desafío.

Estos antecedentes instalaron el siguiente interrogante:

¿Cómo se afecta la respuesta espectral de propiedades de suelo cuando ésta es evaluada en escenas complejas, en condiciones naturales a campo y con sistemas de cultivo conservacionista (con rastrojo en superficie)?

1.5 Hipótesis y Objetivos

Es clave, y aún no se ha resuelto con certeza, la identificación de “la condición de suelo desnudo” con imágenes satelitales (Chavda, 2005; Daughtry, 2005; Bricklemeyer, 2006; Nanni, 2006 Diek et al. 2017; Demattê et al. 2018; Fongaro et al. 2018; Gallo et al. 2018; Rogge et al. 2018).

Deducir la incidencia en la respuesta espectral de componentes que interactúan en las superficies agrícolas como, la humedad (del suelo y rastrojo), la presencia y proporción de malezas, la composición granulométrica y materia orgánica, contribuiría a caracterizar la “condición de suelo desnudo”.

Teniendo en cuenta los siguientes supuestos:

- Las metodologías existentes para estimar propiedades como la textura y materia orgánica desde satélites pueden ser mejoradas en la medida que se optimice la predicción de la “condición de suelo desnudo”.
- La precisión en la obtención de la “condición de suelo desnudo”, desde satélites, puede ser incrementada si se avanza en el conocimiento sobre la discriminación espectral de los diferentes tipos y proporciones de rastrojos presentes en superficie agrícolas.
- La medición espectral de los componentes de superficie aludidos, en condiciones reales de campo, en escenarios con diferentes interacciones entre estos atributos, permitirá precisar la respuesta espectral de dichas superficies. Esto contribuirá a la caracterización de la condición de suelo desnudo.
- Dado que la espectroscopía en laboratorio es un método consolidado y ampliamente utilizado para estimar atributos de suelos. La radiometría de campo puede constituirse en una herramienta complementaria que contribuya a incrementar la precisión en imágenes satelitales sobre la respuesta espectral de superficies con rastrojos.

Se postula que:

La caracterización de la “condición de suelo desnudo” en los sistemas de cultivo conservacionistas es un instrumento que permite mejorar la estimación de propiedades de suelo a partir de imágenes satelitales.

1.5.1 Objetivo general

Mejorar la precisión en la estimación de atributos de superficie y de propiedades de suelos desde satélites, caracterizando la “condición de suelo desnudo” en función de su respuesta espectral basada en radiometría de campo.

Para alcanzar este objetivo general se definieron tres objetivos específicos con sus respectivas preguntas de investigación:

1) Caracterizar la respuesta espectral bajo diferentes interacciones entre tipo de rastrojo, proporción de cobertura de rastrojos y propiedades del suelo (**Capítulo 2**).

- ¿Qué rangos espectrales permiten discriminar los diferentes tipos de rastrojos presentes en los sitios bajo estudio?
- ¿En qué regiones del espectro óptico puedo estimar los diferentes tamaños de partículas minerales que componen los suelos en estudio?
- ¿A partir de cuál proporción de cobertura de rastrojos la respuesta espectral es dominada únicamente por las propiedades del suelo?
- ¿Las interacciones entre tipo de rastrojo, proporción de cobertura presente y propiedades del suelo modifican la firma de reflectancia de los atributos y propiedades considerados?

2) Definir la línea de suelos en superficies con rastrojos y analizar su comportamiento ante diversas combinaciones de atributos en diferentes escenarios (**Capítulo 3**).

- ¿En cuál combinación de bandas es factible discriminar suelo desnudo de superficies con rastrojos?

- ¿Cómo afectan las interrelaciones atributos-componentes de suelo el ajuste de la línea de suelos?

3) Evaluar la respuesta en la discriminación de los atributos en estudio mediante imágenes satelitales (**Capítulo 4**).

- ¿Las firmas espectrales de los datos satelitales de superficies agrícolas, tienen un comportamiento similar a las obtenidas con radiometría de campo?
- ¿En qué bandas satelitales es factible obtener información sobre las propiedades de los suelos y en cuáles sobre los rastrojos?
- ¿Incide el tamaño del pixel y el ancho de banda en la discriminación de los atributos a través de formas de absorción?
- ¿En cuáles bandas satelitales es posible definir la línea de suelos?
- ¿Es viable discriminar con datos satelitales, superficies con rastrojo de aquellas con suelo desnudo?

CAPÍTULO 2. Comportamiento espectral de diferentes superficies agrícolas

2.1. Introducción

Una representación gráfica de la reflectancia de un objeto en función de la longitud de onda se denomina “firma espectral” (Lillesand, 2004). La información que brindan las firmas espectrales a través de sus bandas de absorción (o bien de reflectividad) contribuye enormemente en la interpretación de imágenes satelitales. Inicialmente la mayoría de los procedimientos de análisis de imágenes se basan en la extracción de firmas espectrales de sus píxeles. Esta información básica en muchas ocasiones suele vincularse con la brindada en librerías espectrales, haciendo una comparación, entre la curva espectral extraída del pixel con patrones espectrales de suelos existentes en las librerías.

Las librerías espectrales de suelos derivadas de mediciones radiométricas podrían constituirse en una sólida base para la nueva generación de sensores satelitales hiperespectrales que se dispondrá en años inmediatos, debido a que permitirían una validación apropiada de estos datos orbitales (Nocita et al. 2015). El creciente número de librerías espectrales a través del mundo refleja la importancia que ha adquirido la espectroscopía en la ciencia del suelo. Entre algunas librerías a nivel de países y de continentes, se señalan a modo de ejemplo, la librería mundial, con perfiles de suelos de cincuenta y ocho países de cuatro continentes África Asia, Europa y América (Viscarra Rossel et al. 2016). La librería australiana (Lau et al. 2017), de la Unión Europea (Tóth et al. 2013), de China (Shi et al. 2014), de República Checa (Brodský et al. 2011), de Dinamarca (Knadel et al. 2012) y de Brasil (Demattê et al. 2019).

Las librerías espectrales resultan también de gran utilidad para generar modelos predictivos de propiedades de suelos (Viscarra Rossel y Webster, 2012; Peng et al.

2013; Ji et al. 2016; Zhao et al. 2018; Castaldi et al. 2018b; Dangal et al. 2019; Ng et al. 2020). Otras áreas de investigación han destacado la utilidad de las librerías espectrales para el mapeo, cuantificación y clasificación de diferentes tipos de suelos (Viscarra Rossel et al. 2016; Teng 2018; Dotto et al. 2019; Dematté 2019; Teng et al. 2020).

Las firmas espectrales de los suelos son inespecíficas debido a la superposición de los espectros de sus distintos componentes y a la variabilidad espacial de sus propiedades (Chabrilat 2019). En sistemas de cultivos conservacionistas la presencia de rastrojos causa cambios en la respuesta espectral de los suelos en comparación a cuando éstos se encuentran desnudos (Serbin et al. 2009).

Debido a que es conocido, que los atributos de superficie de interés en esta tesis en condiciones reales de campo, interactúan de manera diversa como consecuencia del uso y manejo dispar que se ejerce en los lotes agrícolas, surgen los siguientes interrogantes:

¿Qué influencia ejercen en la reflectancia de los suelos, las interacciones existentes entre los atributos de superficie (propiedades de los suelos y características de los rastrojos)?

¿En escenarios agrícolas, bajo sistemas de cultivos conservacionistas, en cuáles regiones del espectro óptico es factible discriminar los atributos de superficie?

¿Cómo incide en la reflectancia, la proporción, tipo, y humedad del rastrojo, presentes en una escena?

¿En estas escenas complejas, bajo qué proporción de cobertura de rastrojo es factible observar la respuesta espectral exclusivamente aportada por las propiedades del suelo?

En este capítulo se intenta responder a estas cuestiones a través de la realización de mediciones radiométricas en diferentes escenarios de campo, para posteriormente

obtener medidas de las formas de absorción en las firmas adquiridas. Luego, esta información lograda, se vinculará con los atributos de superficie aquí considerados (Ítem 2.2.4).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Área de estudio

En el partido de Azul, con clima templado-húmedo y lluvias medias de 930 mm/año (SMN), el 65 % de la superficie comprende tierras que en su mayoría presentan limitaciones por exceso hídrico y/o alcalinidad. El 35 % restante (alrededor de 200.000 has) alcanza tierras con aptitud agrícola variable. El partido posee gran diversidad físico-geográfica reconociéndose seis ambientes a nivel semidetallado (Piscitelli y Sfeir, 2004) (Fig. 2.1). Uno de los rasgos característicos de estos ambientes es la existencia de un sedimento eólico denominado “Loess” con profundidad variable, que cuando está ausente aflora en la superficie la roca granítica perteneciente al Sistema de Tandilia. Las formas del relieve, las cotas topográficas y los gradientes de las pendientes, constituyen los rasgos fundamentales de diferenciación entre estos ambientes. En términos generales se da una disminución paulatina en cuanto a la variabilidad de formas del relieve, de cotas topográficas y de gradientes de pendientes, a medida que se transcurre por los ambientes desde el Serrano, hacia el Periserrano, Ondulado de Pie de Monte, hasta la Planicie Suavemente Ondulada.

Cuatro de estos ambientes físico-geográficos tienen aptitud predominantemente agrícola (Fig.2.1). Los sitios experimentales se ubicaron en dos de éstos, los ambientes “Serrano” y “Planicie suavemente ondulada”. El primero, es fuertemente ondulado con lomas convexas o bien convexo-cóncavas, los gradientes de pendientes varían entre 4 % y 15 %. Las mayores cotas se dan alrededor de 350 msnm La “Planicie suavemente ondulada”, se caracteriza por lomas suaves, con gradientes de pendiente menores al 1%

alternando con geformas de cubetas y/o vaguadas. Las cotas están alrededor de 150 msnm.

Esta diversidad física está estrechamente vinculada con el funcionamiento de los suelos. Entre los suelos de aptitud agrícola dominan los Molisoles, con grandes grupos y subgrupos como Argiudoles típicos, Argiudoles cálcicos y Argiudoles con horizontes petrocálcicos.

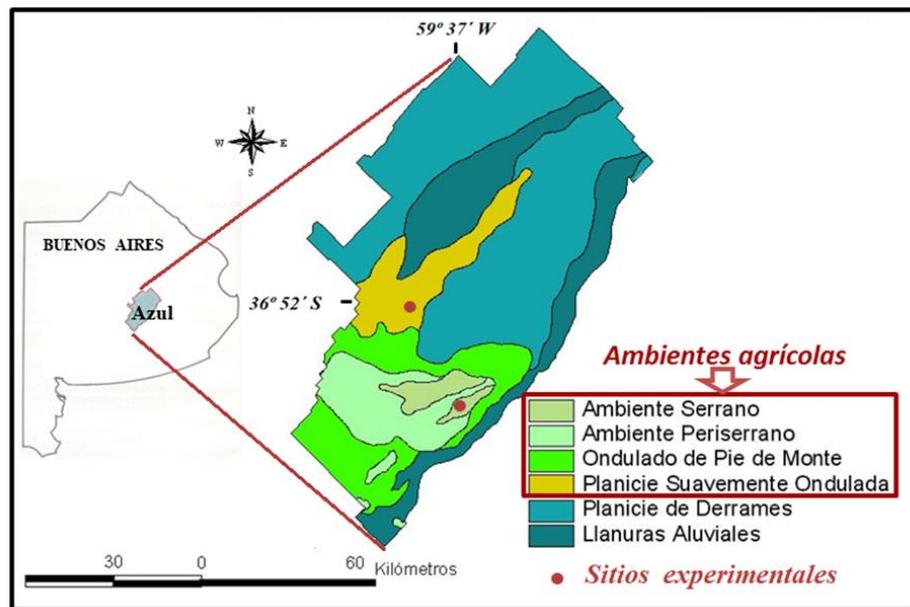


FIGURA 2.1. Ubicación de los sitios experimentales.

2.2.2. Los sitios de medición

Las mediciones se realizaron sobre 8 transectas ubicadas en puntos representativos de 3 lotes agrícolas diferentes. Los lotes fueron seleccionados considerando lo siguiente:

a. Representatividad de las condiciones existentes en el momento “final de barbecho-pre-siembra”. Esta etapa suele mostrar situaciones como rastrojo no uniforme por pastoreo, presencia de malezas, presencia de plantas espontáneas del cultivo anterior, variabilidad de humedad en el suelo. A estas cuestiones se adicionó la tipología de los suelos (rasgos morfológicos y funcionales).

b. Semejanzas en cuanto a sistema de cultivo (siembra directa).

c. Por último, no menos relevante, la posibilidad y voluntad de propietarios que permitieran acceder a los lotes, medir y extraer muestras.

En consecuencia los tres lotes seleccionados tuvieron distinta composición de coberturas (Fig. 2.5, Cuadro 2.2, Fig. 2.6, Cuadro 2.3 y Fig. 2.7, Cuadro 2.4), diferencias en el manejo del barbecho (Ítem 2.3.1) y en las características fisiográficas que se describen a continuación.

Dos de las transectas se ubicaron sobre dos lotes diferentes del ambiente “Serrano”. Una en un lote con rastrojo de soja, en posición de loma con $< 0,5$ % de gradiente de pendiente. El suelo allí descrito fue clasificado como Argiudol cálcico, con un horizonte BC2k a 85 cm - +110 cm. Otra transecta, sobre un lote con rastrojo de maíz, en posición de media loma alta, con < 1 % de pendiente, el suelo Argiudol típico, profundo, fue descrito hasta 1,20 m. Las seis transectas restantes, con rastrojo de soja, se establecieron en un mismo lote, totalmente plano, casi a nivel, del ambiente “Planicie suavemente ondulada”. El suelo descrito fue un Argiudol petrocálcico con un horizonte 2Ckm a 60 cm.

El **diseño** de medición en transecta permitió cuantificar a escala muy detallada la variabilidad existente tanto en cobertura y propiedades de suelo, como en radiometría. En la implementación de este diseño a campo se consideraron criterios sugeridos por Daughtry et al. 1982, Ben Dor 2002, Aguilar et al 2012, Ramírez-López et al. 2013, Viscarra Rossel et al. 2016.

Todas las adquisiciones (**radiométricas, de cobertura y de suelos**) se realizaron en forma simultánea a campo (Fig. 2.2 y 2.3) en el momento de descanso entre cultivos (barbecho) e inmediato a la siembra de cultivo de verano, bajo sistema de siembra directa.

2.2.3 Diseño y distribución de las mediciones

Las dos transectas ubicadas en dos lotes diferentes en el ambiente Serrano se midieron el mismo día, 30 de octubre 2014. Cada transecta tuvo 100 metros de longitud, determinando sobre la misma un total de 34 puntos de medición en el lote con rastrojo de soja, y de 33 puntos en el lote con rastrojo de maíz (Fig.2.2). Las 6 transectas restantes ubicadas en un lote del ambiente de Planicie Suavemente Ondulada, se midieron el día 16 de noviembre 2017. Se dispusieron dos grupos de transectas, cada uno con diferente distanciamiento y número de mediciones. En las transectas “T1” y “T4” se midieron 11 puntos en cada una, distanciados a 3 metros. En las transectas “T2”, “T3”, “T5” y “T6”, 12 puntos, distanciados a 2,7 metros (Fig. 2.3). En total se obtuvieron 70 mediciones sobre las mismas.

La disposición de las transectas buscó que las mediciones se realizaran en áreas homogéneas y representativas de cada lote. Esto, fundamentalmente determinó variaciones en la longitud y espaciamiento entre puntos de medición en las transectas del año 2017. Estas variaciones entre los dos grupos de transectas del año 2017 (Fig.2.3) se debieron a la existencia de muchos sectores en el lote con rastrojo amontonado, producto de un manejo inadecuado por dificultades climáticas.

En ambos años, sobre el total de las transectas, se obtuvieron 137 mediciones radiométricas, cada una, geo-referenciada.

Adicionalmente se realizaron en el mismo lote del año 2017, dos mediciones radiométricas como “**firmas de referencia**”, una de suelo 100 % desnudo, y la otra de 100 % de rastrojo de soja (S2017 SD y S2017 RP, respectivamente). En el año 2013 se adquirió una firma de referencia de 100 % de rastrojo de maíz en superficie (M2013 RP).

En cada punto de medición se hicieron 5 adquisiciones radiométricas (repeticiones) *in situ* (Fig. 2.2 y 2.3, punto negro). Los parámetros de suelo se

muestraron en cada punto de medición con calador. Dos repeticiones para humedad de suelo y de rastrojo, y dos muestras compuestas para materia orgánica y textura (Fig.2.2 y 2.3, puntos rojos). La descripción y proporción de cobertura se midió en cada punto de la transecta empleando el método de la cinta (Laflén 1981) (Fig.2.2 y 2.3, líneas horizontales).

Se denominarán S2014 y S2017 las transectas con rastrojo de soja, medidas en los años 2014 y 2017 respectivamente, y M2014 a la transecta con rastrojo de maíz (año 2014).

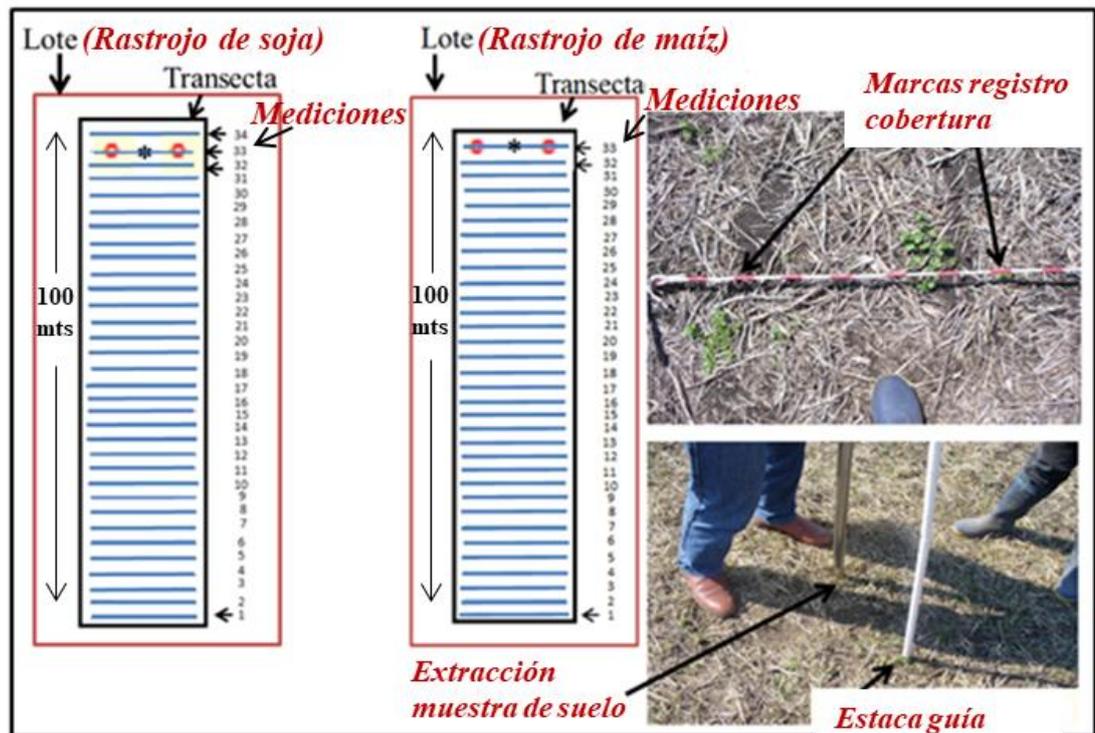


FIGURA 2.2. Esquema de medición en transectas S2014 y M2014. Izquierda: líneas en cada transecta ubican posición de la cinta para medir cobertura. Puntos rojos: donde se extrajeron las muestras de suelo y rastrojo. Punto negro: donde se hicieron las adquisiciones radiométricas. A la derecha, foto superior, las señales rojas en la cinta indican los puntos donde describir, y registrar presencia o no de cobertura. Foto inferior: estaca guía de puntos de medición y de extracción de muestras de suelo con calador.

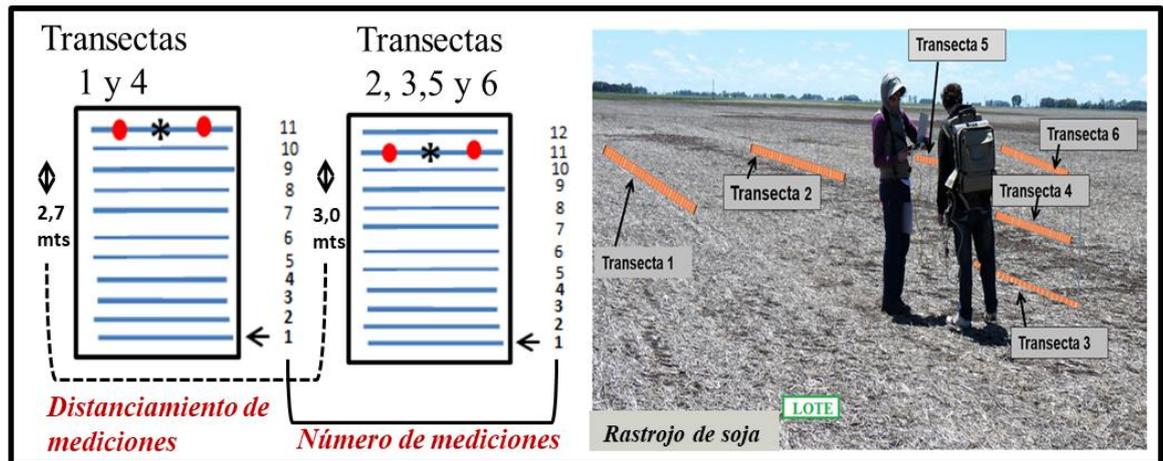


FIGURA 2.3. Esquema de medición en transecta con rastrojo de soja (S2017). Izquierda: detalle de los dos grupos de transectas con las marcas internas descritas en la figura 2.2. A la derecha distribución de las transectas en el lote.

2.2.4. Métodos:

➤ **Adquisición de datos radiométricos a campo:** se siguieron procedimientos propuestos por Jackson et al. 1980, Daughtry et al. 1982 y CONAE Argentina, Convenio entre Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos-FAA-UNCPBA y Comisión Nacional de Actividades Espaciales (Fig.2.4).

Se utilizó un espectroradiómetro de campo “ASDFieldSpec Pro FR” con Error absoluto = 1 %, rango espectral de 350 a 2500 nm de longitud de onda con intervalos de 1 nm, y FOV= 25°. Calibrado por Malvern Panalytical y por CONAE. En todas las mediciones se empleó el mismo tiempo de integración, de 17 milisegundos.

Se realizaron las indicaciones siguientes, recomendables para disminuir fuentes de error en la adquisición del dato radiométrico (Fig. 2.4):

- Se tomaron los datos en **condiciones ambientales** libres de nubosidad y en una franja horaria en la cual el ángulo de elevación del sol fuera superior a 45°. Dado que el ángulo de elevación varía de acuerdo a la latitud y época del año, esta última información se obtuvo en la página <https://www.sunearthtools.com/>. La hora en la cual se hicieron las mediciones se indica en el Cuadro 2.3.

- Se calculó la **altura del radiómetro** de manera que el ángulo de visión del mismo cubriera un área representativa de la escena (diámetro de FOV = δ). La relación que existe entre la altura del sensor, el δ y el FOV, está dada por la siguiente ecuación (Jackson, 1980):

$$\delta = 2h \tan (\Theta/2) \quad (\text{donde: } h \text{ es la altura del radiómetro})$$

Θ es el FOV del radiómetro)

Tanto la altura del rastrojo, como su posición en el lote (caído o en pie), y la distancia entre hileras, fueron los factores considerados al momento de establecer el diámetro de FOV. Si no se hubiese modificado la altura del sensor en las diferentes transectas de medición se hubieran generado fuertes sesgos en las mediciones. El coeficiente de variación de la reflectancia disminuye exponencialmente cuando la altura del sensor aumenta acorde a cada condición del cultivo (Daughtry et al. 1982). En ambas transectas con rastrojo de soja (S2014 y S2017) el diámetro de FOV (δ) se ajustó considerando la diversidad y rugosidad existente en cada cobertura (Fig.2.5 y 2.7 y Cuadros 2.2 y 2.4). En el rastrojo de maíz (M2014) para este ajuste se consideró la altura del rastrojo en pie y cubrir el distanciamiento entre 4 hileras de maíz (Fig.2.6 y Cuadro 2.3). En M2014 y S2014 la fibra óptica se montó en una lanza y el operador se ubicó en la cúpula de una camioneta (Fig.2.4). En S2017 la fibra óptica se sostuvo en mano y se midió punto por punto a pie (Fig.2.3). En el Cuadro 2.1 se detallan los diámetros de FOV y altura del sensor, tenidos en cuenta en cada transecta.

TRANSECTA	ALTURA RASTROJO	DISTANCIA ENTRE HILERAS	POSICIÓN RASTROJO	ALTURA RADIÓMETRO (m)	DIÁMETRO DE FOV (m)
M2014	45 cm	42 cm	En pie /echado	3,20	1,42
S2014	-	-	Echado	2,70	1,20
S2017	-	-	Echado	1,60	0,70

CUADRO 2.1. Altura del radiómetro en cada transecta. S2014 y S2017 transectas con rastrojo de soja correspondientes a los años 2014 y 2017 respectivamente. M2014 transecta medida en el año 2014 con rastrojo de maíz.

- El procedimiento de **calibración** permite que sea posible convertir el dato digital obtenido (DN) en alguna variable física (radiancia o reflectancia). La precisión empleada en este proceso incide en la calidad de la variable a obtener. Las mediciones de **reflectancia absoluta** requieren de un sistema de medición reconocido internacionalmente bajo condiciones ambientales controladas, como por ejemplo una “esfera de integración”. Dado que a campo este procedimiento no es ejecutable, se considera apropiado obtener la reflectancia relativa. La precisión en estas adquisiciones se asegura mediante, la calibración del instrumento, y eliminando las diferencias entre dos mediciones obtenidas cuando éstas son divididas (Schaepman 1998). Para este fin se emplea un panel calibrado, de reflectancia casi 100% difusa (“Spectralon” ®). La fuente que se empleó tiene una superficie de 0,62 cm². La energía reflejada por la superficie de suelo, se relacionó con la energía entrante (medición sobre Spectralon), computándose como “**reflectancia relativa**”.
- En cada punto de medición se tomaron 5 réplicas (tanto del objeto como del Espectralón), luego se obtuvo la mediana como dato radiométrico.
- En el lote con rastrojo en pie se consideró orientar las mediciones según la estructura del cultivo reciente.

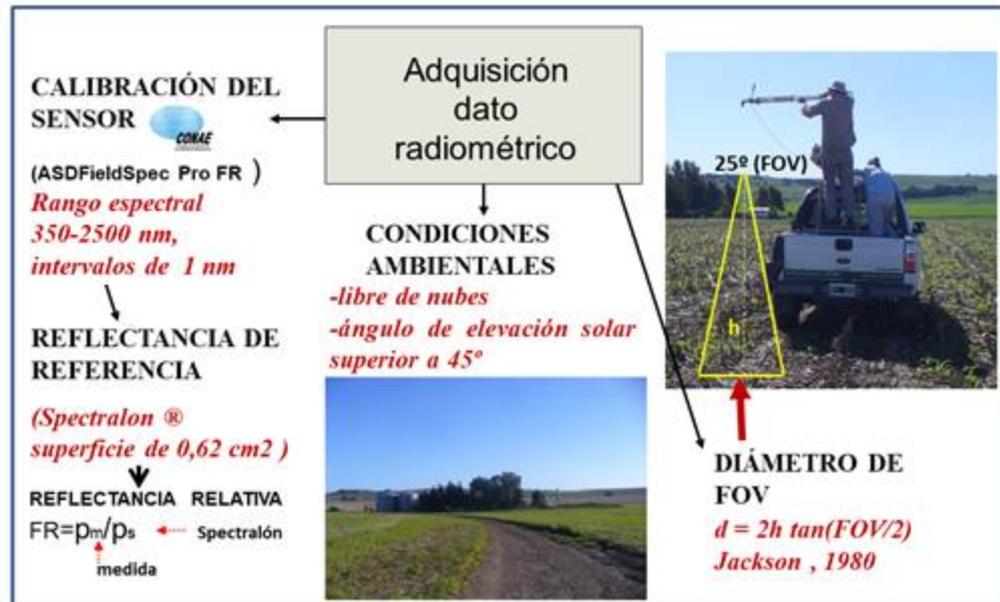


FIGURA 2.4. Protocolo de adquisición de los datos radiométricos.

➤ **Adquisición de los atributos:** dentro de la distancia que abarcaba el δ se tomaron muestras y también mediciones *in situ*. Se emplearon métodos estandarizados que se mencionan a continuación:

– **Rastrojo:**

- Cobertura (PCT): fue descrita a campo y cada componente llevado a porcentaje acorde a los procedimientos planteados por Laflén et al. 1981 (Método de la cinta).
- Humedad del rastrojo (HR): los residuos fueron secados en cámara climatizada a 70 °C hasta constancia de peso seco.

– **Propiedades de suelo:**

- Humedad Gravimétrica (HS): “Método Gravimétrico”, Gardner 1986.
- Textura: “Método del Hidrómetro”, Bouyoucos 1962.
- MO: “Determinación de Carbono Orgánico Oxidable por mezcla Oxidante Fuerte” en concordancia a IRAM-SAGyP29571- 2: 2011.
- Gradiente de pendiente: algunos gradientes se midieron con clinómetro y otros con nivel óptico.

- Profundidad muestras de suelo: con calador a 2 cm.

➤ **Obtención de medidas en las firmas espectrales:**

Espectralmente una muestra de suelo consiste de una diversidad de cromóforos cuyas formas de absorción, en algunos casos, se superponen. El tamaño de longitud de onda en el infrarrojo es semejante al de algunas partículas minerales del suelo. Esto ocasiona efectos de *scattering* indeseados y de no-linealidad que influyen en la reflectancia registrada (Rinnan et al., 2009). Si a lo anterior se suma el *scattering* de los arreglos estructurales de una muestra de suelo no alterada, y el “ruido” (fluctuaciones aleatorias alrededor de la señal, Antón Martínez, 2007), la interpretación de la información espectral sobreviene sumamente compleja. **Físicamente**, las formas de absorción en un espectro tienen dos componentes, el “continuum”, y absorciones individuales. El continuum es la absorción de fondo ("background absorption") sobre el cual otras formas de absorción se superponen (Clark 1999).

Algunas técnicas de preprocesamiento de firmas espectrales pueden eliminar en gran medida los efectos indeseados antes mencionados. Las mayormente utilizadas pueden clasificarse según Agelet 2011; Stevens y Ramírez López, 2014; Chryssikos y Gates, 2017, en: a) De Corrección de scattering: “Multiplicative Scatter Correction” (MSC) y “Standard Normal Variate” (SNV). b) Para Eliminación de efectos aditivos de superposición de formas de absorción: “Derivadas”, “Savitzky Golay” y “Continuum removal”. c) Como Filtros estadísticos para remover “ruido”: “Smoothing” y “Binning”. Pero por otro lado, la aplicación de estas técnicas puede producir pérdida de información. Según Mc Craig 2017, es importante alterar lo menos posible las firmas espectrales, en especial cuando no se conoce la respuesta espectral de un objeto.

La técnica de remover el continuum (Continuum removal) aísla las formas de absorción y pone a éstas en igualdad de condiciones (por ej. corrige corrimientos de

bandas) de manera que puedan ser comparadas (Clark 1999). Es una herramienta robusta, empleada en espectroscopía, que además de aislar formas específicas contribuye a que se puedan derivar medidas de éstas y así, vincularlas a los componentes responsables de la absorción (Mc Craig et al., 2017).

El proceso del método aquí empleado requiere, en un primer paso, remover el continuo para luego medir las absorciones. En cada paso se ajustan **diferentes “Curvas Empíricas”** apoyadas en funciones polinomiales de 3° orden (Empirical curve fitting). Básicamente diferentes funciones polinomiales de 3° orden son empleadas tanto para, preliminarmente remover el continuo, como luego para obtener medidas sobre la absorción aislada.

Este método ha sido ampliamente empleado en espectroscopía desde hace más de cuatro décadas. Las funciones matemáticas en las que se fundamenta forman parte de los algoritmos de softwares ampliamente desarrollados en espectroscopía, como el recomendado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Mc Craig et al., 2017 desarrollaron un procedimiento que posibilita la implementación de estas funciones con el software Excel®, disponible en forma libre.

El método y las funciones matemáticas utilizadas están descriptas detalladamente en Mc Craig et al. 2017 quienes además proporcionan un libro en Excel® conteniendo todas las fórmulas, las mismas pueden operarse bajo la manera “copie y pegue” del software. Una secuencia resumida de los pasos seguidos en la ejecución de esta técnica se comenta a continuación.

a) Se **reconocen visualmente** las regiones de absorción.

b) Se **ajusta el rango espectral de cada absorción**, con una ecuación **polinomial de 3° orden**, cuyo ajuste se valora a través del estadístico R^2 . A este análisis se le adiciona una evaluación del “Punto de Inflexión” de la curva que además se

“chequea” gráficamente con el valor del “Cruce por cero” (entre la pendiente y el punto de inflexión). Debe haber coincidencia entre el valor de longitud de onda correspondiente a la banda central con el hallado mediante la polinomial y los obtenidos a través del punto de inflexión y del “Cruce por cero”.

c) Una vez obtenidos estos valores extremos del rango espectral (comienzo y fin de la absorción), **se obtiene el continuo** mediante una interpolación lineal de estos valores.

d) Al valor del continuo se le sustrae el de la reflectancia medida a campo obteniendo así el “**continuo removido**”. Se reconocen visualmente los extremos de la región de absorción sobre el continuo removido obtenido. Estos datos se verifican mediante el ajuste con una ecuación polinomial de 3° orden, evaluándolo a través del estadístico R^2 , y verificando los valores obtenidos mediante el Punto de inflexión de la función y la representación gráfica del Cruce por cero. Estos valores obtenidos van a corresponder a la longitud de onda de la **banda central** de la absorción del continuo removido, sobre la cual se mide la **profundidad de absorción**.

La metodología empleada para remover el continuo se denomina “Método de la línea segmentada” (Straight-line continuum). Se empleó el mismo porque asegura que bandas de absorción muy pequeñas puedan ser identificadas. Otro método que se utiliza para definir y remover el continuo es el del “Polígono convexo” (Convex Hull) que usa los valores máximos de reflectancia como puntos fijos para crear el continuum. Este método permite identificar grandes rangos o bandas. Se recomienda su utilización cuando la región de absorción de un componente es prefijada y no se requiere explorar pequeñas absorciones dentro de una región determinada (Lehnert et al. 2019).

Las **medidas** obtenidas fueron definidas según Mc Craig et al. 2017 como:

- “Región de absorción”, determinada por las posiciones que definen la absorción en relación a los valores de máxima y mínima longitud de onda en el espectro.
 - “Banda central”, señala la posición de longitud de onda de la reflectancia más baja sobre un intervalo específico y luego que algún tipo de remoción del continuo se haya realizado.
 - “Profundidad de absorción”, medida sobre la banda central de la absorción y expresada en % de reflectancia.
- **Vinculación de las medidas obtenidas en las firmas espectrales con los atributos de superficie:** Se empleó la técnica de “Análisis de Componentes Principales” utilizando el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al. 2008). En espectrometría los componentes del suelo tienden a estar fuertemente correlacionados debido a que existe alta coincidencia en sus bandas de absorción. Esta inespecificidad de los diferentes constituyentes puede ser explicada mediante análisis multivariados, siendo de gran utilidad la técnica de análisis de componentes principales (ACP) (Wold et al.1984).
- **Procesamiento de los datos radiométricos:** los gráficos de firmas espectrales y sus estadísticos se realizaron con el software R (<https://cran.r-project.org>), paquetes ggplot2 y prospectr.

2.3 Resultados

2.3.1. Descripción de las coberturas en las transectas:

El sistema de manejo y las rotaciones efectuadas en los tres lotes sobre los cuales se hicieron las mediciones en transectas fueron diferentes, determinando coberturas de rastrojos diversas. El método de Laflén, mencionado en la sección 2.2.4, permitió detectar la variabilidad de cobertura existente en las tres transectas tanto en

tipos de rastrojos presentes, como en proporción total de cobertura (PCT) sobre cada punto de medición (Cuadros 2.2, 2.3 y 2.4). Los resultados obtenidos mediante la aplicación de este método, determinaron cinco categorías diferentes de PCT para S2014 (Cuadro.2.2) y para M2014 (Cuadro.2.3), y seis categorías diferentes para S2017 (Cuadro.2.4).

En el lote donde se midió la transecta S2014, el manejo fue conservacionista dejando el rastrojo de los cultivos anteriores en la superficie. El rastrojo más reciente corresponde a un cultivo de soja de 2º sembrado sobre rastrojo de cebada, teniendo éste un rastrojo de maíz como antecesor. Todos éstos coexistían en la superficie en el momento de la medición y se encontraban echados sobre la superficie (Fig.2.5). En el Cuadro 2.2 se detallan las proporciones de estos componentes, referidos a la cobertura total (PCT) medida en cada punto, mostrando la diversidad y variabilidad de proporciones de los rastrojos presentes en la misma. En el lote donde se midió la transecta M2014, el rastrojo reciente corresponde a un cultivo de maíz sembrado sobre soja de 2º. El rastrojo de maíz fue pastoreado durante el barbecho, 4 días antes de las mediciones se fumigó con el propósito de eliminar el cultivo espontáneo existente. El rastrojo se encontraba tanto en pie como caído sobre la superficie (Fig.2.6). En el Cuadro 2.3 se indica la proporción de cobertura total (PCT) en cada punto de medición. La composición revela dominancia de rastrojo de maíz existiendo baja proporción de cultivo espontáneo, los valores de ambos tipos están referidos en relación porcentual del PCT.

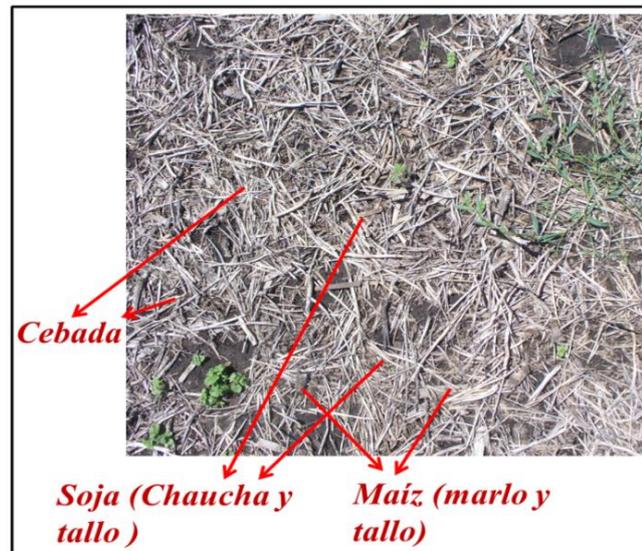


FIGURA 2.5. Vista de la cobertura de rastrojos en la transecta S2014.

PUNTO S2014	PCT %	RS %	RC %	RM %	MALEZAS %	PUNTO S2014	PCT %	RS %	RC %	RM %	MALEZAS %
P17	90	30	60	10	-	P3	60	17	32	34	17
P18	90	33,3	44,5	11,1	11,1	P10	60	67	33	-	-
P5	80	25	50	25	-	P15	60	-	50	50	-
P9	80	25	50	12,5	-	P21	60	83	17	-	-
P11	80	25	37,5	25	12,5	P25	60	33	67	-	-
P12	80	25	62,5	-	-	P26	60	33	50	-	17
P16	80	37,5	50	12,5	-	P32	60	50	50	-	-
P2	70	86	-	-	14	P7	50	60	20	20	-
P13	70	29	71	-	-	P19	50	20	60	20	-
P8	70	14	72	14	-	P20	50	60	20	20	-
P4	70	71	29	-	-	P24	50	20	80	-	-
P22	70	14	43	43	-	P23	50	-	60	20	20
P29	70	-	100	-	-	P34	40	25	50	-	25
P6	70	43	43	14	-	P33	40	25	50	-	25
P31	70	29	14	-	57	P34	40	25	50	-	25
P28	70	14,5	57	-	28,5	P33	40	25	50	-	25
P30	70	72	-	14	14	P14	30	66,6	-	33,3	-
P1	60	100	-	-	-	P27	20	-	50	-	50

CUADRO 2.2. Proporción de los componentes de la cobertura en la transecta S2014. PCT: Porcentaje de cobertura total medido en cada punto. En columnas RS, RC, RM y Malezas, proporción porcentual en cada punto, de rastrojo de soja, cebada, maíz y malezas, respectivamente.

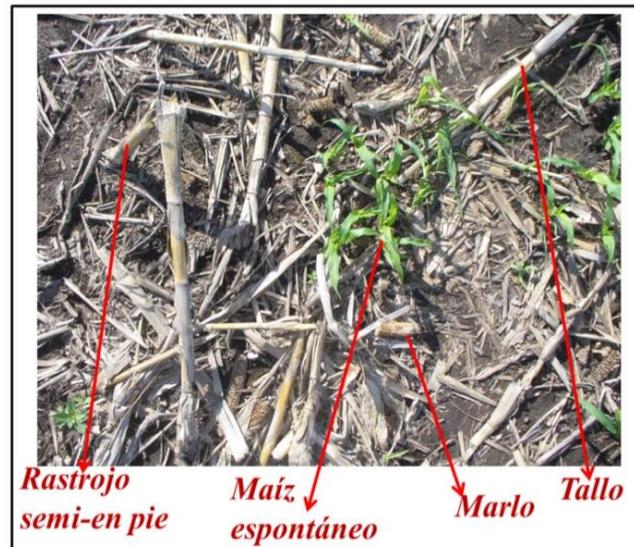


FIGURA 2.6. Vista de la cobertura de rastrojos en la transecta M2014.

PUNTO M2014	PCT %	RM %	CE %	PUNTO M2014	PCT %	RM %	CE %
P15	87	100	-	P6	60	89	11
P25	87	85	15	P7	60	89	11
P8	80	100	-	P10	60	100	-
P23	80	100	-	P11	60	89	11
P28	80	100	-	P12	60	100	-
P3	73	100	-	P13	60	89	11
P14	73	100	-	P31	60	100	-
P16	73	100	-	P2	53	100	-
P19	73	100	-	P5	53	87,5	12,5
P20	73	100	-	P9	53	100	-
P21	73	82	18	P18	53	100	-
P27	73	100	-	P24	53	87,5	12,5
P33	73	100	-	P29	53	100	-
P1	67	100	-	P17	47	100	-
P22	67	100	-	P4	40	100	-
P26	67	100	-	P32	40	100	-
P30	67	100	-				

CUADRO 2.3. Proporción de los componentes de la cobertura en la transecta M2014. PCT: Porcentaje de cobertura total medido en cada punto. RM y CE, proporción porcentual en cada punto, de rastrojo de maíz y de cultivo espontáneo, respectivamente.

En el lote donde se midió la transecta S2017, el rastrojo existente pertenecía a un cultivo de soja de 2º sembrado sobre trigo como antecesor. Fue fumigado durante todo el período de barbecho hasta 10 días antes del momento de las mediciones. El residuo se encontraba caído sobre la superficie, libre de malezas y plantas espontáneas (Fig.2.8). En el Cuadro 2.4 se aprecia homogeneidad en cuanto al tipo de residuos presentes en esta cobertura., sólo constituida por rastrojo de soja, no registrándose restos del cultivo antecesor (trigo).



FIGURA 2.7. Vista de la cobertura de rastrojos en la transecta S2017.

PUNTO S2017	PCT %	RS %	PUNTO S2017	PCT %	RS %	PUNTO S2017	PCT %	RS %
P19	87,5	100	P47	62,5	100	P68	50	100
410	87,5	100	P59	62,5	100	P612	50	100
49	87,5	100	P512	62,5	100	P18	37,5	100
P13	75	100	P610	62,5	100	P111	37,5	100
P14	75	100	P11	50	100	P21	37,5	100
P15	75	100	P16	50	100	P23	37,5	100
P17	75	100	P29	50	100	P26	37,5	100
P110	75	100	P212	50	100	P27	37,5	100
P25	75	100	P39	50	100	P36	37,5	100
P31	75	100	P310	50	100	P38	37,5	100
P32	75	100	P41	50	100	P48	37,5	100
P33	75	100	P45	50	100	P57	37,5	100
P34	75	100	P411	50	100	P510	37,5	100
P37	75	100	P51	50	100	P61	37,5	100
P42	75	100	P52	50	100	P63	37,5	100
P46	75	100	P53	50	100	P64	37,5	100
P66	75	100	P54	50	100	P311	25	100
P67	75	100	P55	50	100	P312	25	100
P69	75	100	P58	50	100	P43	25	100
P12	62,5	100	P511	50	100	P56	25	100
P22	62,5	100	P65	50	100	P62	25	100
P28	62,5	100	P68	50	100	P24	12,5	100
P35	62,5	100	P511	50	100	P210	12,5	100
P44	62,5	100	P65	50	100	P211	12,5	100
						P611	12,5	100

CUADRO 2.4. Proporción de los componentes de la cobertura en la transecta S2017. PCT: Porcentaje de cobertura total medido en cada punto. RS: proporción porcentual de rastrojo de soja.

2.3.2. Variabilidad de los atributos de superficie:

La descripción detallada de los atributos en cada punto medido, aparece en los Cuadros anexos a las figuras con las firmas espectrales respectivas en el apéndice A. El

resumen de los estadísticos descriptivos (Cuadro 2.5), señala que tanto la humedad de suelo (HS), como el porcentaje de cobertura total (PCT) tienen valores promedios similares en las tres transectas. No obstante, el PCT posee coeficientes de variación muy altos en las tres transectas. La humedad del rastrojo (HR) es similar entre las transectas con rastrojo de soja, y muy diferente a la de maíz (>20%).

Atributo	S2017					S2014				
	n	Mínimo %	Media %	Máximo %	CV %	n	Mínimo %	Media %	Máximo %	CV %
PCT	70	12,5	53	90	37,2	34	20	63	90	25,2
HR	140	4,4	5,4	7,7	13,4	68	3,3	6,4	9,0	19,2
HS	140	16,1	20,8	29,6	14,4	68	17,3	22	26,2	10,4
Arcilla	70	24,2	28,5	34,3	9,4	34	15,6	23,1	33,4	23,9
Limo	70	35,6	43,7	51,5	8,8	34	29,4	40,8	47,4	14,9
Arena	70	20,7	27,9	36,2	13,9	34	31,4	36,1	41,6	7,6
MO	70	3,9	4,6	5,8	8,5	34	5,2	6,6	8,4	9,4
M2014										
Atributo	n	Mínimo %	Media %	Máximo %	CV %					
PCT	33	40	64	87	18,9					
HR	66	23,7	28,6	34,9	10,0					
HS	33	12,7	22,4	33,7	19,6					
Arcilla	33	13,6	19,6	22,7	11,52					
Limo	33	34,3	39,9	46,4	9,10					
Arena	33	33,8	40,6	52,2	10,19					
MO	33	4,3	5,7	7,6	14,2					

CUADRO 2.5. Resumen de estadísticos de los atributos medidos en cada transecta. PCT: Porcentaje de cobertura total. HR: Humedad del rastrojo. HS: Humedad de suelo. MO: Materia orgánica. n: número de muestras. CV: Coeficiente de variación.

En todas las transectas existen diferencias tanto en los valores de materia orgánica (MO), (en especial en los valores máximos y mínimos) como en los componentes texturales. La variabilidad de estos últimos se describe en los párrafos siguientes y es graficada en la Fig. 2.8.

En S2017 el 59% de los puntos caen en la clase franco-arcilloso, el 34% en franco y el resto en franco arcillo-limoso y franco-limoso. En S2014 sólo el 24% de los

puntos son franco-arcillosos y el resto (76%) Francos. En M2014, casi todos los puntos (97%) son Franco y sólo 3% es Franco arenoso.

La concentración de puntos en cada rango de tamaño de partículas es diferente. En S2017, hay mayor proporción de puntos (26/41) con porcentajes de limo superiores al 45%. En S2014 es mucho menor la cantidad de puntos (9/34 puntos) que supera esta proporción y en M2014 menor aún (5/33 puntos).

Con relación a la arcilla todos las observaciones de S2017 tienen una proporción superior al 24 %, en S2014 sólo 10 puntos superan este porcentaje y en M2014 todos los puntos tienen < del 23 % de arcilla.

Todos los puntos de M2014 tienen más del 34 % de arena. S2014 tiene una considerable cantidad de puntos (24/34) con esta proporción. En cambio en S2017 sólo 5 puntos tienen >34% de arena. En consecuencia, en S2017 la mayor proporción de puntos tiene los contenidos más altos de limo y arcilla, y M2014 los más altos de arena y los más bajos de arcilla.

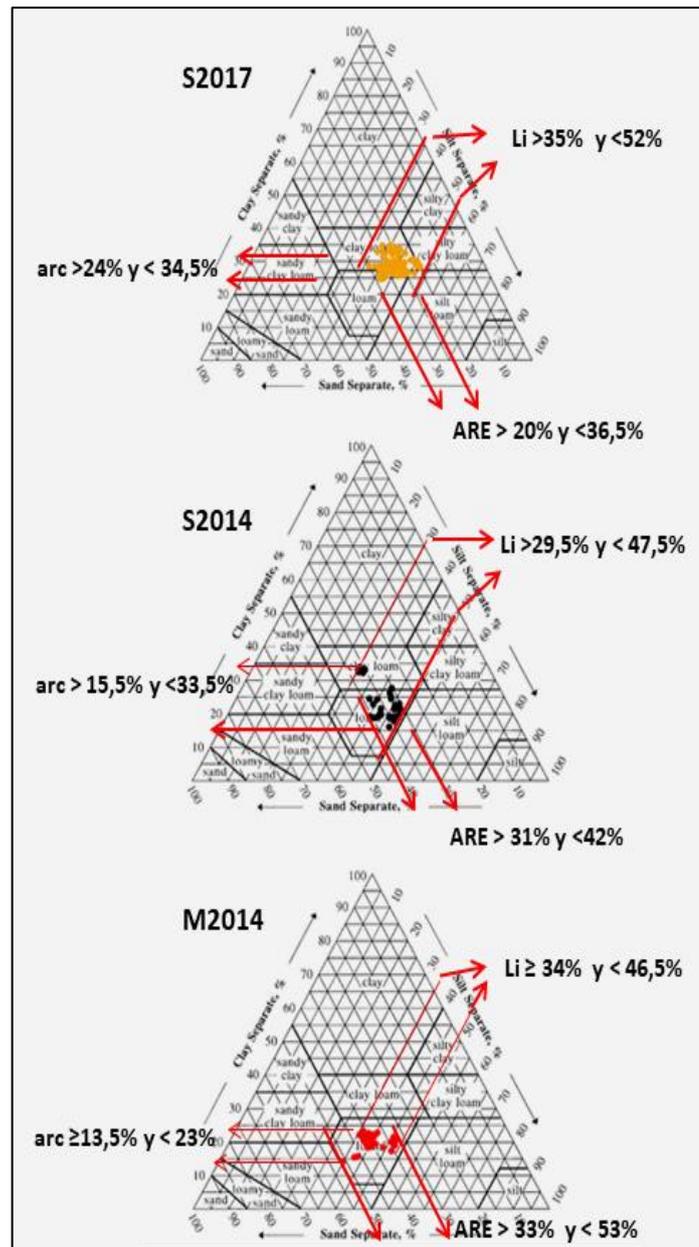


FIGURA 2.8. Dispersión de los diferentes componentes granulométricos en las transectas. Li: limo, arc: arcilla, ARE: arena. S2014 y S2017: transectas con rastrojo de soja años 2014 y 2017 respectivamente. M2014: transecta con rastrojo de maíz.

2.3.3. Análisis de los espectros

2.3.3.1 Firmas adquiridas en igual fecha

Los espectros obtenidos el mismo día (Fig.2.9) muestran “picos ruidosos” entre **1830 nm** y **1930 nm** y alrededor de **1400 nm** y de **750 nm** como consecuencia de una baja relación señal/ruido. La atenuación de señal es causada tanto por la absorción de

vapor de agua de la atmósfera como por la humedad de la escena (Lobell y Asner 2002, Chavda 2005).

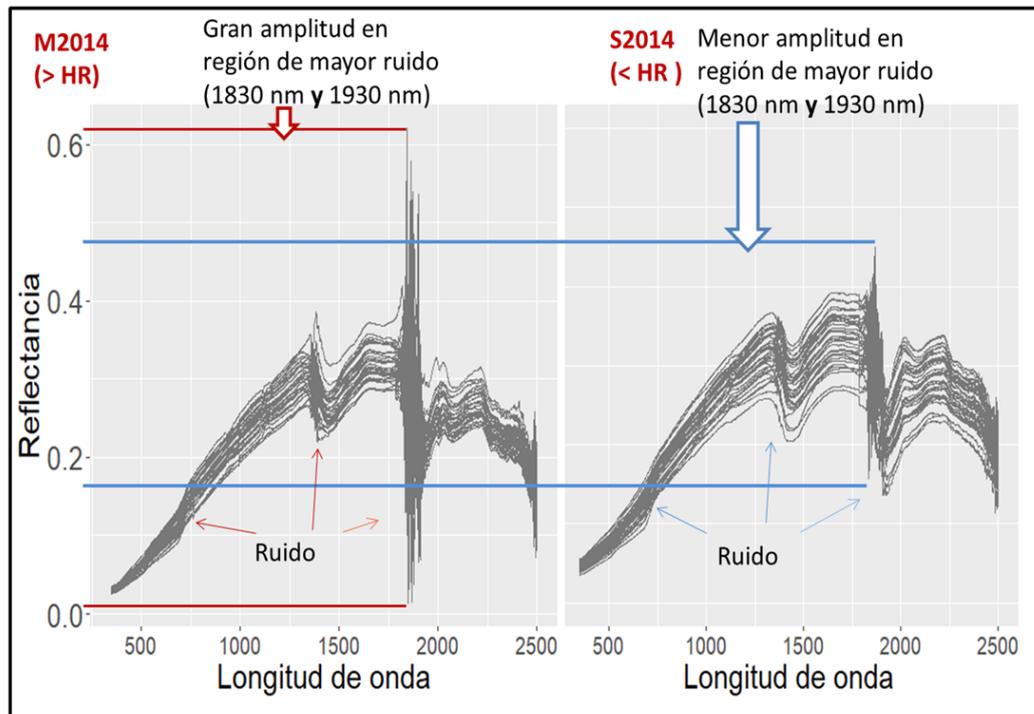


FIGURA 2.9. Espectros obtenidos el 30 de octubre de 2014. HR: humedad del rastrojo. M2014: transecta con rastrojo de maíz. S2014: transecta con rastrojo de soja.

En el Cuadro 2.6 se indican los parámetros meteorológicos (sugeridos por Daughtry et al. 1980) obtenidos al momento de efectuar las mediciones en las tres transectas. Las diferencias entre los datos climáticos de S2014 y M2014, se consideran despreciables en el lapso de medición de las adquisiciones realizadas el mismo día. Los valores medios de humedad de suelo, como se comentó anteriormente, son similares en ambas escenas, pero los valores medios de humedad del rastrojo muestran diferencias superiores al 20 % (Cuadro 2.5). Las firmas con mayor humedad del rastrojo (M2014) tienen ancho y apreciable amplitud en los “picos ruidosos”, llegando a saturar alrededor de 1830 nm y 1930 nm. Estas diferencias observadas entre ambas transectas evidencian la incidencia superlativa que tiene la humedad del rastrojo en superficies agrícolas sobre la respuesta espectral en estas regiones del óptico.

TRANSECTA y FECHA DE TOMA	HORA DE TOMA (hs)	TEMP (°C) *	HR (%) *	HA (kg/m ³) ^	PRESIÓN (hPa)	RADIACIÓN (W/m ²)	VIENTO (m/s)
S2014 37° 06' 58" S 59° 42' 34" W 30/10/14	11	13,3	92	0.0106574	976,8	568	1,4
	12	16,8	63	0.0090288	977,6	585	0,2
M2014 37° 07' 06" S 59° 40' 01" W 30/10/14	15	24,3	38	0.0084285	998,1	631	0,8
S2017 36° 51' 51" S 59° 53' 40" W 16/11/17	11	12,1	100	-	997,4	884	2,8
	12	14,1	90	-	997,6	876	4,1
	13	15,4	84	-	997,3	895	6,3

* Temperatura y humedad relativa medidas en casilla meteorológica.

^ Humedad Absoluta estimada.

CUADRO 2.6. Condiciones meteorológicas en los sitios medidos. Datos de la red meteorológica (CRAGM 2019. Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía. U.N.C.P.B.A).

2.3.3.2 Mediciones en las firmas espectrales adquiridas

En las firmas de las tres transectas se realizó un análisis basado en: a) El **reconocimiento visual preliminar** de formas de absorción. b) La **obtención de las posiciones** en el espectro (**máxima y mínima longitud de onda**) que definen la **“Región de absorción”**. c) La **profundidad de absorción**, medida en porcentaje de reflectancia y referida a la banda central. d) El valor de la **banda central**. Para este fin, se dividió todo el espectro adquirido en dos regiones, una, entre 350 nm y 1800 nm, y otra entre 1950 nm y 2400 nm, eliminándose las bandas de mayor ruido (entre 1800 nm y 1950 nm y el tramo de 2400 a 2500 nm).

2.3.3.2.1 Región entre 1950 nm y 2400 nm

- Espectros de referencia

En la Fig. 2.10 a y b se señalan las formas y regiones de absorción medidas en cada una de las firmas de referencia representativas de coberturas de rastrojo puras. Como se describe en el ítem 2.2.3 ambas firmas fueron obtenidas en superficies con “cobertura total” (100% PCT) de rastrojos, una sobre rastrojo de soja (S2017 RP) y otra sobre rastrojo de maíz (M2013 RP). En la Fig. 2.10 c se señalan las regiones y formas

de absorción de la firma de referencia de suelo totalmente desnudo (S2017 SD) (Ítem 2.2.3 de este capítulo).

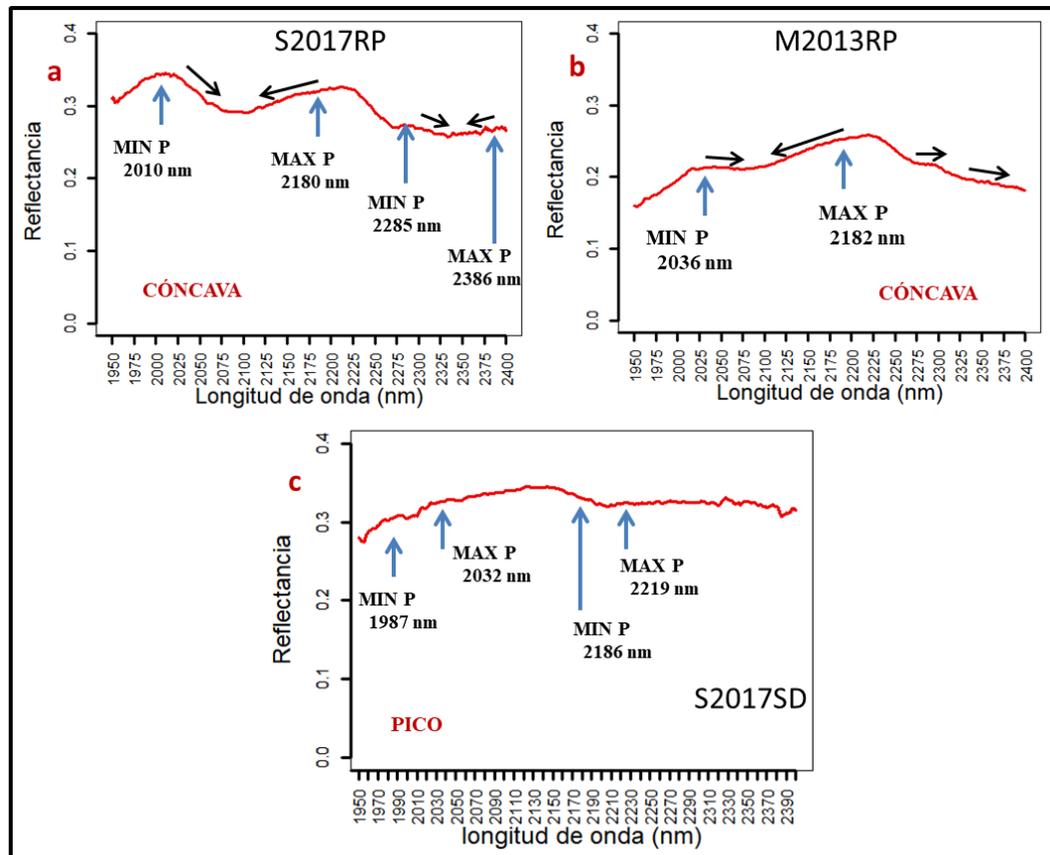


FIGURA 2.10. Posiciones en el espectro y formas de absorción entre 1950 nm y 2400 nm en las firmas de referencia. M2013RP: rastrojo puro de maíz. S2017RP: rastrojo puro de soja. S2017SD: suelo desnudo. Mín. P: Mínima posición y Máx P: máxima posición de cada región de absorción.

En el rastrojo puro de soja (Fig.2.10 a) se observan dos regiones de absorción, cóncavas y evidentes, cuyas posiciones y profundidades se dan en el Cuadro 2.7. En el rastrojo puro de maíz (Fig.2.10 b) aparece sólo una región de absorción cóncava cuyas posiciones difieren entre 26 nm (en mínima posición) y 2 nm (en máxima posición) (Cuadro 2.7). En esta cobertura, aproximadamente entre 2270 nm y 2300 nm la forma de la firma presenta una tendencia plana, y entre 2300 nm y 2400 nm la firma tiene una pendiente negativa, diferenciándose del rastrojo de soja. En suelo desnudo (Fig.2.10 c) no hay absorción en las bandas antes citadas, sí se observan dos regiones muy estrechas y poco profundas (picos), cuyas posiciones y profundidades se dan en el Cuadro 2.7.

	M2013RP		S2017RP				S2017SD			
Región espectral										
	Mín Pos nm	Máx Pos nm								
	2036	2182	2010	2180	2285	2386	1987	2032	2186	2219
R²	98 %	100 %	98 %	100 %	69 %	45 %	97 %	94 %	98 %	77 %
N	146		170		101		45		33	
Profundidad %										
	6,4%		11,9		3,6		2,1		1,7	
Banda Central nm										
	2095		2088		2331		2009		2206	
R²	98 %		98 %		71 %		88 %		95 %	

CUADRO 2.7. Región espectral, profundidad de absorción y banda central en las firmas de referencia. M2013RP: rastrojo puro de maíz, año 2013. S2017RP: rastrojo puro de soja, año 2017. S2017SD: suelo desnudo en transecta de 2017. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros. Mín. Pos y Máx Pos: Mínima y máxima posición de la región de absorción.

- Espectros de las transectas

-“**Región espectral**”: **Posiciones de mínima y máxima longitud de onda en el espectro.**

Dentro de esta región del infrarrojo se midieron las posiciones de mínima y máxima longitud en cuatro formas de absorción reconocidas preliminarmente de manera visual. De estas cuatro formas la región cuyas posiciones extremas están entre **2023 nm** y **2179 nm** es la más amplia. Aparece en las tres transectas con variaciones entre ellas en sus posiciones de mínima y máxima longitud de onda (entre 3 nm y 19 nm) (Cuadro 2.8). La forma (cóncava) es coincidente con las visualizadas en los espectros de referencia de coberturas de rastrojos. S2017 es la transecta con menor número de firmas espectrales con la presencia de esta región cóncava El 64 % del total de los puntos medidos en S2017 presentó absorción en esta región. En S2014 fue algo mayor (74 %), mientras que en M2014 se observó en la totalidad de los puntos medidos (100 %). Si bien la variación dentro de cada transecta en las posiciones que definen la absorción es baja, S2017 tiene la mayor variación (> % CV) (Cuadro 2.8). Las tres transectas

tuvieron, en la totalidad de los puntos medidos (100 %), un alto ajuste ($R^2 > 70\%$) en la determinación de esta absorción (Cuadro 2.8).

Otra región también cóncava aparece sólo en las transectas con rastrojos de soja, al igual que lo observado en las firmas de referencia de coberturas de rastrojos (Fig. 2.10). Las posiciones extremas de la absorción estuvieron entre **2285 nm y 2373 nm**, con menores variaciones dentro de las transectas en estas posiciones y menor amplitud (85 nm-86 nm), que la región antes comentada (Cuadro 2.8). Los ajustes obtenidos para estas posiciones en S2017 fueron altos ($R^2 > 70\%$) sólo en menos de la mitad de las mediciones de (42 % 47 %), mientras que en S2014 el 91 % de los puntos medidos tuvo un alto R^2 . Esta concavidad sólo aparece en el 27 % de las firmas espectrales de S2017, mientras que en S2014, se presenta en el 62 % de las mediciones (Cuadro 2.8).

	S2017		S2014		M2014	
	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición
Mediana(nm)	2026	2160	2023	2179	2029	2170
CV (%)	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4
R^2 *	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
N	134		156		141	
Mediana(nm)	2289	2373	2287	2369		
CV (%)	0,3	0,2	0,2	0,3		
R^2 *	47 %	42 %	91 %	91 %		
N	84		82			
n	45		25		33	
PP	64 %		74 %		100 %	

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.8 Regiones de absorción “cóncavas” entre 1950 nm y 2400 nm. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros, n: número de mediciones con esta absorción. PP: proporción porcentual de n sobre el total de puntos medidos en cada transecta.

Las dos regiones restantes de las cuatro medidas en este rango del infrarrojo, tienen forma de “picos” y son más angostas que las descritas anteriormente. Una de éstas entre **1957 nm y 2029 nm** (“alrededor de 2000 nm”) aparece en las tres transectas con posiciones de mínima y máxima diferentes (Cuadro 2.9). Si bien todas las transectas tienen baja variabilidad en estas posiciones entre sus puntos medidos, M2014 es la de menor variabilidad (CV: 0,1). En M2014 se encontró la mayor cantidad de firmas con

estas formas de absorción (70 %) en relación a S2014 (12 %) y S2017 (19 %). Además en M2014 estos picos son mucho más estrechos (36 nm) que en ambas transectas con rastrojo de soja (60 nm en S2014 y 72 nm en S2017). Todas las mediciones tuvieron alto ajuste ($R^2 > 70\%$) de estas posiciones en las tres transectas (Cuadro 2.9).

	S2017		S2014		M2014	
	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición
Mediana(nm)	1957	2029	1959	2019	1993	2029
CV (%)	0,4	0,5	0,4	0,4	0,1	0,1
R^2 *	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
N	72		60		36	
Mediana(nm)	2176	2218	2178	2216		
CV (%)	0,4	0,2	0,3	0,2		
R^2 *	86 %	86 %	92 %	100 %		
N	42		38			
n	13		4		23	
PP	19 %		12 %		70 %	

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.9 Regiones de absorción en formas con “picos” entre 1950 nm y 2400 nm. N: N: ancho de cada región de absorción en nanómetros, n: número total de mediciones con absorción. PP: proporción porcentual de n sobre el total de puntos medidos en cada transecta.

Por último, una cuarta región con absorción se encontró entre **2176 nm y 2218** (“alrededor de 2200 nm”) con forma de “picos” y sólo en las transectas con rastrojos de soja en una baja proporción de puntos medidos. Las posiciones que delimitan la absorción tuvieron poca diferencia entre ambas transectas (2 nm) y moderadamente baja variabilidad entre los puntos medidos dentro de cada transecta. Las regiones de absorción son aún más estrechas que las de “picos” descritas anteriormente en las transectas de soja. En ambas transectas el ajuste fue alto ($R^2 > 70\%$) en casi la totalidad de los puntos medidos (Cuadro 2.9).

--Profundidad y Banda Central de cada región de absorción

Para todos los análisis de la profundidad se consideraron sólo las mediciones con valores de profundidad superiores a 1 % de reflectancia teniendo en cuenta que el error

absoluto del radiómetro es del 1 %. Los valores inferiores a dicha profundidad podrían estar dentro del error de medición.

- **Regiones cóncavas**

En la región entre **2023 nm** y **2179 nm**, la transecta con rastrojo de maíz (M2014), en relación a ambas transectas con rastrojo de soja (S2017 y S2014), es la de mayor profundidad de absorción medida en la totalidad de las firmas espectrales. Las transectas con rastrojo de soja tienen entre sí, valores de profundidades de absorción, mínimas y medianas, similares. Las bandas centrales en las tres transectas variaron su posición entre 2 nm y 3 nm. Los ajustes fueron altos ajustes en la mayoría de los puntos medidos en las transectas de rastrojo de soja y en la totalidad de los puntos en M2014. S2017 es la transecta que presenta mayor variabilidad en la banda central con respecto a las restantes (Cuadro 2.10).

En la región entre **2285 nm** y **2373 nm** ambas transectas de soja tienen valores similares de profundidad de absorción, pero en mucha menor proporción de puntos de medición en S2017 (27 %). Las bandas centrales tienen diferencias de 6 nm en los valores medianos. Si bien la variabilidad en la definición de esta banda dentro de cada transecta es baja, S2017 mostró la mayor dispersión (% CV = 0,8). Altos ajustes ($R^2 > 70\%$) se dan en menor proporción de firmas en S2017 que en S2014 (68 %, *versus* 95 % respectivamente) (Cuadro 2.11).

	S2017	S2014	M2014
Región espectral			
	2026 - 2160	2023 - 2179	2029 - 2170
Profundidad %			
Mínima	1 %	1,1 %	2,3 %
Máxima	7,2 %	5,1 %	8,6 %
Mediana	2,9 %	2,7 %	6,3 %
n	45	25	33
PP	64 %	74 %	100 %
Banda Central nm			
Mediana	2083	2082	2080
CV (%)	0,3	0,2	0,2
R² *	89 %	96 %	100 %

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.10 Profundidad de absorción y banda central en formas “cóncavas” entre **2023 nm** y **2179 nm**. n: número total de mediciones con profundidad ≥ 1 %. PP: proporción porcentual de n sobre el total de puntos medidos en cada transecta.

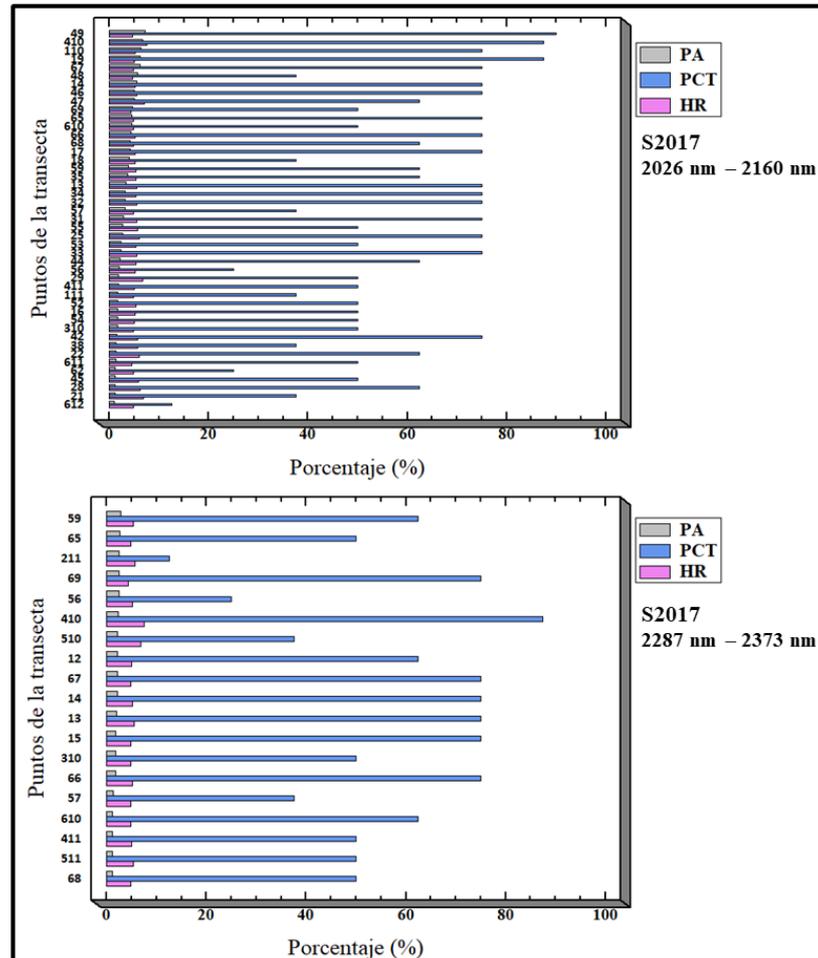
	S2017	S2014
Región espectral		
	2287 - 2373	2285 - 2369
Profundidad %		
Mínima	1,1 %	1,2 %
Máxima	2,9 %	2,5 %
Mediana	2 %	1,6 %
n	19	21
PP	27 %	62 %
Banda Central nm		
Mediana	2333	2339
CV (%)	0,8	0,4
R² *	68 %	95 %

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.11 Profundidad de absorción y banda central en formas “cóncavas” entre **2285 nm** y **2373 nm**. n: número total de mediciones con profundidad ≥ 1 %. PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

La profundidad de absorción de estas formas vinculadas a rastros no mostró, en ninguna de las regiones medidas, vinculación directa con la proporción de cobertura (PCT) y la humedad del rastrojo (HR), a excepción de S2017. En las Fig. 2.11, 2.12 y 2.13 se muestran gráficos con barras cuya longitud representa el valor porcentual de la profundidad de absorción (PA), de la proporción de cobertura total de rastros (PCT) y de la humedad del rastrojo en cada punto medido en las transectas. Estos puntos se

ordenaron en función de la profundidad de absorción (de mayor a menor valor porcentual). Sólo en la transecta S2017 se da una vinculación entre el PCT y la PA. En ésta los puntos con $PCT \geq 80\%$ son los de mayor profundidad de absorción en el rango entre 2026 nm-2160 nm (Fig. 2.11).



FICURA 2.11 Proporción relativa de los valores porcentuales de PA, PCT y HR en S2017. PA: profundidad de absorción en % de reflectancia, PCT: proporción porcentual de cobertura de rastrojo, HR: porcentaje de humedad del rastrojo. S2017: rastrojo de soja, año 2017.

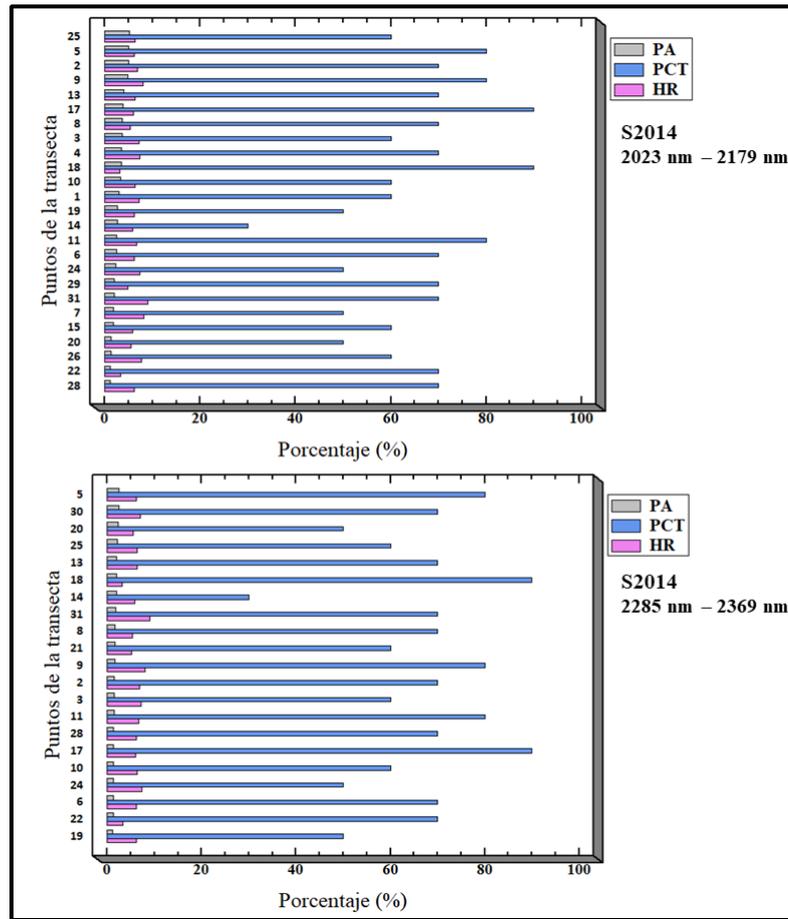


FIGURA 2.12 Proporción relativa de los valores porcentuales de PA, PCT y HR en S2014. PA: Profundidad de absorción en % de reflectancia, PCT: proporción porcentual de cobertura de rastrojo, HR: porcentaje de Humedad del rastrojo. S2014: rastrojo de soja, año 2014.

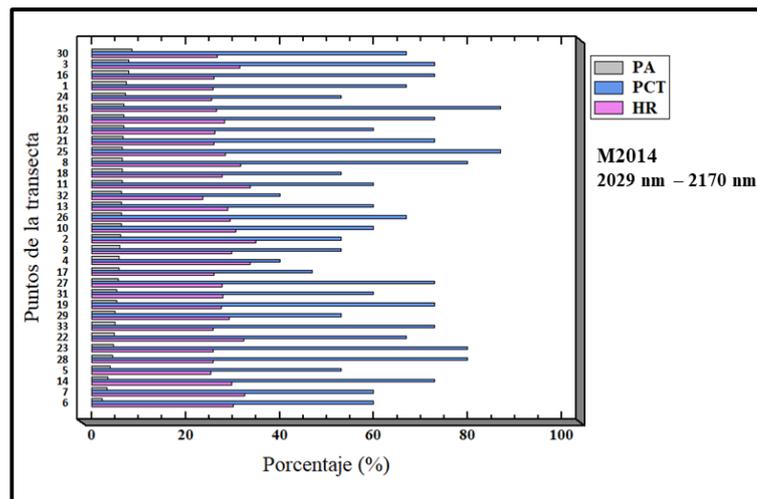


FIGURA 2.13 Proporción relativa de los valores porcentuales de PA, PCT y HR en M2014. PA: Profundidad de absorción en % de reflectancia, PCT: proporción porcentual de cobertura de rastrojo, HR: porcentaje de Humedad del rastrojo

- **Regiones con picos**

Alrededor de **2000 nm**.

En M2014 una alta proporción de puntos (70 %) presenta estos picos, con bajo coeficiente de variación para la banda central entre los puntos medidos y un alto ajuste ($R^2 > 70\%$) en todas las mediciones. En las transectas con rastrojo de soja los picos son menos profundos y aparecen en mucha menor proporción de puntos (12 % en S2014 y 19 % en S2017). La variabilidad entre puntos de la posición de la banda central en cada transecta es alta en estas transectas. S2017 tiene menor proporción de puntos con alto ajuste en relación a S2014 (Cuadro 2.12).

	S2017	S2014	M2014
Región espectral			
	1957 - 2029	1959 - 2019	1993 - 2029
Profundidad %			
Mínima	1,1 %	1,0 %	1,1 %
Máxima	2,8 %	1,8 %	5,5 %
Mediana	1,5 %	1,3 %	3,1 %
n	13	4	23
PP	19 %	12 %	70 %
Banda Central nm			
Mediana	1986	1974	2006
CV (%)	0,7	0,7	0,1
R² *	85 %	100 %	100 %

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.12 Profundidad de absorción y banda central en formas con “picos alrededor de 2000 nm”. n: número de mediciones con profundidad $\geq 1\%$ PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

Como se indicó en el ítem 2.2.4 el análisis de componentes principales (ACP) es una técnica que contribuye a establecer una vinculación entre la profundidad de absorción y los atributos de superficie. Para las diferentes formas de absorción (picos o concavidades), se realizó un ACP vinculando los atributos medidos en las adquisiciones radiométricas con profundidad superior al 1 % en cada región espectral.

El ACP muestra que en la transecta S2017, el 73 % de la varianza total es explicada por los dos primeros componentes. El 48 % de la variabilidad total (CP1) está fundamentalmente definido por la materia orgánica, si bien también la humedad del

suelo, la arcilla y la humedad del rastrojo tienen alto peso. La variabilidad (25 %) del CP 2 está definida por el limo y la arena (Cuadro 2.13).

CP	Autovalores			Autovectores		
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	2,91	0,48	0,48	HR	-0,48	-0,16
2	1,48	0,25	0,73	HS	0,46	0,18
3	1,09	0,18	0,91	MO	0,53	-0,02
4	0,32	0,05	0,97	ARC	0,41	-0,21
5	0,20	0,03	1,00	LI	-0,19	-0,59
6	3,7E-05	6,2E-06	1,00	ARE	-0,24	0,74

CUADRO 2.13. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2000 nm” en S2017. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

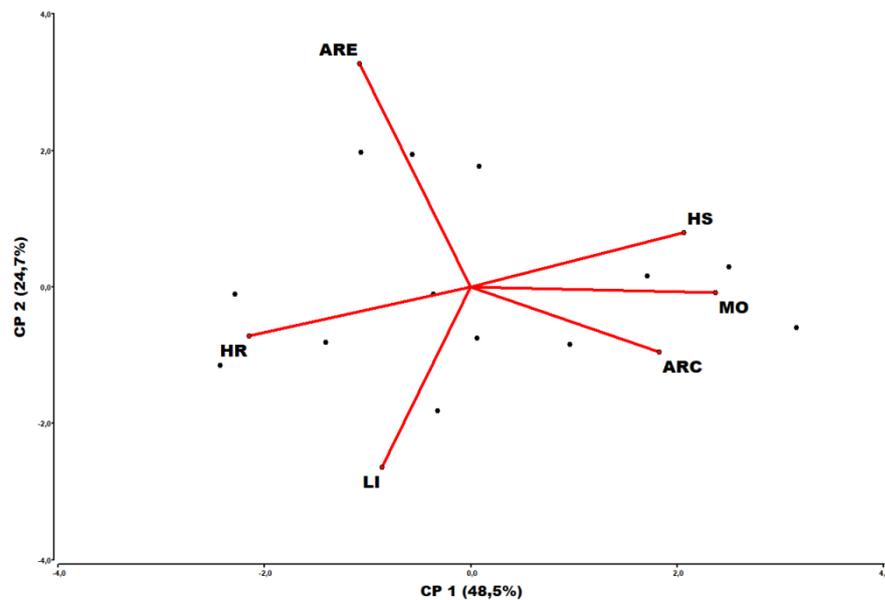


FIGURA 2.14. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2000 nm” y los atributos medidos en S2017. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

El 54 % de los puntos medidos en esta transecta (S2017), tiene una profundidad superior a la mediana. Algunos de éstos se corresponden con los valores más altos de humedad del rastrojo y otros con materia orgánica, unos pocos con limo o arcilla. Gráficamente también se observa que todas las variables mencionadas están correlacionadas. La materia orgánica, la arcilla y la humedad del suelo, fuerte y

positivamente correlacionadas y la humedad del rastrojo negativamente correlacionada a éstas en el CP1. El limo y la arena, aparecen negativamente correlacionados en el CP2 (Fig.2.14).

En el Cuadro 2.14 los autovalores de la transecta con rastrojo de soja (S2014) indican que una alta proporción de la varianza total (63 %) está definida por la arena y la arcilla. El resto de la varianza total prácticamente es explicada por el CP2 (32 %) siendo la materia orgánica y la humedad del rastrojo las variables que lo definen.

CP	Autovalores			Autovectores		
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	3,80	0,63	0,63	HR	0,25	0,63
2	1,91	0,32	0,95	HS	0,36	-0,40
3	0,29	0,05	1,00	MO	-0,28	-0,60
4	0,00	0,00	1,00	ARC	0,48	-0,25
5	0,00	0,00	1,00	LI	-0,50	0,15
6	0,00	0,00	1,00	ARE	0,50	0,03

CUADRO 2.14. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2000 nm” en S2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

Dos de los 4 puntos medidos son los de mayor profundidad (> a la mediana), uno de ellos se corresponde con los más altos valores de materia orgánica (> al promedio de la transecta) y el otro a los valores más altos de arcilla y arena (ambos > al promedio de la transecta). Gráficamente uno de estos puntos aparece asociado a la arena y arcilla, ambas correlacionadas positivamente en el CP1. El otro punto medido se asocia a la materia orgánica, negativa y fuertemente correlacionada con la humedad del rastrojo en el CP2 (Fig.2.15).

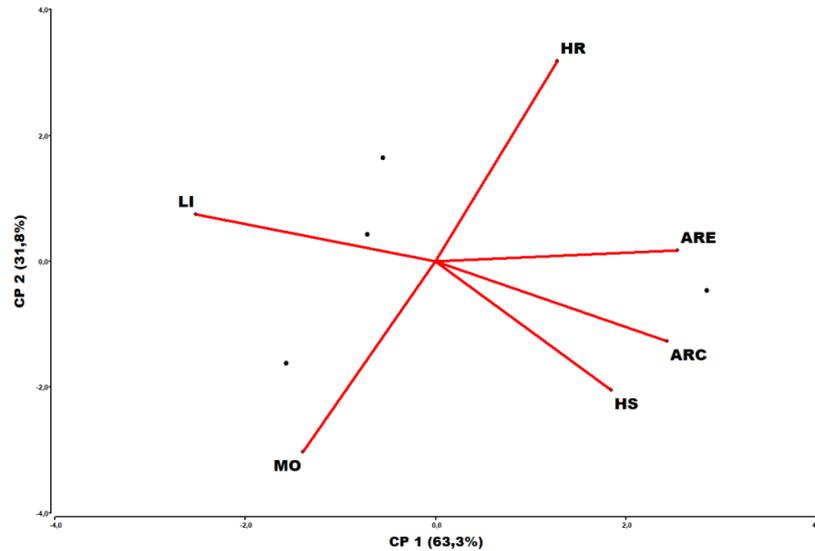


FIGURA 2.15. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2000 nm” y los atributos medidos en S2014. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

En la transecta con rastrojo de maíz (M2014) el 75 % de la varianza total es explicada por los tres primeros componentes. El CP1 (38 % de la variabilidad) está definido por el limo y la arena. En el CP2 (20 % de la varianza total) la humedad de suelo es la variable que más aporta al mismo. En el CP3 (17 % de la varianza total) la arcilla es la variable que define fundamentalmente este componente (Cuadro 2.15).

CP	Autovalores			Autovectores			
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2	CP3
1	2,30	0,38	0,38	HR	-0,27	-0,01	0,24
2	1,20	0,20	0,58	HS	0,02	0,74	-0,41
3	1,02	0,17	0,75	MO	0,40	-0,31	0,41
4	0,89	0,15	0,90	ARC	-0,32	0,44	0,68
5	0,60	0,10	1,00	LI	-0,52	-0,39	-0,36
6	8,6E-05	1,4E-05	1,00	ARE	0,63	0,07	-0,10

CUADRO 2.15. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2000 nm” en M2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

Los puntos de mayor profundidad de absorción ($\geq 3,1$ %) tienen los valores más altos de materia orgánica ($>$ a la media de la transecta). Algunos muy profundos tienen, además, muy altos valores en arena, en cambio otros, en humedad de suelo. En todos

éstos la arcilla tiene valores por debajo o alrededor de la media de la transecta. Gráficamente la mitad de estos puntos aparece vinculada a la materia orgánica y el resto están asociados a la humedad del suelo, la arena y la arcilla. La materia orgánica aparece fuerte y positivamente correlacionada a la arena en el CP1, en el CP2 se correlaciona negativamente con la humedad del suelo y la arcilla, ambas positivamente correlacionadas entre sí en este componente (Fig.2.16). En cambio en el CP3 (Cuadro 2,15) la materia orgánica está positivamente correlacionada con la arcilla y ambas negativamente con la humedad del suelo.

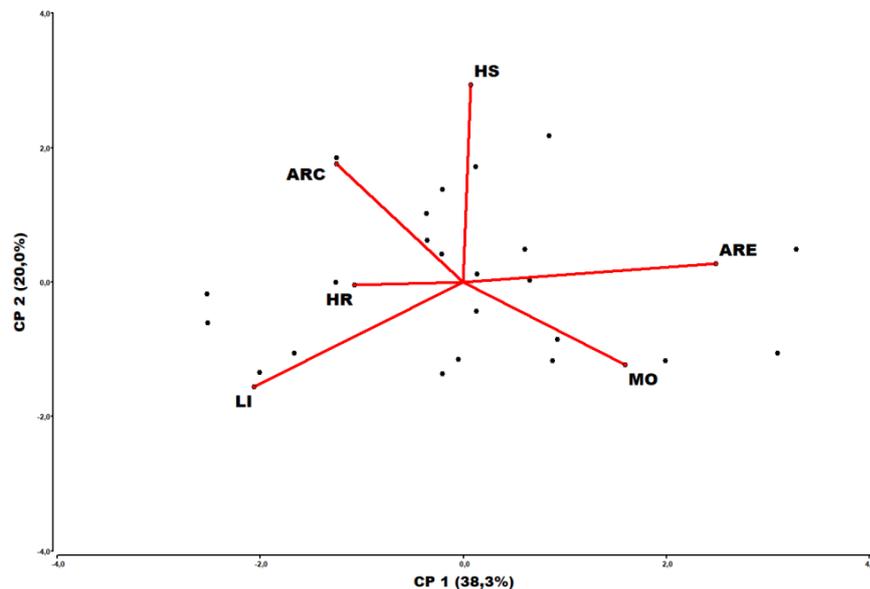


FIGURA 2.16. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2000 nm” y los atributos medidos en M2014. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

Alrededor de **2200 nm**

Las dos transectas con rastrojo de soja presentan absorción en “picos” en esta región. Todos los puntos medidos en S2014 tienen profundidad < al 1 %. En S2017 sólo 7 mediciones sobre un total de 70, tuvieron profundidad >1 %, con buen ajuste y moderada variabilidad entre todos los puntos (Cuadro 2.16).

S2017	
Región espectral	
2176 - 2218	
Profundidad %	
Mínima	1,0 %
Máxima	1,7 %
Mediana	1,4 %
Banda Central nm	
Mediana	2203
CV (%)	0,4
R² *	100 %
n	7
PP	10 %

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.16 Profundidad de absorción y banda central en formas con “picos alrededor de 2200 nm” en S2017. n: número de mediciones con profundidad ≥ 1 , PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

Autovalores				Autovectores		
CP	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	2,45	0,41	0,41	HR	-0,49	-0,07
2	2,16	0,36	0,77	HS	0,43	0,33
3	1,04	0,17	0,94	MO	0,21	0,57
4	0,26	0,04	0,98	ARC	-0,03	-0,55
5	0,10	0,02	1,00	LI	0,58	-0,17
6	0,00	0,00	1,00	ARE	-0,44	0,47

CUADRO 2.17. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos alrededor de 2200 nm” en S2017. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

Si bien el limo es la variable que más contribuye a la variabilidad en el CP1 (41 % con respecto a la varianza total), la humedad del suelo y del rastrojo, y la arena, también aportan a la misma en forma importante en este componente. La materia orgánica y la arcilla son las variables que más contribuyen a la varianza en el CP2 (36 % de la variabilidad total) (Cuadro 2.17).

Algunos picos más profundos ($>$ mediana Cuadro 2.16), tienen altos valores de limo y de humedad de suelo, y otros, de limo, arena y humedad del rastrojo. Los menos profundos ($<$ mediana) tienen altos valores de arcilla. Gráficamente se observa que

todas estas variables contribuyen de manera similar a la variabilidad total. La humedad de suelo está positivamente correlacionada con el limo y la materia orgánica, pero negativamente correlacionada con la arena y la arcilla en el CP1. En el CP2 la humedad de suelo se correlaciona positivamente con la arena y la materia orgánica y negativamente con la arcilla y el limo.

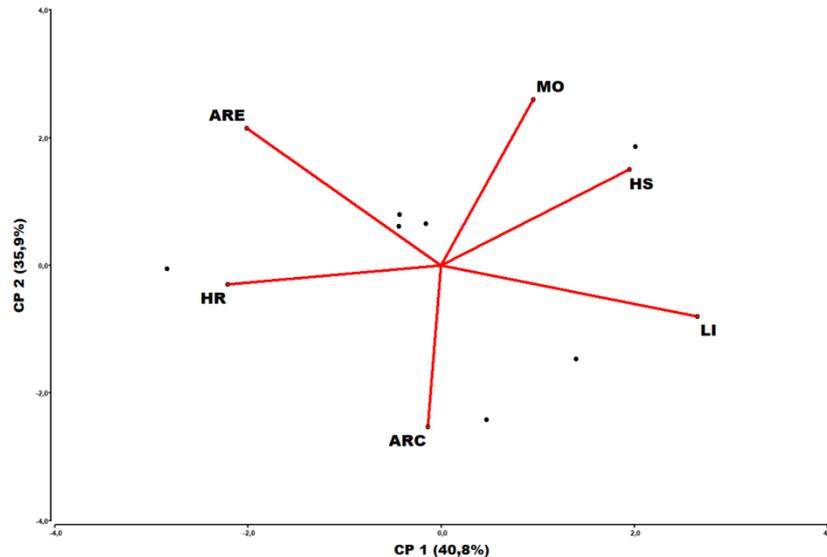


FIGURA 2.17. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos alrededor de 2200 nm” y los atributos medidos en S2017. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

2.3.3.2.2 Región entre 350 nm y 1800 nm

- Espectros de referencia

En el rastrojo puro de soja (100 % cobertura total) (Fig. 2.18 a) se visualizaron dos formas cóncavas de absorción a partir de 1400 nm. Las posiciones extremas de estas regiones, la banda central y la profundidad de absorción se muestran en el Cuadro 2.18. El suelo totalmente desnudo tiene aproximadamente entre 400 nm y 700 nm, una absorción ampliamente cóncava, luego dos regiones con forma de picos, una alrededor de 900 nm y otro de 1100 nm. A partir de 1430 nm no presenta absorción, sino una inclinación marcadamente positiva (Fig. 2.18 b). Las posiciones, banda central y profundidades de absorción medidas en suelo desnudo se muestran en el Cuadro 2.19. El rastrojo puro de maíz tiene cuatro regiones de absorción, una cóncava y evidente

alrededor de 700 nm, dos suavemente cóncavas entre 940 nm y 1300 nm, y última muy profunda entre 1400 nm y 1500 nm. A partir de 1650 nm, la firma de rastreo de maíz tiene una inclinación negativa a diferencia de la firma de rastreo de soja que es suavemente cóncava. (Fig. 2.18 c). En el Cuadro 2.20 se dan las posiciones extremas que definen cada región de absorción, las profundidades respectivas y la banda central.

S2017RP				
Región espectral				
	Mín Pos nm	Máx Pos nm	Mín Pos nm	Máx Pos nm
	1431	1646	1647	1753
R²	97 %	100 %	100 %	98 %
N	215		106	
Profundidad %				
	4,8 %		1,4 %	
Banda Central nm				
Mediana	1485		1724	
R²	96 %		94 %	

CUADRO 2.18 Regiones espectrales, profundidad de absorción y banda central entre 350 nm y 1800 nm en la firma de referencia de rastreo puro de soja. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros. Mín. Pos y Máx Pos: Mínima y máxima posición de la región de absorción.

S2017SD						
Región espectral						
	Mín Pos nm	Máx Pos nm	Mín Pos nm	Máx Pos nm	Mín Pos nm	Máx Pos nm
	410	607	894	981	1088	1146
R²	100 %	100 %	98 %	99 %	94 %	97 %
N	197		87		58	
Profundidad %						
	7,4 %		4,2 %		2,3 %	
Banda Central nm						
Mediana	507		935		1126	
R² *	98 %		92 %		92 %	

CUADRO 2.19 Regiones espectrales, profundidad de absorción y banda central entre 350 nm y 1800 nm en la firma de referencia de suelo desnudo. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros. Mín. Pos y Máx Pos: Mínima y máxima posición de la región de absorción.

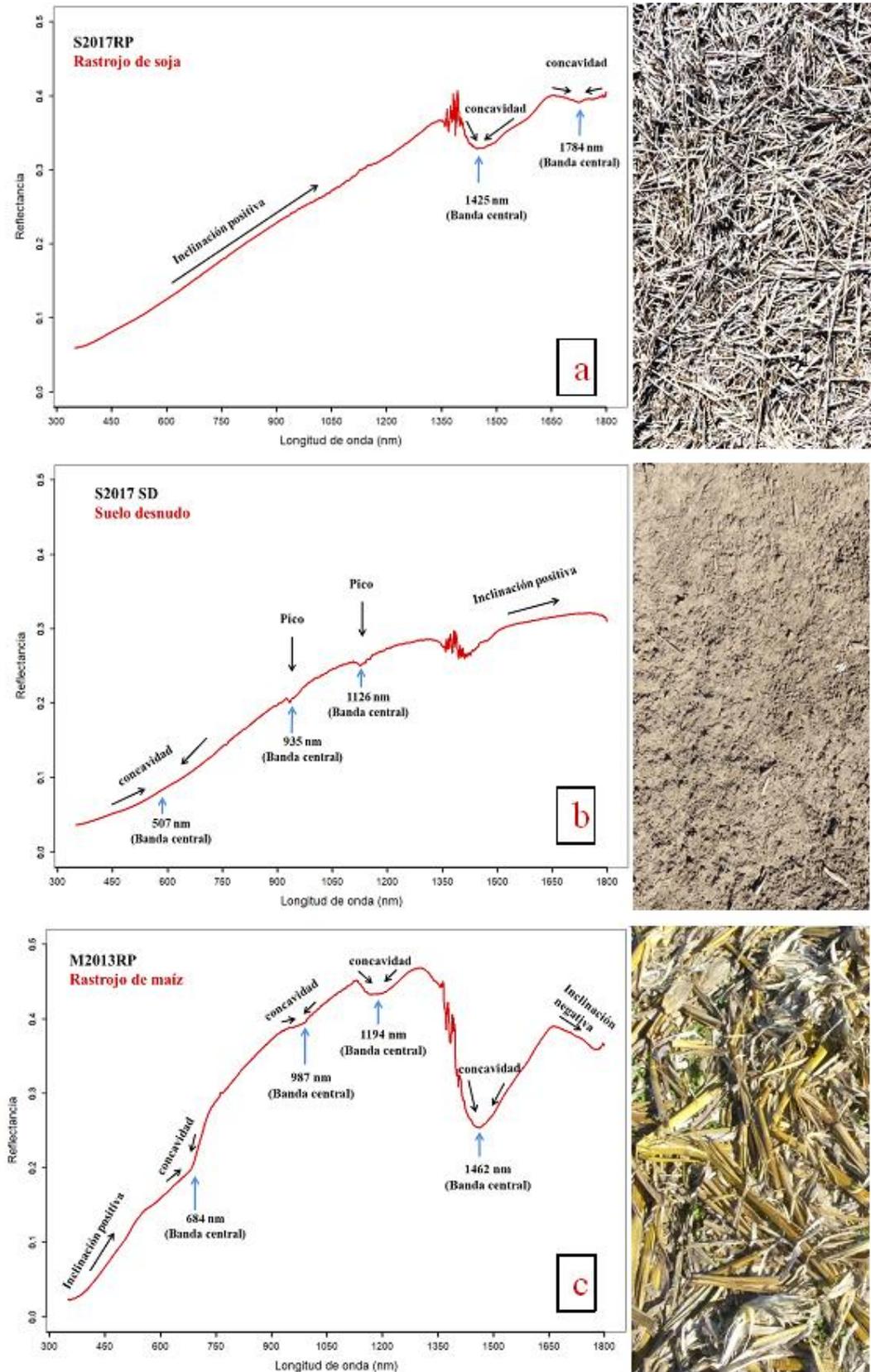


FIGURA 2.18: Formas de absorción y bandas centrales en las firmas de referencia entre 350 nm y 1800 nm. Izquierda: las firmas de referencia, derecha: fotos de sus superficies.

M2013RP								
Región espectral								
	Mín Pos nm	Máx Pos nm						
	644	739	941	1017	1102	1300	1405	1560
R ²	100 %	100 %	99 %	100 %	99 %	100 %	90 %	100 %
N	95		76		198		155	
Profundidad %								
	10,4		1,6		4,5		19	
Banda Central nm								
	684		987		1194		1462	
R ²	100 %		87 %		95%		99 %	

CUADRO 2.20 Regiones espectrales, profundidad de absorción y banda central entre 350 nm y 1800 nm en la firma de referencia de rastrojo de maíz. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros. Mín. Pos y Máx Pos: Mínima y máxima posición de la región de absorción.

- Espectros de las transectas

Los resultados obtenidos se separaron para su presentación en dos regiones, una entre 750 nm y 1800 nm, y otra entre 350 nm y 750 nm.

-“Región espectral”: Posiciones de mínima y máxima longitud de onda en el espectro entre 750 nm y 1800 nm.

Dentro de esta región se midieron cuatro formas de absorción reconocidas preliminarmente de manera visual. Dos de estas regiones (de **910 nm a 994 nm** y de **1103 nm a 1184 nm**) tienen formas de “picos” angostos entre 84 nm y 70 nm de ancho. Ambas se encontraron en alrededor del 30 % de las adquisiciones radiométricas realizadas en todas las transectas. S2017 es la transecta que presentó el mayor número de puntos con estas formas (36 %). La posición de máxima longitud de onda que define la absorción, es la de mayor variación entre transectas, con valores entre 3 nm y 14 nm, y en especial entre las transectas de soja y de maíz. Entre mediciones dentro de cada transecta, las mayores variaciones en las posiciones que definen esta absorción (altos % CV) se dieron en las dos transectas de soja. Todos los puntos medidos tuvieron un alto

ajuste (>70%) en la determinación de las posiciones de mínima y máxima (Cuadro 2.21).

	S2017		S2014		M2014	
	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición
Mediana(nm)	910	994	910	982	910	980
CV (%)	1,2	0,5	0,6	0,5	0,2	0,3
R ² *	100 %	100 %	100%	100%	100 %	100 %
N	84		72		70	
Mediana(nm)	1103	1181	1103	1184	1102	1184
CV (%)	0,7	0,8	0,9	1,6	0,3	0,0
R ² *	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
N	78		81		82	
n	25		10		10	
PP	36 %		29 %		30 %	

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 70%

CUADRO 2.21 Regiones de absorción en formas con “picos” entre 750 nm y 1800 nm. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros, n: número de mediciones totales con absorción. PP: proporción porcentual de n sobre el total de puntos medidos en cada transecta.

Las otras dos regiones restantes (de **941 nm a 1144 nm** y de **1137 nm a 1330 nm**) presentaron formas cóncavas más amplias (entre 191 nm y 201 nm). Se encontraron en un bajo número de los puntos medidos y con altos coeficientes de variación, entre mediciones dentro de cada transecta, en la definición de la mayoría de las posiciones (Cuadro 2.22).

	S2017		S2014		M2014	
	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición
Mediana(nm)	942	1138	941	1137	943	1144
CV (%)	0,2	1	0,9	0,1	0,7	0,2
R ² *	100 %	100 %	100%	100%	100 %	100 %
N	196		196		201	
Mediana(nm)	1138	1329	1137	1330	1144	1328
CV (%)	1	3,6	0,1	0,3	0,2	0,5
R ² *	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
N	191		193		184	
n	11		6		9	
PP	16 %		18 %		27 %	

CUADRO 2.22 Regiones de absorción “cóncavas” entre 750 nm y 1800 nm. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros, n: número total de mediciones con absorción > 1%. PP: proporción porcentual de n sobre el total de puntos medidos en cada transecta.

--Profundidad y Banda Central de cada región de absorción

Entre 750 nm y 1800 nm las mediciones con diferentes profundidades de absorción fueron identificadas a través de los análisis de componentes principales. Esta información se cruzó con los registros obtenidos a campo (método de Laflén) de proporción de cobertura (PCT). Esto determinó que no se encontrara una relación directa entre la profundidad de absorción y el porcentaje de cobertura (PCT).

- **Regiones con “Picos”**

En las tres transectas aparecen firmas con estas formas de absorción en ambas regiones y. otras que sólo las presentan en una de las dos regiones.

En la región entre **910 nm y 994 nm**, las bandas centrales son coincidentes entre transectas con rastrojo de soja, pero las profundidades de absorción son superiores en S2017. Los valores máximos de profundidad son los que más se diferencian entre las tres transectas, teniendo S2017 los máximos más elevados. M2014 es la transecta con más bajo ajuste y la mayor variabilidad, entre sus puntos de medición, en la definición de la posición de la banda central (Cuadro 2.23).

Entre **1103 nm y 1184 nm**, S2017 también presenta las “profundidades máximas” más altas en relación a las otras transectas. Entre las tres transectas las bandas centrales difieren en sus posiciones (entre 2 nm y 5 nm). Se encontró además, una mayor variabilidad entre puntos dentro de cada transecta que en la región antes comentada (Cuadro 2.24).

	S2017	S2014	M2014
Región espectral			
	910 - 994	910 - 982	910 - 980
Profundidad %			
Mínima	1 %	1,2 %	1,1 %
Máxima	4,6 %	2,3 %	3,5 %
Mediana	2 %	1,4 %	1,9 %
n	24	9	9
PP	34 %	35 %	27 %
Banda Central nm			
Mediana	935	935	937
CV (%)	0,33	0,1	0,7
R² *	100 %	100 %	78 %

CUADRO 2.23 Profundidad de absorción y banda Central en formas con “picos” entre 910 nm y 994 nm. n: número de mediciones con profundidad ≥ 1 , PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

	S2017	S2014	M2014
Región espectral			
	1103 - 1181	1103 - 1184	1104 - 1184
Profundidad %			
Mínima	1,1 %	1,0 %	1,0 %
Máxima	5,2 %	2,1 %	4,1 %
Mediana	2,3 %	1,5 %	2,1 %
n	21	6	9
PP	30 %	18 %	27 %
Banda Central nm			
Mediana	1122	1125	1127
CV (%)	0,39	0,4	0,3
R² *	95 %	100 %	100 %

CUADRO 2.24 Profundidad de absorción y Banda Central en formas con “picos” entre 1103 nm y 1184 nm. n: número de mediciones con profundidad ≥ 1 , PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

El análisis de componentes principales en todas las adquisiciones con picos en ambas regiones de absorción, señala que en la transecta S2017, más de una tercera parte de la varianza total (35,2 %, CP1) está definida por el limo en forma positiva. En el CP2, la variabilidad total (26 %) está dada por la materia orgánica y la humedad del suelo, correlacionadas entre sí positivamente, y por la arena, negativamente correlacionada en este componente (Cuadro 2.25).

CP	Autovalores			Autovectores		
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	2,11	0,35	0,35	HR	-0,02	1,2E-03
2	1,59	0,26	0,62	HS	-0,15	0,58
3	1,10	0,18	0,80	MO	-0,34	0,53
4	0,71	0,12	0,92	ARC	-0,50	0,24
5	0,48	0,08	1,00	LIM	0,65	0,26
6	0,00	0,00	1,00	ARE	-0,43	-0,51

CUADRO 2.25. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos” entre 750 nm y 1800 nm en S2017. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

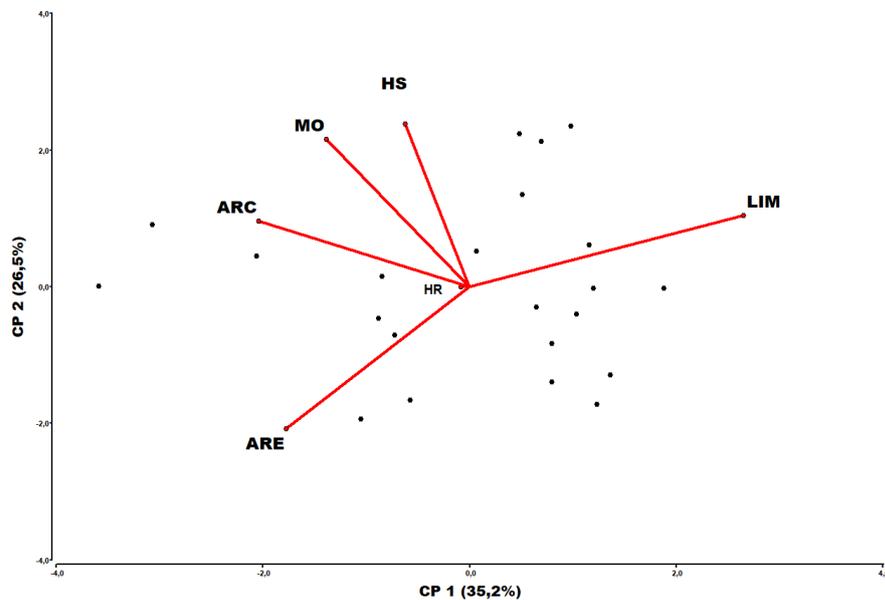


FIGURA 2.19. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2017. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

De las 15 observaciones que aparecen asociadas al limo en el CP1 (Fig. 2.19), 11 tienen profundidades de absorción superiores a la mediana. Ocho de éstas corresponden a los picos más profundos (entre 3,1 % y 5,2 %) y a los valores de limo más elevados (percentil 75 y por encima de la mediana) de la transecta. Todos los puntos de absorción con forma de picos con profundidad menor a la mediana (se consideró el valor más bajo: 2%, Cuadro 2.23) coinciden con valores intermedios o bajos en limo y gráficamente a las observaciones asociadas a la arcilla (positivamente) y

a la arena (negativamente) en el CP2. El peso de la humedad del rastrojo en la variabilidad explicada por ambos componentes, es sumamente bajo.

En S2014 los picos en ambas regiones son los menos profundos en relación a las otras transectas. Se encontró un comportamiento dispar entre la presencia de éstos y las propiedades de suelo. El 43 % de la variabilidad total (CP1) está correlacionada positivamente con la arcilla y negativamente con el limo. En menor proporción la humedad del rastrojo y del suelo, inversamente correlacionadas, definen esta variabilidad. Al 33 % (CP2) de varianza restante contribuyen la materia orgánica, la humedad del rastrojo y en menor medida la humedad de suelo, en forma positiva Sólo un 16% (CP3) la variabilidad está asociada positivamente con la arena (Cuadro 2.26).

Autovalores				Autovectores			
CP	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2	CP3
1	2,59	0,43	0,43	HR	0,33	0,52	0,39
2	1,99	0,33	0,76	HS	-0,38	0,44	-0,12
3	0,95	0,16	0,92	MO	0,30	0,57	0,24
4	0,40	0,07	0,99	Arc	0,58	-0,14	-0,25
5	0,07	0,01	1,00	Li	-0,54	0,30	-0,12
6	2,3E-08	3,8E-09	1,00	ARE	-0,19	-0,34	0,84

CUADRO 2.26. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos” entre 750 nm y 1800 nm en S2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

El 78 % de los puntos con absorción tiene profundidades superiores a la mediana (se consideró el valor de 1,4 %, Cuadro 2.23). Algunos de éstos se corresponden con altos contenidos de arcilla, otros con altos contenidos de materia orgánica o limos. Todos éstos tienen valores superiores o alrededor de la media de humedad del rastrojo y de suelo, en la transecta. Gráficamente todos los puntos medidos muestran gran dispersión (Fig.2.20). A diferencia de lo observado en la transecta S2017 el peso de la humedad del rastrojo en la variabilidad explicada por el CP1, es importante. La arcilla

está fuerte y positivamente correlacionada a la humedad del rastrojo y a la materia orgánica, pero negativamente correlacionada al limo y humedad de suelo.

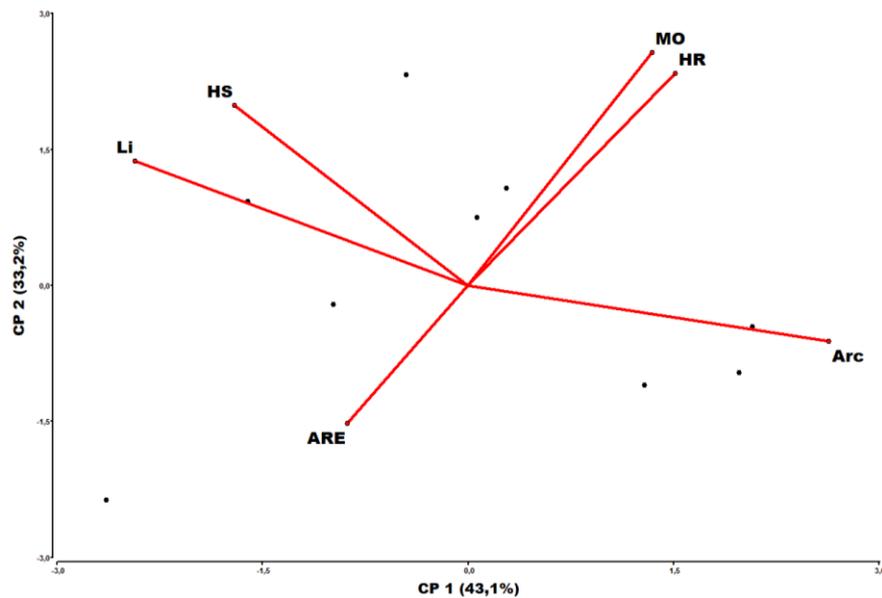


FIGURA 2.20. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2014. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

En M2014 casi la mitad de la varianza total (44 % CP1) está correlacionada positivamente con la arena y en menor proporción con la humedad del rastrojo. Sólo un 20 % de la varianza total (CP 2) está correlacionado fundamentalmente con la arcilla (en forma positiva) y con el limo negativamente (Cuadro 2.27).

CP	Autovalores			Autovectores		
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	2,66	0,44	0,44	HR	0,36	-0,14
2	1,25	0,21	0,65	HS	-0,46	0,21
3	1,10	0,18	0,84	MO	-0,24	0,08
4	0,68	0,11	0,95	Arc	-0,33	0,67
5	0,31	0,05	1,00	Li	-0,41	-0,66
6	1,6E-06	2,7E-07	1,00	ARE	0,57	0,20

CUADRO 2.27. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con “picos” entre 750 nm y 1800 nm en M2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

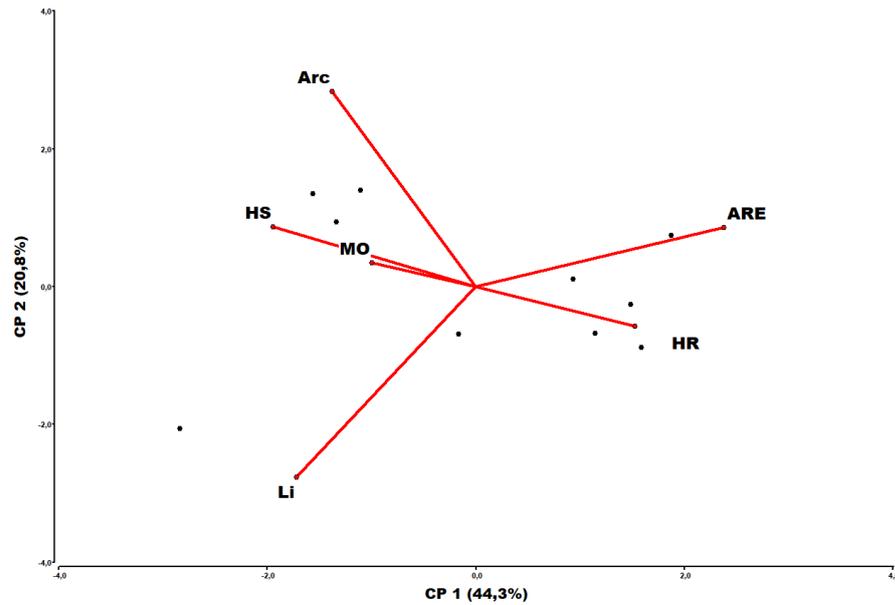


FIGURA 2.21. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “picos entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en M2014. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

Los picos con profundidad de absorción por encima de la mediana (1,9 % en Cuadro 2.23), están vinculados con altos valores de arena medidos en la transecta, y a valores superiores a la media de la transecta en humedad del rastrojo. Gráficamente el 50% de todos los puntos con absorción aparece asociado positivamente a las variables antes mencionada en el CP1 (Fig. 2.21). Cuatro de estas observaciones tienen las mayores profundidades de absorción (entre 2 % y 4,1 %). La proporción restante de puntos (50%), aparece en el gráfico asociado a la arcilla, la humedad de suelo y el limo. Cuatro de éstos, tienen valores elevados en humedad de suelo o bien, en arcilla. Estas dos variables están positivamente correlacionadas entre sí. El punto restante tiene valores en limo superiores a la media de la transecta. El limo con alto peso en el CP2 se correlaciona negativamente con la arcilla y la arena (Fig. 2.21).

- **Regiones cóncavas**

De la misma manera que en las regiones con “picos”, existen puntos medidos en las tres transectas que presentan estas formas de absorción en ambas regiones y. otros que sólo la presentan en una de las dos regiones.

Dentro de la región del infrarrojo aquí explorada, el rango entre **941 nm y 1144 nm** tiene la más alta variabilidad entre transectas de la posición de la banda central (de 60 nm a 64 nm de desplazamiento), y también entre puntos en cada una de las transectas (alto % CV). La proporción de puntos con absorción es muy baja en las dos transectas con rastrojo de soja (Cuadro 2.28).

	S2017	S2014	M2014
Región espectral			
	942 - 1138	941 - 1137	943 - 1144
Profundidad %			
Mínima	1,2 %	1,1 %	1 %
Máxima	5 %	1,7 %	2,5 %
Mediana	2,5 %	1,4 %	1,5 %
n	9	4	9
PP	13 %	12 %	27 %
Banda Central nm			
Mediana	1038	974	978
CV (%)	3,3	0,9	2
R² *	100 %	100 %	89 %

CUADRO 2.28 Profundidad de absorción y banda Central en concavidades entre 941 nm y 1144 nm. n: número de mediciones con profundidad ≥ 1 , PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

Entre **1137 nm y 1330 nm** la variabilidad en la posición de la banda central entre transectas es menor (de 26 nm a 31 nm de desplazamiento) con respecto a la región anterior de formas cóncavas. Esta posición entre las mediciones dentro de cada transecta (% CV), si bien es alta, es también menor que en la región anterior (Cuadro 2.29).

Al igual que en las regiones anteriores de “picos,” en ambos rangos con formas cóncavas, S2017 presenta los valores más altos de profundidad de absorción en relación a las demás transectas (Cuadros 2.23 y 2.24).

	S2017	S2014	M2014
Región espectral			
	1138 - 1329	1137 - 1330	1144 - 1329
Profundidad %			
Mínima	1,2 %	1,1 %	1,4 %
Máxima	4 %	2,4 %	2,4 %
Mediana	2,1 %	1,7 %	1,8 %
n	11	6	8
PP	16 %	18 %	24 %
Banda Central nm			
Mediana	1206	1175	1180
CV (%)	1	0,5	1,3
R² *	46 %	100 %	87,5 %

CUADRO 2.29 Profundidad de absorción y banda Central en concavidades entre 1137 nm y 1330 nm. n: número de mediciones con profundidad ≥ 1 , PP: proporción porcentual de n sobre el total de las mediciones en cada transecta.

En la transecta con rastrojo de soja (S2017) el 43 % de la varianza total (CP1) está principalmente asociada en forma positiva con la arena y la humedad del rastrojo, y negativamente con el limo. El 31 % de la variabilidad en el CP2 está definido por la arcilla y la humedad del suelo positivamente, y negativamente por el limo (Cuadro 2.30).

CP	Autovalores			Autovectores		
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	2,59	0,43	0,43	% HR	0,49	0,28
2	1,87	0,31	0,74	%HS	-0,30	0,54
3	0,98	0,16	0,91	%MO	-0,21	-0,08
4	0,30	0,05	0,96	%Arc	-0,29	0,61
5	0,26	0,04	1,00	%Li	-0,42	-0,50
6	1,7E-07	2,8E-08	1,00	%ARE	0,60	-0,04

CUADRO 2.30. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las “concavidades” entre 750 nm y 1800 nm en S2017. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

Las observaciones con mayor profundidad de absorción ($>$ mediana = 2,5 %) se corresponden con los 4 puntos asociados gráficamente a la humedad del rastrojo y a la arena en el CP1 (Fig. 2.22). Éstos, tienen los valores más altos en arena de todas las mediciones con absorción y por encima de la media de la transecta. Sólo dos de éstos

tienen altos valores de humedad del rastrojo ($>$ media de la transecta). Gráficamente también se observa que la arena y la humedad del rastrojo están fuertemente correlacionadas (Fig.2.22).

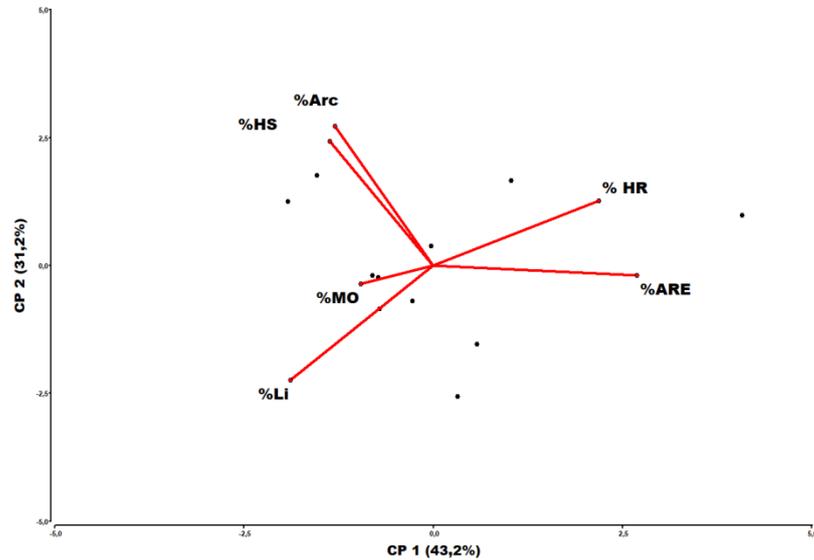


FIGURA 2.22. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “concavidades entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2017. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

El resto de las observaciones con profundidades de absorción por debajo de la mediana tienen altos contenidos de limo (por encima de la media de la transecta), o bien altos valores en humedad de suelo y arcilla (ambos parámetros por encima de la media de la transecta). El limo, la arcilla y la humedad de suelo están negativamente correlacionados con la arena en el CP1 (Fig.2.22).

En la transecta con rastrojo de soja S2014, el limo y la humedad del suelo, son las variables positivamente más asociadas con el CP1 (56 % de la variabilidad total). Un 31 % de la varianza (CP2) está definida fundamentalmente por la materia orgánica en forma negativa, y positivamente por la humedad del rastrojo (Cuadro 2.31).

Autovalores				Autovectores		
CP	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	3,34	0,56	0,56	HR	-0,05	0,68
2	1,85	0,31	0,87	HS	0,47	0,24
3	0,43	0,07	0,94	MO	0,12	-0,67
4	0,26	0,04	0,98	Arc	-0,49	-0,11
5	0,12	0,02	1,00	Li	0,53	0,04
6	0,00	0,00	1,00	ARE	-0,48	0,15

CUADRO 2.31. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con concavidades en S2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

Como se comentó anteriormente, esta transecta presenta muy pocas observaciones con absorción en este rango del espectro. El 67 % de los puntos medidos (4 puntos) tiene profundidad de absorción alrededor o superior a la mediana (1,7 %). Éstos tienen los de mayores contenidos de humedad del suelo, por encima o alrededor de la media de la transecta. Todos los puntos, (con altas o bajas profundidades de absorción), tienen valores de limo y humedad del rastrojo por encima o alrededor de la media de la transecta, y valores de arcilla y arena por debajo de la media de la transecta. Gráficamente, los puntos que aparecen vinculados a la HS, Li y MO en el CP1, son los que presentan la mayor profundidad de absorción (Fig. 2.23).

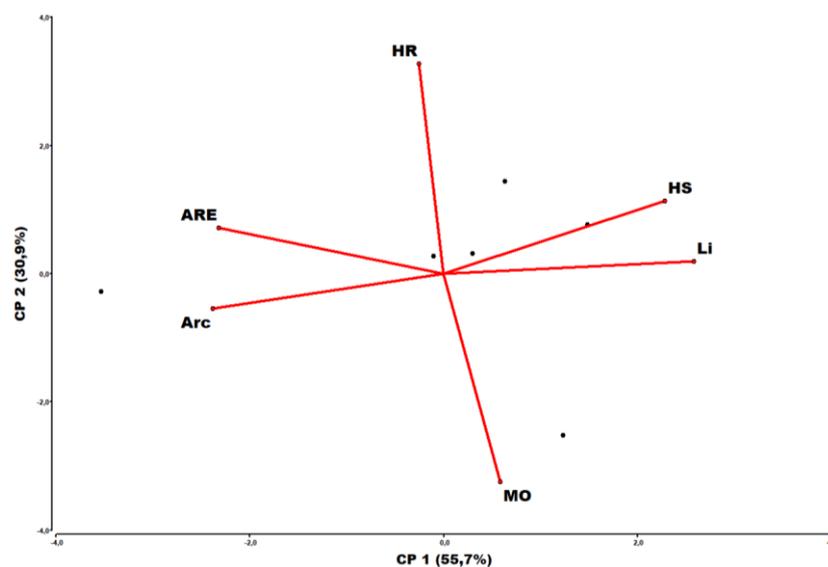


FIGURA 2.23 Biplot de las adquisiciones radiométricas con “concavidades entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en S2014. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

En la transecta con rastrojo de maíz (M2014) prácticamente la mitad de la variabilidad total está definida por el CP1 (48 %), siendo la arena la que más contribuye positivamente a la misma y la arcilla negativamente. Un 27 % de la varianza total (CP2) está dada positivamente por la humedad de suelo y en forma negativa, con menor peso, por la materia orgánica (Cuadro 2.32).

Autovalores				Variables	CP1	CP2	CP3
CP	Valor	Proporción	Prop Acum	HR	-0,30	0,32	0,71
1	2,90	0,48	0,48	HS	0,15	0,68	-0,38
2	1,64	0,27	0,76	MO	0,35	-0,56	0,26
3	0,91	0,15	0,91	Arc	-0,51	0,06	0,22
4	0,43	0,07	0,98	Li	-0,44	-0,30	-0,45
5	0,13	0,02	1,00	ARE	0,57	0,16	0,16

CUADRO 2.32. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las adquisiciones con concavidades en M2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

Las observaciones con mayor profundidad de absorción (alrededor de 2,5 %) tienen altos valores de arena y de materia orgánica (ambos por encima de la media de la transecta). Estos puntos aparecen gráficamente vinculados a estas variables en el CP1, las cuales están positivamente correlacionadas entre sí. Las mediciones con menor profundidad de absorción tienen valores altos de arcilla (por encima de la media de la transecta) e intermedios de limo. La arcilla está fuerte y negativamente correlacionada con la arena en el CP1 (Fig.2.24).

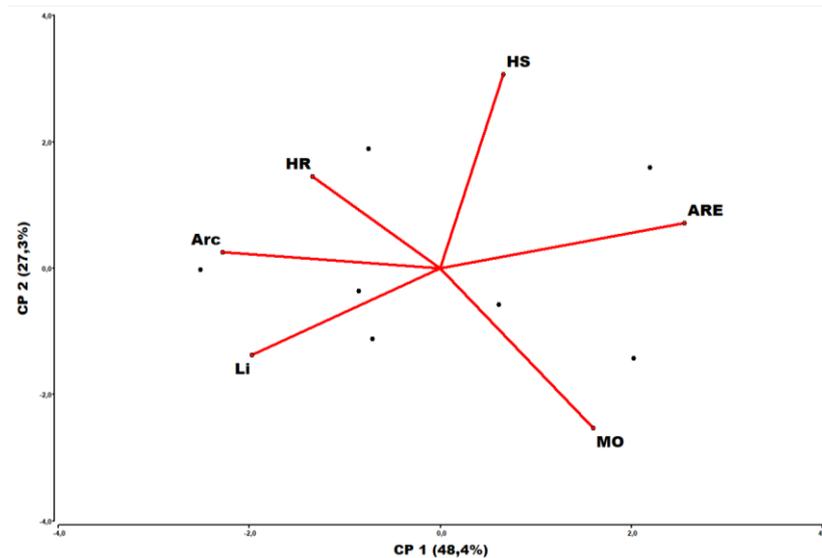


FIGURA 2.24. Biplot de las adquisiciones radiométricas con “concavidades entre 750 nm y 1800 nm” y los atributos medidos en M2014. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

Cada una de las regiones espectrales que se han descrito dentro de este rango del infrarrojo (750 nm y 1800 nm), contienen firmas con profundidad de absorción muy diversa. Esta variabilidad no sólo se encontró entre las tres transectas sino además, entre los diferentes puntos medidos dentro de cada transecta. Si bien la profundidad de absorción en ambas formas (picos y cóncavas) se halló vinculada a la proporción de uno o varios de los atributos considerados, la correlación entre éstos también condicionó la profundidad. Los resultados generados a partir del análisis de componentes principales se sintetizan en el Cuadro 2.33. En el mismo se señala el, o los atributos, directamente vinculados a las formas más profundas y las interrelaciones que más influyen en la disminución de la profundidad.

REGIÓN ESPECTRAL (nm) (*)	FORMAS de ABSORCIÓN	ATRIBUTOS TRANSECTA S2014	ATRIBUTOS TRANSECTA S2017	ATRIBUTOS TRANSECTA M2014
910 -994 1102-1184	PICOS > profundidad	arc MO Li	Li	ARE y HR
	PICOS < profundidad	Sin vinculación directa	Cuando < Li y > arc y ARE	Cuando > arc y HS
941-1144 1137-1330	CÓNCAVAS > profundidad	HS	ARE y HR	ARE y MO
	CÓNCAVAS < profundidad	Cuando < HS	Cuando > Li HS y arc	Cuando > arc

(*) Se indican los rangos en forma amplia, los medidos en cada transecta están citados en los Cuadros 2.22 y 2.23.

CUADRO 2.33. Profundidad de absorción y atributos vinculados en las regiones espectrales entre 750 nm y 1800 nm. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, arc: arcilla, MO: materia orgánica.

-Región espectral, Profundidad de absorción y Banda Central en el espectro entre 350 nm y 750 nm.

En esta región sólo se encontraron formas “cóncavas”, en las transectas S2014 (rastrojo de soja) y M2014 (rastrojo de maíz). Se midieron las formas que previamente se visualizaron como muy evidentes entre 600 nm y 750 nm. Estas concavidades amplias (entre 141 nm y 137 nm de ancho, Cuadro 2.34), son las más profundas del espectro óptico explorado. Aparecen en una alta proporción de las adquisiciones radiométricas, 62 % en S2014 y 42 % en M2014, en todas las diferentes proporciones de cobertura de rastrojos (PCT). Esta región de absorción fue definida con un alto ajuste en todos los puntos medidos, no encontrándose diferencias entre las transectas con distinto rastrojo en la posición de máxima que define la absorción en el espectro. Además el valor de la mediana de la banda central tiene una variación muy pequeña (1 nm) entre estas transectas (Cuadro 2.34).

	S2014		M2014	
	Mínima Posición	Máxima Posición	Mínima Posición	Máxima Posición
Mediana(nm)	604	745	608	745
CV (%)	0,8	0,0	0,5	0,0
R ² *	100%	100%	100 %	100 %
N	141		137	
	Profundidad %			
Mínima	4.1		6.6	
Máxima	24		16.1	
Mediana	7.9		10.1	
	Banda Central nm			
Mediana(nm)	681		682	
CV (%)	0,3		0,1	
R ² **	100 %		100 %	
n	21		14	
PP	62%		42 %	

*Se refiere al porcentaje de mediciones con ajuste superior al 97%

CUADRO 2.34 Regiones de absorción, profundidad y banda central entre 604 nm y 745 nm. N: ancho de cada región de absorción en nanómetros, n: número total de mediciones con absorción > 1%. PP: proporción porcentual de n sobre el total de puntos medidos en cada transecta.

El ACP en S2014 muestra que el limo y la arcilla son las variables de mayor peso en el CP1 (37 % de la variabilidad), En el CP2 (27 % de la variabilidad), las de mayor contribución son la materia orgánica, y la humedad del suelo.

CP	Autovalores			Autovectores		
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2
1	2,21	0,37	0,37	HR	-0,19	0,25
2	1,64	0,27	0,64	HS	3,1E-03	0,60
3	0,96	0,16	0,80	MO	-0,12	0,63
4	0,80	0,13	0,94	ARC	-0,62	0,11
5	0,38	0,06	1,00	LI	0,67	0,07
6	1,9E-05	3,1E-06	1,00	ARE	-0,36	-0,40

CUADRO 2.35. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las firmas entre 350 nm y 750 nm en S2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

El 64 % de las formas más profundas en S2014 (> mediana = 7,3 %) está asociado con los valores más altos de arcilla en la transecta. Todos éstos tienen contenidos altos (> mediana) o intermedios de humedad del rastrojo y /o del suelo. Gráficamente corresponden al grupo de puntos asociados a la arcilla (Fig.2.25). El resto

de las formas más profundas (36 %) está vinculado a contenidos altos de limo (> mediana de la transecta) y gráficamente corresponden a los puntos más próximos a esta variable. El limo y la arcilla, se correlacionan fuerte y negativamente entre sí en el CP1.

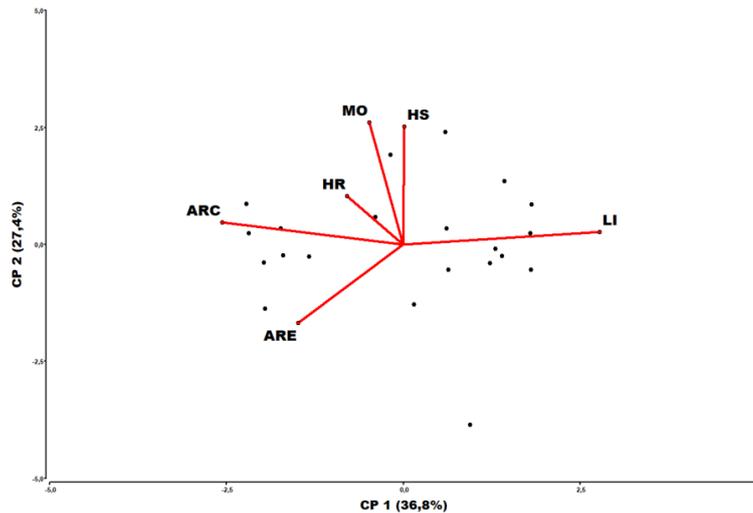


FIGURA 2.25. Biplot de las adquisiciones radiométricas y los atributos medidos en S2014 entre 350 nm y 750 nm. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

En M2014 los tres primeros componentes definen el 85 % de la variabilidad total. El CP1 (41 % de la variabilidad) está definido por la arena y la humedad de suelo, negativamente correlacionado, el limo, con menos peso, aparece correlacionada a la humedad de suelo. El 28% de la variabilidad (CP2) está fundamentalmente dado por la arcilla. El CP3 explica el 15 % de la variabilidad total y está definido casi exclusivamente por la materia orgánica.

CP	Autovalores			Autovectores			
	Valor	Proporción	Prop Acum	Variables	CP1	CP2	CP3
1	2,46	0,41	0,41	HR	0,31	-0,46	-0,04
2	1,71	0,28	0,69	HS	-0,52	0,24	-0,19
3	0,92	0,15	0,85	MO	0,17	0,29	0,91
4	0,59	0,10	0,95	arc	-0,11	0,67	-0,14
5	0,32	0,05	1,00	Li	-0,49	-0,44	0,26
6	2,8E-05	4,7E-06	1,00	ARE	0,59	0,12	-0,21

CUADRO 2.36. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en las firmas entre 350 nm y 750 nm en M2014. CP: componente principal, Prop. Acum: proporción de varianza acumulada. HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, ARE: arena, Li: limo, ARC: arcilla, MO: materia orgánica.

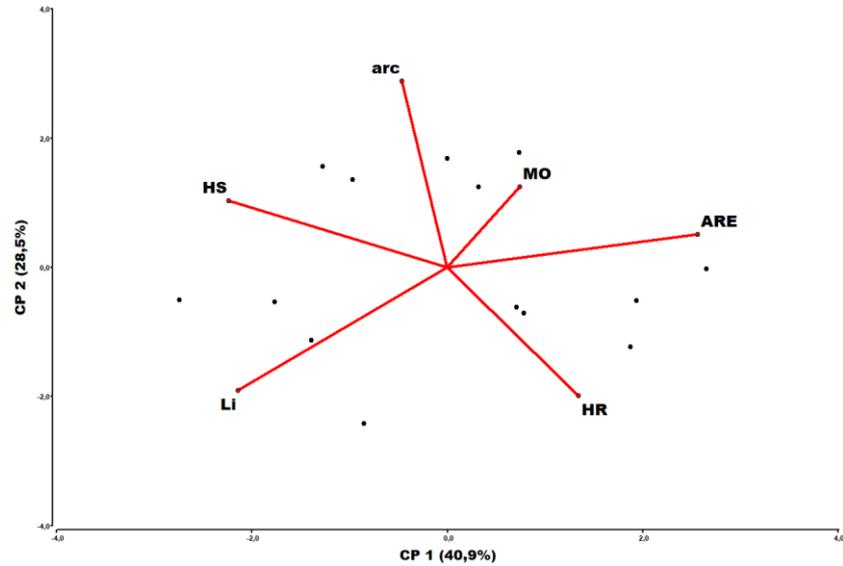


FIGURA 2.26. Biplot de las adquisiciones radiométricas y los atributos medidos en M2014 entre 350 nm y 750 nm. ARE: arena, ARC: arcilla, MO: materia orgánica, HS: humedad de suelo, HR: humedad del rastrojo, LIM: limo.

En M2014 el 57 % de los puntos medidos son profundos con valores superiores a la mediana y se vinculan con puntos con valores de arcilla por encima de la media de la transecta. Dos de estas formas, las más profundas (16,1 % y 15,1 %), tienen además contenidos elevados de materia orgánica, también por encima de la media de la transecta. El resto de estos puntos más profundos tienen además de altos valores de arcilla los contenidos > a la media de humedad de suelo y / o de rastrojo. El 43 % de las concavidades restantes tiene menor profundidad de absorción, y fundamentalmente están vinculados a altos contenidos de arena (> a la media de la transecta). Gráficamente los puntos aparecen ampliamente distribuidos y asociados a más de una variable.

2.4 Discusión

La ubicación de las transectas en diferentes ambientes físicos dio lugar a explorar interacciones entre diversas propiedades de suelos.

Medir un mismo tipo de rastrojo en diferentes campañas agrícolas y establecimientos agropecuarios; permitió evaluar condiciones de variabilidad en atributos de superficie. Habitualmente, estas condiciones están vinculadas a las

disímiles situaciones de manejo que existen en los barbechos que se realizan en la región del sudeste bonaerense. El diseño en transectas puso en evidencia la alta variabilidad en la cobertura dentro de un mismo lote (CV de PCT entre 18,9 % y 37,6 %), y entre lotes en etapas similares de barbecho (pre-siembra).

Estas cuestiones son de importancia en el momento de analizar imágenes satelitales.

Los resultados mostraron gran variabilidad, entre y dentro de las transectas, tanto en las posiciones de la región de absorción, como en la definición de la banda central y de las profundidades de absorción (Cuadros 2.8 a 2.12). En el apéndice A se presentan los gráficos con las firmas espectrales obtenidas en todo el espectro (350 nm -2400nm), se puede observar que la variabilidad en formas de absorción se da en todas las transectas, aún dentro de una misma proporción de cobertura.

2.4.1. Las firmas de la región entre 1950 nm y 2400 nm

2.4.1.1. Formas de absorción: “Concavidades”

La proporción de firmas con estas formas de absorción cóncavas (coincidentes con las formas halladas en las firmas de referencia de rastrojos), fue menor, en ambas transectas con soja, a medida que el porcentaje de cobertura disminuía. Esto es coincidente con Daughtry, 2010, quien lo menciona para rastrojo de trigo. La transecta de rastrojo de maíz, tuvo mayor profundidad de absorción que ambas transectas con soja. No se encontró vinculación entre la profundidad de absorción y la proporción de cobertura (PCT) o la humedad del rastrojo (Figs. 2.11, 2.12 y 2.13). Sólo se encontró asociada a la humedad de la escena (HR y HS) en coberturas ≥ 80 % en las transectas con rastrojo de soja (Fig.2.11). Escenas con coberturas con baja humedad del rastrojo ($< 6, 5$ % en promedio), mostraron similar variabilidad en la profundidad de absorción, que escenas muy húmedas (HR= > 28 % en promedio) (Cuadro 2.10).

La variabilidad encontrada en los resultados entre las tres transectas, se considera que inicialmente está vinculada a la disparidad de componentes en los tres tipos de coberturas medidas (Fig. 2.5, 2.6 y 2.7 y Cuadros 2.2, 2.3 y 2.4). En segundo término, está influenciada por las condiciones del barbecho en cada escena.

La absorción en los intervalos medidos, es atribuida a componentes químicos presentes en los rastrojos (Nagler 2000; Daughtry 2001, 2004 y 2010; Serbin 2009). Resultan de la superposición de los espectros de absorción de moléculas de celulosa y hemicelulosa (entre 2023 nm y 2179 nm), y de lignina entre 2287 nm y 2373 nm. Las regiones espectrales halladas en los resultados se aproximan a las obtenidas por numerosos investigadores en condiciones controladas en laboratorio (Cuadro 2.5).

La biomasa de los rastrojos (polímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina) varía entre las diferentes especies, en las distintas partes de las plantas y durante su transformación sobre el suelo según las condiciones ambientales presentes (stress hídrico, nichos microbianos, temperatura) (Bajpai 2016).

El rastrojo de soja es sensiblemente superior con respecto a maíz, en el contenido de lignina e inferior en hemicelulosa (Isikgor y Becer 2015; Liu et al. 2015). La ausencia de absorción en maíz (M2014) en el rango 2285 nm a 2373 nm, primariamente se puede vincular con la baja proporción de lignina que contiene este rastrojo en relación al de soja.

La composición de la cobertura de S2017 es pura en rastrojo de soja, mientras que en S2014 coexisten en alta proporción rastrojos de soja, maíz y cebada (Fig. 2.5, 2.6 y 2.7), siendo estos dos últimos más ricos en hemicelulosa que soja.

REGIÓN ESPECTRAL(nm)	CROMÓFORO	REFERENCIA
2020-2255	Trehalosa	Giufrida, 2017
2090	Hemicelulosa	Elvidge, 1990
2050-2140	Lignina	Elvidge, 1990
2080-2092	Celulosa/Hemicelulosa	Schwanninger, 2011
2100	Celulosa	Nagler, 2000 Daughtry, 2004
2110	Celulosa	Schwanninger,2011
2134	Lignina	Schwanninger,2011
2137	Polisacáridos	Viscarra-Rossel, R. y Behrens, T., 2010
2170-2178	Celulosa/Hemicelulosa	Schwanninger,2011
2200	Lignina	Schwanninger,2011
2260	Hemicelulosa	Elvidge 1990
2280	Celulosa	Elvidge 1990
2270	Lignina	Elvidge 1990
2270-2291	Celulosa/Hemicelulosa	Schwanninger,2011
2300	Lignina	Nagler 2000 Daughtry, 2001, 2004
2328	Hemicelulosa	Schwanninger,2011
2330	Lignina	Elvidge 1990
2380	Lignina	Elvidge 1990
2381	Carbohidratos	Viscarra-Rossel, R. y Behrens, T. 2010

CUADRO 2.47 Regiones de absorción de cromóforos químicos de los rastrojos.

Investigaciones en el campo de la bioquímica de alimentos han demostrado que distintos azúcares se acumulan durante la deshidratación de las plantas para proteger macromoléculas y membranas celulares, como mecanismo de tolerancia a la desecación (Zhang et al. 2016). En este sentido, un disacárido ampliamente mencionado es la “trehalosa”, detectado en rastrojos con determinadas condiciones ecológicas (stress, sequía), y también debido a la ocurrencia de procesos bioquímicos durante la

descomposición de rastros (Elbein et al. 2003; Figueroa Soto et al. 2004; Szabados et al. 2011).

Por otro lado, el espectro de absorción del agua líquida en el infrarrojo se vincula a una amplia banda en el rango de 2000 nm a 2500 nm, centrada cerca de 2130 nm. Esta región es denominada “Water Association Band” (WAB) debido a que guarda una dependencia considerable sobre el entorno de las moléculas de agua. Es una región espectralmente, sumamente compleja, ya que suministra información tanto de los modos vibracionales de la estructura intermolecular del agua, como de las vibraciones vinculadas con grupos no pertenecientes a moléculas de agua (por ej. de enlaces en diferentes azúcares). La forma e intensidad de las firmas en esta región tienen una alta dependencia con las propiedades de los solutos acuosos existentes en las superficies agrícolas, como carbohidratos y soluciones salinas (Verma et al. 2017; Giuffrida et al. 2017).

Giuffrida et al. 2017 han identificado cinco bandas de absorción vinculadas a diferentes “poblaciones de moléculas de agua” en la región del WAB. Estos autores mostraron una dependencia considerable entre estas “poblaciones de moléculas de agua” con los distintos comportamientos (hidratación y cristalización) que las moléculas de trehalosa adquieren en respuesta a cambios en el medio ambiente. En el Cuadro 2.5, se muestra que las bandas de absorción de la trehalosa son muy cercanas a algunas bandas encontradas para la hemicelulosa.

En función de estos hallazgos se asume que, en gran medida las diferencias de absorción encontradas entre coberturas de rastrojo están vinculadas a una disímil concentración de trehalosa y hemicelulosa en sus componentes.

Un supuesto que se infiere de los resultados obtenidos entre las transectas con cobertura de soja, es que una superposición de las regiones de absorción de

hemicelulosa y probablemente trehalosa, “amortigüen” en S2014, la absorción de la celulosa disminuyendo su profundidad. Mecanismos de superposición de bandas de absorción espectralmente cercanas son ampliamente comentados en Curran 1989 y Clark 1999, y fueron brevemente mencionados en el punto 1.2.2.y Fig. 1.3.

Daughtry 2010, estudiando la respuesta espectral de rastrojo de trigo en descomposición, encontró que la celulosa y la hemicelulosa disminuían con el aumento en la tasa de descomposición, y que en consecuencia disminuía la profundidad de absorción en la región vinculada a la celulosa durante este proceso.

La duración de los barbechos en las tres coberturas, fue diferente y con condiciones de manejo y de descomposición variables (Ítem 2.3.1), lo contribuye al entendimiento de los resultados. El lote con rastrojo de maíz tuvo un barbecho con una duración de 5 meses. La totalidad de las firmas de la transecta M2014 presentaron los mayores valores en profundidad de absorción y los menores coeficientes de variación en la definición de sus regiones de absorción (Cuadros 2.8 y 2.10). Las firmas de ambas transectas de soja tuvieron similares valores de profundidad de absorción, pero en menor número de firmas en S2017 que en S2014. A su vez, S2017 tuvo mayores coeficientes de variación en la definición de sus regiones de absorción y de la banda central (Cuadros 2.8 y 2.10). El lote con rastrojo de soja, donde se midió la transecta S2017, tuvo 6 meses de barbecho y el lote donde se midió S2014 tuvo 3 meses y 20 días. Si bien en S2014 la duración del barbecho fue algo menor a la mitad en meses, que en S2017, la composición de la cobertura fue diferente. En S2017 la cobertura sólo fue rastrojo de soja, mientras que en S2014 coexistieron en alta proporción rastrojos de soja, maíz y cebada. La cebada estuvo expuesta a las diferentes condiciones ambientales de cultivo posterior y del barbecho por un lapso de 10 meses. El maíz presente en la

cobertura de S2014 estuvo expuesto a las diversas particularidades ambientales de barbechos y cultivos posteriores, durante 17 meses.

En resumen se considera que, la heterogeneidad existente en relación a tipos de rastrojos en cada transecta, la diferente composición química de éstos, y la variabilidad en los procesos de descomposición, vinculada al tiempo de barbecho y a los micro - ecosistemas existentes en cada transecta, constituyen los factores que contribuyeron a las diferencias de absorción comentada en los resultados.

2.4.1.2. Formas de absorción: “Picos”

-Alrededor de 2000 nm

La materia orgánica es el parámetro del suelo que en las tres transectas tuvo vinculación con la profundidad de absorción (picos más profundos en los puntos con más altos valores de materia orgánica). Los valores promedios más altos de materia orgánica entre las tres transectas, se midieron en S2014 (Cuadro 2.5), esto dificulta explicar la existencia de tan escasa cantidad de puntos (12 %) que mostraron profundidad de absorción en esta transecta. Stenberg 2010 et al., citan varios investigadores que atribuyen la región de alrededor de 2000 nm como vinculada a materia orgánica, y manifiestan, que además, otras moléculas orgánicas e inorgánicas pueden absorber en esta región. Ben-Dor y Banin 1995, sugieren que el estado de transformación de la materia orgánica también influye en esta región del espectro, estableciendo diferencias entre materia orgánica más o menos humificada. La historia del lote en donde se ubicó la transecta S2014 revela una trayectoria más conservacionista, en relación al manejo del suelo, que en los lotes correspondientes a las transectas S2017 y M2014. Este aspecto, vinculado con el manejo de las coberturas y del barbecho (ítem 2.3.1), determina que entre sitios sea muy factible la existencia de disímiles proporciones de las diferentes fracciones de materia orgánica. Esta premisa

permite explicar en gran medida las variaciones de comportamiento espectral observadas entre las tres transectas.

Stenberg et al. 2010 indican que la humedad del rastrojo es un amortiguador de la reflectancia incidiendo negativamente en la profundidad de absorción. La transecta con rastrojo de maíz (M2014) fue la que presentó la mayor cantidad de puntos (70 %) con absorción en esta región. Esta transecta además tuvo los mayores valores de profundidad de absorción, con una mediana del 3,1 %, frente a 1,5 % en S2017 y 1,3 % en S2014 (Cuadro 2.12). Los contenidos medios de humedad del rastrojo son bajos y no muy diferentes en las transectas con rastrojo de soja (5,4 % para S2017 y 6,4 % en S2014, Cuadro 2.5), pero elevados en la transecta con rastrojo de maíz (M2014, HR = 22,4 %). En el ACP de esta región se encontró que en S2017 sólo el 48 % de la varianza (Cuadro 2.13) y en S2014 (Cuadro 2.14) sólo el 32 % está fundamentalmente definido por la materia orgánica y la humedad del rastrojo, negativamente correlacionados. En cambio en M2014 (Cuadro 2.15) la materia orgánica define los tres primeros componentes (73 % de varianza total) con una correlación positiva con la humedad del rastrojo en el CP1 y CP2 y negativa en CP3. De acuerdo a los resultados obtenidos el efecto de “amortiguación” de la profundidad de absorción generado por la humedad del rastrojo se considera factible que ocurra tanto en escenas secas como húmedas. Estos resultados muestran además, como las interrelaciones de los distintos atributos pueden controlar la profundidad de absorción.

-Alrededor de 2200 nm

Ben Dor y Banin, 1995; Ben Dor y Epema, 1997; encontraron una fuerte relación entre los grupos oxhidrilos del agua adsorbida a las arcillas y el pico alrededor de 2200 nm. Castaldi et al. 2015, además vincula esta banda con las uniones de metales (Fe y Al) a los grupos oxhidrilos de las láminas de arcillas. Daughtry et al. 2010 y

Castaldi et al. 2015, concluyen que el incremento en el porcentaje de humedad de suelo y de rastrojo, atenúa la profundidad del pico. Estas consideraciones permiten pensar por qué no se observó este pico de absorción en M2014 (alta humedad, y bajo contenido de arcilla). Los resultados logrados en relación a las transectas con rastrojo de soja, también mostraron como estos parámetros (granulometría-humedad) se interrelacionan. Los picos con profundidad > 1 % sólo se encontraron en un escaso número de puntos medidos y exclusivamente en S2017 (Cuadro 2.16). Estos puntos tienen altos valores de humedad del suelo, del rastrojo y de limo. El ACP mostró que la humedad del suelo define la mayor proporción de varianza total explicada en los dos primeros componentes (Cuadro 2.17). Este parámetro se correlaciona negativamente con la arcilla en ambos componentes y positivamente con el limo en el CP1. La humedad del rastrojo sólo aporta al CP1 y está negativamente correlacionada con el limo.

2.4.2. Las firmas espectrales entre 750 nm y 1800 nm

No se encontró vinculación entre las bandas de absorción con formas similares a “picos” y el tipo de rastrojo (soja o maíz). Estos resultados no son coincidentes con Zhang et al. 2012, quienes concluyen que el rango comprendido entre 920 nm y 967 nm es exclusivamente observable en residuos de soja, determinando como la única región en la cual es factible diferenciar de trigo y maíz los residuos de soja.

Los componentes granulométricos definieron fuertemente la profundidad de absorción en ambas formas (picos y cóncavas) en las transectas S2017 (con rastrojo de soja) y en M2014 (con rastrojo de maíz). En cambio en S2014 (rastrojo de soja), además de los componentes granulométricos, la materia orgánica y humedad de suelo incidieron en la profundidad de absorción. En las formas cóncavas de las firmas de esta transecta, la humedad del suelo tuvo mayor incidencia en la profundidad de absorción que los componentes granulométricos.

Todas las transectas tuvieron diferentes valores (mediana, máximo y mínimo) de profundidad de absorción, siendo S2014 la de menor profundidad de absorción en ambas formas (picos y cóncavas) entre las tres transectas. El análisis de componentes principales mostró que dentro de una misma transecta, la correlación entre los atributos medidos incide y modifica la profundidad de absorción. Las fuertes correlaciones que tienen los componentes granulométricos entre sí y con la humedad (rastreo o suelo), explican en gran medida la variabilidad encontrada en la profundidad de absorción entre transectas. Es importante recordar que la concentración de los componentes granulométricos en cada transecta es diferente, lo que contribuye aún más a la variabilidad encontrada. S2017 tiene la mayor proporción de observaciones con los contenidos más elevados de limo y arcilla, mientras que M2014 la mayoría de las observaciones tienen los más altos contenidos de arena y los más bajos de arcilla (Fig.2.8, ítem 2.3.2). El limo se correlacionó negativamente con la arcilla en S2017, o con la arena en M2014.

Baumgardner et al 1985 citan otros investigadores quienes encontraron que dentro de las partículas granulométricas del suelo, el limo, debido a su tamaño, es el parámetro que más significativamente explica la variación espectral en suelos. Esto aclara en gran medida por qué S2017 fue la transecta que tuvo el más alto % CV en la definición de las posiciones de mínima y máxima en el espectro que definen la absorción.

2.4.3. Las firmas espectrales entre 350 nm y 750 nm

Sólo las transectas S2014 y M2014 presentaron absorción en esta región. Esta forma cóncava se encontró en una alta proporción de observaciones con la particularidad de que sus profundidades de absorción presentaron los mayores valores con respecto a todas las formas que se han medido en esta tesis.

La arcilla y el limo fueron los componentes granulométricos más vinculados a la profundidad de absorción, y la materia orgánica el parámetro biológico también más asociado con la profundidad de absorción. Todas las observaciones profundas presentaron altos contenidos de humedad de suelo y/o de rastrojo. El ACP mostró que estos dos últimos parámetros se correlacionan, negativa, o bien positivamente, con las partículas granulométricas que mayor asociación tuvieron en cada componente principal y positivamente con la materia orgánica. Esto conduce a entender por qué, S2017 no presentó absorción en esta región espectral. Esta transecta es la de más baja humedad del rastrojo y contenidos de materia orgánica, a pesar de tener altos contenidos en alguno de los componentes granulométricos citados (limo y arcilla). Baumgardner et al. 1985 y Coleman et al. 1991, encontraron en laboratorio una región espectral, algo más estrecha (entre 500 nm y 600 nm) vinculada al limo. Viscarra et al 2011, determinó una banda de 730 nm vinculada a la materia orgánica.

2.5. Conclusiones

En este capítulo mediante radiometría de campo se caracterizó la respuesta espectral de superficies agrícolas con distintas condiciones de rastrojo en superficie y propiedades de suelo. Se aislaron, midieron y analizaron formas de absorción en firmas espectrales obtenidas lo cual permitió responder preguntas de investigación planteadas como las siguientes:

-¿Cuáles regiones espectrales permiten discriminar los diferentes tipos de rastrojos presentes en los sitios bajo estudio? ¿En cuáles regiones puedo obtener información sobre las propiedades de los suelos?

Las formas de absorción debidas a la presencia de rastrojos solamente son observadas en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR). Formas más estrechas, “picos”, también detectadas en esta región del infrarrojo, están vinculadas a propiedades

del suelo, fundamentalmente la arcilla, materia orgánica y humedad (de suelo y rastrojo). Entre 750 nm y 1800 nm las formas de absorción aisladas están fundamentalmente vinculadas a los componentes granulométricos. En la región del visible, la arcilla, el limo y la materia orgánica son los componentes del suelo más vinculados con la profundidad de absorción.

-¿Ejercen influencia en la reflectancia de los suelos, las interacciones entre los atributos de superficie (propiedades de los suelos y características de los rastrojos)?

El tipo de rastrojo, la composición de la cobertura remanente post-cosecha y el estado de descomposición de dicha cobertura remanente, influyen en la presencia y/o profundidad de las bandas específicas de absorción de los rastrojos en el infrarrojo de onda corta. Las fuertes correlaciones que tienen los componentes granulométricos entre sí, y con la humedad (rastrojo o suelo), inciden en la variabilidad de la profundidad de absorción en el VIS-NIR.

-¿Bajo qué proporción de cobertura de rastrojo es factible observar la respuesta espectral exclusivamente aportada por las propiedades del suelo?

Tanto en el VIS-NIR como en el SWIR, el tipo y proporción de cobertura de rastrojos (PCT), no incide en la presencia de bandas de absorción vinculadas a propiedades de suelo como, composición granulométrica y materia orgánica.

CAPÍTULO 3. Comportamiento de la línea de suelos en superficies agrícolas en barbecho conservacionista

3.1. Introducción

Desde el lanzamiento del satélite Landsat 1 MSS en 1972, numerosas fórmulas se han desarrollado para predecir, en imágenes satelitales por medio de un simple valor, la presencia de vegetación, o bien de “mezclas” complejas de vegetación y suelo. La mayoría de estas expresiones se basan en cocientes, sumas, o bien, en diferencias matemáticas de la información obtenida (cualitativa o cuantitativamente) desde bandas espectrales específicas. A dichas fórmulas se las suelen denominar “índices espectrales”.

Kauth y Thomas (1976) usando la técnica de ortogonalización secuencial produjeron una transformación ortogonal a un nuevo espacio de 4 dimensiones de los datos originales de observaciones de regiones con cultivos en Landsat MSS. Esta transformación se basó en el principio de que las correlaciones existentes entre bandas del visible y del infrarrojo del MSS causan información relacionada con el suelo y la vegetación. Estos investigadores concluyeron que la distribución de los datos espaciales de reflectancia de suelos está reducida a una “línea de suelos” en un análisis de dos espacios o a un plano en un análisis de cuatro dimensiones. El primer componente del análisis en cuatro dimensiones de esta transformación conocida como “Tasseled Cap”, fue denominado “brillo”, y asociado al suelo desnudo. El segundo componente, ortogonal al anterior, fue denominado “verdor”, asociado con la vegetación viva (cultivo). Por último, el tercer componente, ortogonal a los dos primeros, se asoció al agua. Se encontró que los demás componentes adicionales contenían el ruido, y las influencias atmosféricas de la imagen como nubes, niebla, diferencias de ángulo solar.

Los tres primeros componentes de la imagen transformada contenían cerca del 97 por ciento de la información disponible en la imagen Landsat MSS.

Crist y Cicone (1984a), observaron que la información producida por medio del uso del Tasseled Cap tenía una asociación directa con las características físicas de campos agrícolas. Debido a esto, compararon los datos que se utilizaron con MSS (4 bandas) y los llevaron a un espacio de mayores dimensiones. Para este fin, simularon las seis bandas de TM con la intención de usar estos datos como un todo, más que comparando bandas específicas. Si bien encontraron en el plano del “verdor” equivalencias entre ambos sensores, no observaron la misma respuesta en el plano de “suelos” (brillo). Atribuyeron estas diferencias a la presencia de las dos bandas de TM en el infrarrojo, que no están en MSS. Concluyeron que estas nuevas bandas proveían una, y posiblemente dos, nuevas dimensiones a los datos. Luego en un trabajo experimental, Crist y Cicone (1984b), determinaron que sus mediciones con datos de TM ocupaban tres dimensiones, dos equivalentes a MSS (verdor y brillo), y la tercera (influenciada por las bandas del infrarrojo del TM) estaba relacionada con propiedades del suelo, incluyendo humedad de suelo.

La línea de suelos fue definida conceptualmente, como una relación linear existente entre la reflectancia del visible y del infrarrojo en suelos desnudos (Baret et al. 1993).

Este concepto de línea de suelos ha sido utilizado extensivamente en la interpretación de datos obtenidos desde sensores remotos. Especialmente en sensores Landsat para caracterizar la vegetación verde fotosintéticamente activa o bien el efecto del suelo en escenas parcialmente vegetadas (Jasinski y Eagleson, 1989; Gitelson et al. 2002; Xu y Guo, 2013; Ahmadian et al.2016).

Luego de una década de haber introducido la transformación “Tasseled Cap”, Crist y Kauth 1986, en un crítico informe sobre la incorrecta aplicación de dicha transformación por parte de la comunidad que utiliza sensores remotos, desmitificaron su aplicación. Sustentaron que la base fundamental de la transformación Tasseled Cap supone “**encontrar estructuras de datos dentro de un sensor particular y un set particular de clases de escenas”**. Hay una buena razón para pensar que puede ser empleado en áreas geológicas o urbanas u otras aplicaciones. Por ende, puede ser usado en enfatizar sobre **estructuras inherentes**, bastante más, que para alguna aplicación particular.

Huete et al. 1984, con un enfoque orientado a discriminar la evolución fenológica de los cultivos y la incidencia del suelo en dicha discriminación, calculó los cambios que ocurrían en la línea de suelos, en dos dimensiones, en veinte suelos desnudos con diferentes propiedades físicas y químicas. Como resultado, cuestionó la existencia de una línea de suelos “única” que abarcara un amplio rango de tipos de suelos y de condiciones de superficie. Concluye que es necesario crear una línea propia para diferentes regiones, debido a que la variabilidad existente en suelos, sobreestima, o subestima, el resto de los componentes de una escena con cultivos.

Dado que la investigación hasta el presente ha sido orientada a escenarios con vegetación fotosintéticamente activa. Considerando además, que la respuesta espectral de las superficies con rastrojos está asociada a diferentes regiones del infrarrojo como también al visible (capítulo 2 de esta tesis). Es factible hipotetizar que la óptima linealidad de los suelos bajo análisis, puede encontrarse en el entorno de bandas espectrales diferentes a las exploradas hasta el presente en la bibliografía de sensores remotos.

El objetivo de este capítulo es definir la línea de suelos en superficies con rastrojos y analizar su comportamiento ante diversas combinaciones de atributos en diferentes escenarios. Se buscará resolver los siguientes interrogantes:

- ¿En cuál combinación de bandas es factible discriminar suelo desnudo de superficies con rastrojos?
- ¿Afectan los atributos de superficie y las propiedades del suelo el ajuste de la línea de suelos?

3.2. Materiales y métodos

El análisis se fundamentó en examinar el comportamiento espectral de dos condiciones de superficie contrastantes, una con suelo totalmente desnudo y otra con la presencia de rastrojos en superficie. Mediante la exploración de diferentes combinaciones de bandas espectrales se basó en parte en información obtenida a partir de los datos de las dos transectas con rastrojo de soja en superficie, S2014 y S2017, descritas en el ítem 2.2.3.

➤ Base de datos radiométricos

Los datos espectrales representativos de la condición de suelo desnudo (SD), se obtuvieron en laboratorio. El otro grupo de datos representativo de la situación de rastrojo en superficie (SCR) (104 observaciones) correspondió a los obtenidos a campo en las transectas S2014 y S2017.

- Datos espectrales obtenidos en laboratorio (SD)

Se tomaron 17 adquisiciones representativas de suelo desnudo (SD) en laboratorio. Para este fin se confeccionó una “Caja Negra” (Dark Box) (Fig. 3.1.c) de acuerdo al diseño y dimensiones descritos en Ben Dor, 2013, y que se comenta a continuación:

Se utilizó el radiómetro descrito en el ítem 2.2.4 del capítulo 2, detectando la energía reflejada en un diámetro de FOV de 4,5 cm (Fig. 3.1.e). La geometría de toma, acorde con lo propuesto en la bibliografía citada, ubicó el sensor en forma vertical orientado al centro de la muestra y distante a 10 cm de la plataforma donde se situaron las muestras. Como fuentes de luz, se emplearon dos lámparas halógenas (OSRAM 20W HALOSPT 48mm 6y4) posicionadas a cada lado de la caja a una distancia de 19 cm del centro de la muestra y con una inclinación de 45°. Se usó una placa “Spectralon” ® cuadrada de 10 cm de lado como referencia de irradiancia y espectro de calibración, el cual se registró antes de la toma de cada muestra.

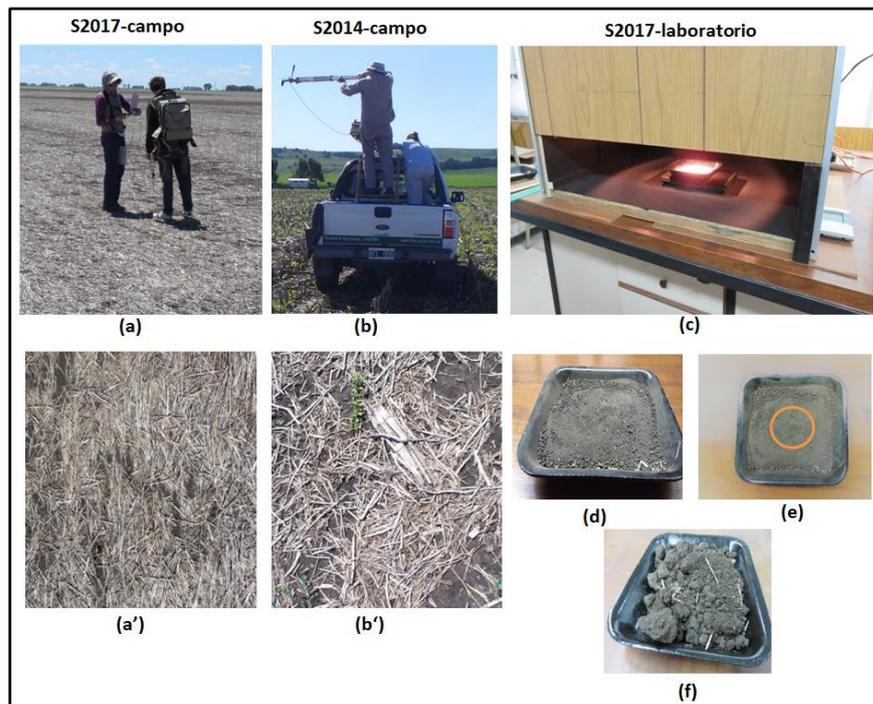


FIGURA 3.1 Adquisiciones radiométricas a campo y en laboratorio. (a): medición a campo a pie, año 2017; (a') detalle de la cobertura en S2017; (b) medición sobre camioneta, año 2014; (b') detalle de la superficie en S2014; (c) caja negra; (d) muestra de suelo seco, tamizado; (e) diámetro de FOV en la muestra anterior; (f) muestra de suelo húmedo, sin tamizar.

Las muestras se dispusieron en bandejas de color negro de similar tamaño al Spectralón, con una profundidad de alrededor de 2 cm. Se tomaron 5 réplicas de espectros por muestra (Fig. 3.1. d, e, f). La humedad y temperatura ambiente durante

todo el procedimiento oscilaron entre 57 % y 58 % y entre 22,2 °C y 22,3 °C, respectivamente.

El procedimiento fue acorde al protocolo y estándares generados por la Universidad de Tel Aviv , Israel, y CSIRO, Perth, Australia, como base para la normalización global de espectros (Ben Dor, 2013; 2015).

Doce de las adquisiciones en laboratorio se realizaron sobre muestras de suelo desnudo secado al aire y tamizado, obtenidas en la campaña 2014 y archivadas. Las cinco adquisiciones restantes se ejecutaron sobre suelo desnudo, fresco, sin tamizar (con agregados), secado al aire sólo 24 horas, correspondientes a la transecta S2017. Estas muestras al momento de la medición en laboratorio aún contenían humedad, por ende se midió humedad gravimétrica encontrando, en la mayoría, incrementos en su contenido de humedad con respecto a la medición al momento de extraída a campo (Cuadro 3.1).

LABORATORIO MUESTRA	PUNTO y TRANSECTA A CAMPO	HUMEDAD (%) *	HUMEDAD (Δ %) **	FECHA ADQUISICIÓN CAMPO	FECHA ADQUISICIÓN LABORATORIO
S14Lab 5	P5-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 6	P6-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 7	P7-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 8	P8-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 9	P9-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 10	P10-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 11	P11-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 12	P12-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 13	P13-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 14	P14-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 15	P15-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S14Lab 16	P16-S2014	Seco	-	30-oct-2014	17-nov -2017
S17 Lab17	P26-T2-S2017	21,7	-0.2	16-nov -2017	17-nov -2017
S17 Lab36	P41-T4-S2017	23,2	+4.6	16-nov -2017	17-nov -2017
S17 Lab37	P42-T4-S2017	25,6	+7.2	16-nov -2017	17-nov -2017
S17 Lab38	P43-T4-S2017	22,4	+1	16-nov -2017	17-nov -2017
S17 Lab41	P46-T4-S2017	26,3	+10,2	16-nov -2017	17-nov -2017

* Humedad de las muestras al momento de la medición en la caja negra. ** Variación de humedad (Δ %) en las muestras secadas al aire con respecto a la humedad medida luego de extraída a campo

CUADRO 3.1: Correspondencia entre las muestras de suelo utilizadas en laboratorio y las mediciones a campo. Denominación de las muestras utilizadas en laboratorio y de los puntos de muestreo a campo (1° y 2° columna respectivamente).

➤ Atributos de superficie

Las mediciones de los atributos de superficie fueron realizadas a campo en las transectas S2014 y S2017 y descriptas en el ítem 2.3.1.

➤ Secuencia metodológica (Fig.3.2)

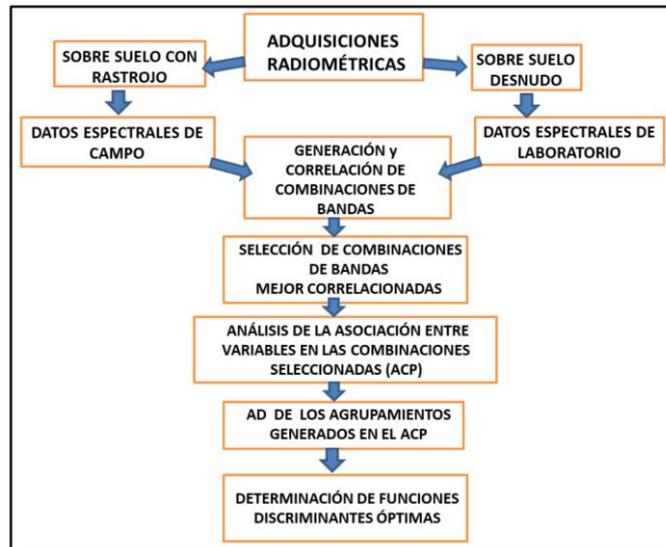


FIGURA 3.2 Diagrama de pasos realizados. AD: análisis discriminante, ACP: análisis de componentes principales

- Generación, correlación y selección de combinaciones de bandas

De los datos radiométricos adquiridos se seleccionaron las reflectancias correspondientes a las bandas centrales de siete de las regiones de absorción analizadas en el capítulo 2. Dos que mostraron absorción vinculada a los rastrojos en las transectas de campo, con banda central en 2083 nm y otra con banda central en 2336 nm (Cuadros 2.10 y 2.11). Cuatro regiones en el infrarrojo que fundamentalmente brindan información sobre la granulometría de los suelos, bandas centrales 935 nm, 1006 nm, 1125 nm y 1190 nm (Cuadros 2.23, 2.28, 2.24, 2.29 respectivamente). Una región de absorción en el visible vinculada también a la granulometría y además a la humedad del suelo en las transectas de campo, con banda central en 681 nm (Cuadro 2.34). Se adicionaron además las reflectancias de la absorción en el visible del suelo desnudo de referencia (Cuadro 2.19), centrada en 507 nm y una región de absorción en el infrarrojo,

correspondiente al rastrojo puro de soja de referencia, centrada en 1485 nm (Cuadro 2.18).

Se agruparon las 9 bandas centrales antes mencionadas en combinaciones pares y se correlacionaron. La valoración de la asociación entre bandas mediante un análisis de correlación, permite establecer la intensidad de linealidad entre las mismas. De este modo, la mayor linealidad entre espectros asegura la predictibilidad de la línea de suelos. Bajo este supuesto se seleccionaron las combinaciones con las correlaciones más altas.

- Análisis de la asociación entre variables en las combinaciones de bandas seleccionadas (ACP)

De acuerdo a lo obtenido en el capítulo 2, los atributos de superficie medidos en las transectas contribuyeron de manera diferente en la profundidad de absorción en el entorno de cada región espectral. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP), con los datos espectrales (laboratorio y campo) y los atributos medidos, en el ámbito de las combinaciones de bandas mejor correlacionadas, para conocer la contribución de todos los atributos a la variabilidad de la respuesta espectral.

Con esta información se exploró gráficamente la viabilidad de lograr agrupamientos de suelo desnudo y de rastrojo. Los gráficos permitieron visualizar las asociaciones entre las variables, cuando éstas están fuertemente vinculadas entre sí.

- Análisis discriminante de los agrupamientos generados en el análisis de componentes principales

Este análisis permitió medir la separabilidad de los grupos generados gráficamente en el análisis de componentes principales mediante combinaciones lineales de las variables para todas las combinaciones de bandas. Genera funciones canónicas que minimizan la probabilidad de agrupar erróneamente las observaciones en

los grupos predefinidos y evalúan la separabilidad de éstos. Para este análisis se establecieron criterios de agrupamiento basados en los resultados obtenidos en el análisis gráfico de los componentes principales.

- Determinación de funciones discriminantes óptimas

Se determinaron las funciones discriminantes óptimas para separar suelo desnudo de suelo con rastrojo, identificando las mejores funciones canónicas para cada una de las dos transectas con rastrojo de soja (S2014 y a S2017).

3.3 Resultados

3.3.1. Correlación de combinaciones de bandas centrales

De las 81 combinaciones posibles a partir de las 7 bandas centrales elegidas (ítem 3.2), se seleccionaron nueve con correlaciones ≥ 92 % para S2014, y doce con correlaciones ≥ 99 % para S2017 (Cuadros 3.2 y 3.3, respectivamente). Para las regiones espectrales se consideraron las denominaciones utilizadas en sensores remotos. Las matrices de correlación se muestran en el apéndice B, capítulo 3 ítem I.

En S2014 los coeficientes de correlación varían entre las diferentes combinaciones de bandas, aunque con pequeñas diferencias. La correlación más elevada, con una relación totalmente lineal, se da solamente entre las bandas del infrarrojo de onda corta. En el visible y en NIR/SWIR es donde se dan las más bajas correlaciones (Cuadro 3.2).

En S2017 todas las correlaciones son muy elevadas. A diferencia de S2014, tanto en el visible, como en el infrarrojo cercano (NIR-SWIR), hay relaciones totalmente lineales (Cuadro 3.3).

Si bien en S2014 hay mayor variabilidad en los coeficientes de correlación que en S2017, en todas las combinaciones seleccionadas el ajuste es lineal y altamente

significativo independientemente de las características de las superficies en ambas escenas.

REGIONES ESPECTRALES*	BANDAS CENTRALES (combinaciones)	SD y SCR (Coeficiente de correlación)
VIS/VIS	507/681	0.94
NIR/NIR	935/1006	0.95
NIR/NIR	1006/1125	0.97
NIR/NIR	1006/1190	0.97
NIR/NIR	1125/1190	0.98
NIR/ SWIR	1190/1485	0.92
SWIR/SWIR	2083/2336	1
SWIR/SWIR	1485/2083	0.97
SWIR/SWIR	1485/2336	0.95

*Denominaciones empleadas en sensores remotos

CUADRO 3.2. Coeficientes de correlación entre reflectancias en observaciones de suelo desnudo (SD) y con rastros (SCR) para los datos de S2014. VIS: visible, NIR: infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta.

REGIONES ESPECTRALES*	BANDAS CENTRALES (Combinaciones)	SD y SCR (Coeficiente de correlación)
VIS/VIS	507/681	1.0
VIS/NIR	681/935	0.99
VIS/NIR	681/1006	0.99
NIR/NIR	935 /1006	0.99
NIR/NIR	935/1125	1.0
NIR/NIR	935/1190	0.99
NIR/NIR	1006/1125	0.99
NIR/NIR	1006/1190	0.99
NIR/NIR	1125/1190	0.99
NIR/ SWIR	1125/1485	0.99
NIR/ SWIR	1190/1485	0.99
SWIR/SWIR	2083/2336	1.0

*Denominaciones empleadas en sensores remotos

CUADRO 3.3. Coeficientes de correlación entre reflectancias en observaciones de suelo desnudo (SD) y con rastros (SCR) para los datos de S2017. VIS: visible, NIR: infrarrojo cercano, SWIR: infrarrojo de onda corta.

En la Fig.3.3 se muestran los gráficos de dispersión de las reflectancias de ambas transectas, en el entorno de las combinaciones seleccionadas. La distribución de las observaciones en S2014 evidencia una mayor dispersión en todas las combinaciones en relación a S2017. En S2014 el grupo de observaciones de suelo desnudo (SD) se separa apreciablemente en origen, del grupo de suelo con rastrojo (SCR) en las

combinaciones de bandas del VIS / SWIR y VIS / NIR y en algunas NIR/SWIR. En la Fig.3.3 se señalan con elipses, a modo de ejemplo, algunos de los grupos de las observaciones con suelo desnudo en ambas transectas.

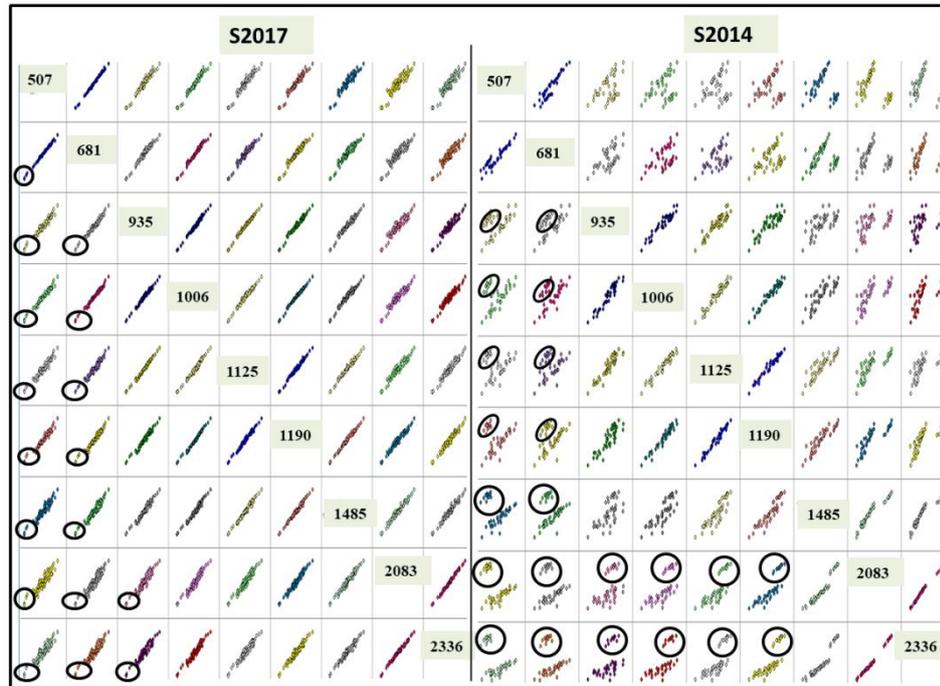


FIGURA 3.3. Dispersión de las reflectancias de las observaciones (SD y SCR) para las combinaciones de bandas seleccionadas. SCR: suelo con rastrojo. Los círculos señalan el grupo de observaciones de suelo desnudo (SD)

3.3.2. Análisis de Componentes Principales entre variables en las combinaciones de bandas seleccionadas

La variabilidad total de todas las mediciones (SD y SCR) se define en 7 componentes principales en S2017 y en 6 CP en S2014. La mayor información, entre 75 % y 76 % de la variabilidad total en S2017, y entre 77 % y 85 %, en S2014, la otorgan los tres primeros componentes en ambas transectas.

En S2014 todas las variables consideradas aportan a la variabilidad en los tres primeros componentes, las correlaciones cambian según las combinaciones espectrales. En el CP1 las variables más correlacionadas en todas las combinaciones de bandas son la proporción de cobertura total (PCT), la humedad del rastrojo y del suelo (HR) (HS), y las reflectancias. Salvo en las bandas del visible la arcilla también contribuye a la

varianza definida por el CP1 y además al CP2 en todas las combinaciones, pero con menos peso que las demás variables (Cuadro 3.4).

Región espectral	Bandas	CP1			CP2			CP3		
	Combinaciones	P	V	C	P	V	C	P	V	C
VIS /VIS	507/681	42	PCT HR HS 507 681	0,93 0,88 0,95 0,83 0,60	23	arc Li	-0,87 0,88	15	ARE	0,88
NIR/NIR	935/1006	40	PCT HR HS arc 935 1006	0,77 0,90 0,88 0,61 0,55 0,69	19	arc Li ARE	-0,64 0,88 -0,61	17	935 PCT	0,82 0,50
	1006/1125	44	PCT HR HS arc 1006 1125	0,78 0,90 0,88 0,60 -0,70 -0,79	19	arc Li ARE	-0,63 0,88 -0,61	14	1006 1125	0,68 0,58
	1006/1190	44	PCT HR HS arc 1006 1190	0,78 0,90 0,89 0,59 0,70 0,81	19	arc Li ARE	-0,64 0,88 -0,60	14	1006 1190	0,67 0,56
	1125/1190	45	PCT HR HS arc 1125 1190	0,78 0,90 0,89 0,60 -0,79 -0,80	19	arc Li ARE	-0,62 0,87 -0,61	13	1006 1190 MO	0,52 0,51 0,55
NIR/SWIR	1125/1485	48	PCT HR HS arc 1125 1485	-0,81 -0,91 -0,90 -0,61 0,75 0,91	19	arc Li ARE	-0,62 0,86 -0,61	11	MO	0,91
	1485/1190	48	PCT HR HS arc 1190 1485	-0,81 -0,90 -0,90 -0,60 0,77 0,92	19	arc Li ARE	-0,62 0,87 -0,61	11	MO	0,91
SWIR/ SWIR	2083/2336	54	PCT HR HS arc 2083 2336	-0,88 -0,93 -0,95 -0,54 0,95 0,96	20	arc Li ARE	-0,68 0,91 -0,58	11	MO	0,92

CUADRO 3.4. Correlaciones de las variables en los tres primeros componentes principales para las combinaciones de bandas de S2014.V: variable, C: correlación con la variable original, P: proporción del componente a la varianza total. PCT: proporción de cobertura total, HR y HS: humedad del rastrojo y suelo respectivamente, arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica

La proporción de cobertura de rastrojos (PCT), si bien tiene fuertes correlaciones en todas las combinaciones, en el NIR/NIR es donde más contribuye a la variabilidad en el CP1. La HS y HR tienen una fuerte contribución a la variabilidad en el CP1 en todas las combinaciones. Las reflectancias tienen correlaciones fuertes en el CP1, pero variables, sólo en SWIR/SWIR aparecen muy fuertemente correlacionadas. Éstas además contribuyen a la variabilidad del CP3 en algunas combinaciones de bandas. La ARE y el limo ambos contribuyen a la variabilidad explicada por el CP2 en las bandas del infrarrojo, el limo tiene correlaciones más fuertes que la arena. Esta última arena no contribuye en la combinación VIS/VIS en este CP2 y sí en el CP3. La materia orgánica, tiene fuertes correlaciones en el CP3.

En S2017 la proporción de varianza explicada por los tres primeros componentes es muy similar en todas las combinaciones de bandas (Cuadro 3.5). Todas las variables consideradas aportan a estos 3 CP, siendo las mismas en cada componente para todas las combinaciones de bandas. El CP1 está definido por las reflectancias, la proporción de cobertura, y la humedad del rastrojo. La humedad de suelo, arcilla y materia orgánica, definen el CP 2 y el limo y la arena son las que definen la variabilidad explicada por el CP 3. Las reflectancias tienen correlaciones muy fuertes y muy similares en todas las combinaciones de bandas. La humedad del rastrojo y el PCT, si bien las correlaciones son más bajas, pueden considerarse fuertes. El resto de los atributos, humedad de suelo, arcilla, materia orgánica, limo y la arena tienen correlaciones fuertes y también similares en todas las combinaciones de bandas.

Región espectral	Bandas Combinaciones	CP1			CP2			CP3		
		P	V	C	P	V	C	P	V	C
VIS /VIS	507/681	37	PCT HR 507 681	0,78 0,73 0,94 0,94	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,71	19	Li ARE	-0,84 0,94
VIS/NIR	681/935	36	PCT HR 681 935	0,79 0,73 0,95 0,98	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,71	19	Li ARE	-0,82 0,95
	681/1006	37	PCT HR 681 1006	0,78 0,72 0,94 0,93	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,71	19	Li ARE	-0,83 0,94
NIR/NIR	935/1006	36	PCT HR 935 1006	0,79 0,72 0,93 0,94	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,72	19	Li ARE	-0,82 0,95
	935/1125	36	PCT HR 935 1125	0,81 0,71 0,94 0,93	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,73	19	Li ARE	-0,80 0,97
	935/1190	36	PCT HR 935 1190	0,80 0,70 0,94 0,93	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,72	19	Li ARE	-0,81 0,95
	1006/1125	36	PCT HR 1006 1125	0,80 0,71 0,95 0,83	21	HS arc MO	0,75 0,70 0,72	19	Li ARE	-0,81 0,95
	1006/1190	36	PCT HR 1006 1190	0,80 0,69 0,94 0,93	21	HS arc MO	0,76 0,71 0,72	19	Li ARE	-0,81 0,94
	1125/1190	36	PCT HR 1125 1190	0,81 0,69 0,94 0,93	21	HS arc MO	0,75 0,71 0,73	19	Li ARE	-0,80 0,96
NIR/SWIR	1125/1485	35	PCT HR 1125 1485	0,82 0,68 0,94 0,93	22	HS arc MO	0,75 0,70 0,73	19	Li ARE	-0,79 0,97
	1190/1485	35	PCT HR 1190 1485	0,82 0,67 0,94 0,93	22	HS arc MO	0,76 0,70 0,73	19	Li ARE	-0,79 0,96
SWIR/ SWIR	2083/2336	36	PCT HR 2083 2336	0,77 0,65 0,92 0,93	21	HS arc MO	0,75 0,69 0,72	18	Li ARE	-0,81 0,93

CUADRO 3.5. Correlaciones de las variables en los tres primeros componentes principales para las combinaciones de bandas de S2017.V: variable, C: correlación con la variable original, P: proporción del componente a la varianza total. PCT: proporción de cobertura total, HR y HS: humedad del rastrojo y suelo respectivamente, arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica

3.3.3. Separabilidad de suelo desnudo y suelo con rastrojo en las diferentes combinaciones de bandas

Gráficamente, las observaciones con suelo desnudo (SD) se separan en un grupo diferenciado de aquellas con rastrojo (SCR). Este comportamiento ocurre en todas las combinaciones de bandas tanto en S2014 como en S2017. Se muestra en tres combinaciones representativas (Fig. 3.4, 3.5 y 3.6). En S2014 las proyecciones de los valores de las observaciones en estos grupos cambian según las diferentes combinaciones de bandas. En cambio, en S2017 los grupos no se alteran en cualquiera de las combinaciones de bandas analizadas.

En la Fig. 3.4, el CP1 separa suelo desnudo (valores positivos) de “suelo con rastrojo” (valores negativos). Dentro del agrupamiento de suelo desnudo se diferencian las observaciones con $\geq 41,6$ % de limo (valores positivos en el CP2) de las que tienen $\leq 41,5$ % de limo (valores negativos en el CP2). En el grupo SCR se distinguen las observaciones con contenidos de limo $\geq 41,6$ % y de arcilla $\leq 27,2$ % (valores positivos en CP2). Con valores negativos en el CP2 se separan dos grupos, uno con contenidos de limo $\leq 41,5$ % y arcilla $\leq 27,2$ %, y otro, con altos valores de arcilla $\geq 31,6$ %.

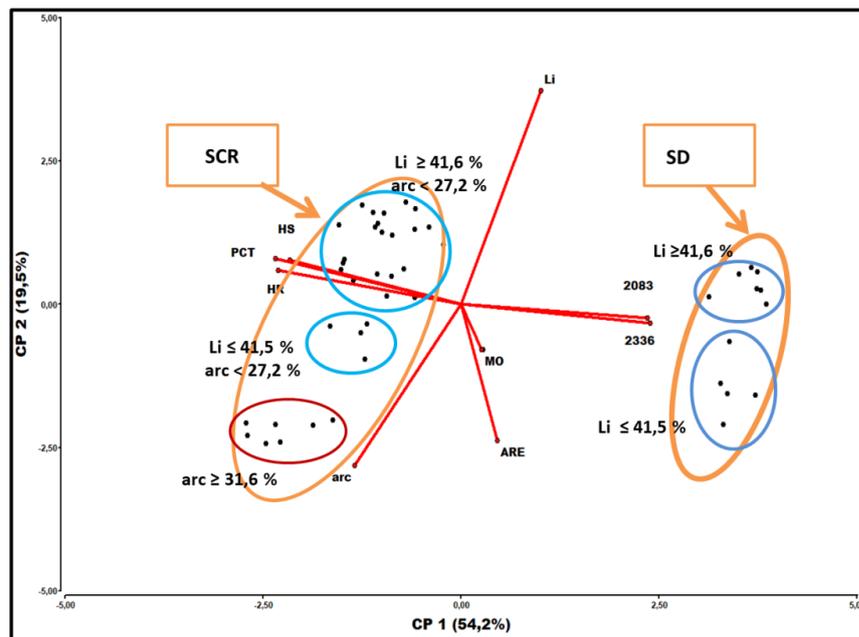


FIGURA 3.4. Biplot CP1 y CP2 para las observaciones en S2014, combinación 2083/2336. PCT: % cobertura total, HS y HR: humedad del suelo y rastrojo, respectivamente, Arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica. SD y SCR: suelo desnudo y con rastrojo respectivamente.

Este comportamiento observado en la Fig. 3.4 se da además, en “1485/2083”y “1485/2336”.

En la Fig. 3.5, la distribución de las observaciones es inversa al de la figura anterior. Dentro de suelo desnudo casi la totalidad de las observaciones que toman valores positivos en el CP2, contienen $\geq 41,6$ % de limo y con valores negativos, tienen $\leq 41,5$ % de limo. Dentro de suelo con rastrojo las observaciones con limo $\geq 41,6$ % y arcilla $\leq 27,2$ %, toman valores positivos. Con valores negativos, aparecen dos grupos, uno con contenidos de limo $\leq 41,5$ % y de arcilla $\leq 27,2$ %, y otro con valores de arcilla $\geq 31,6$ %.

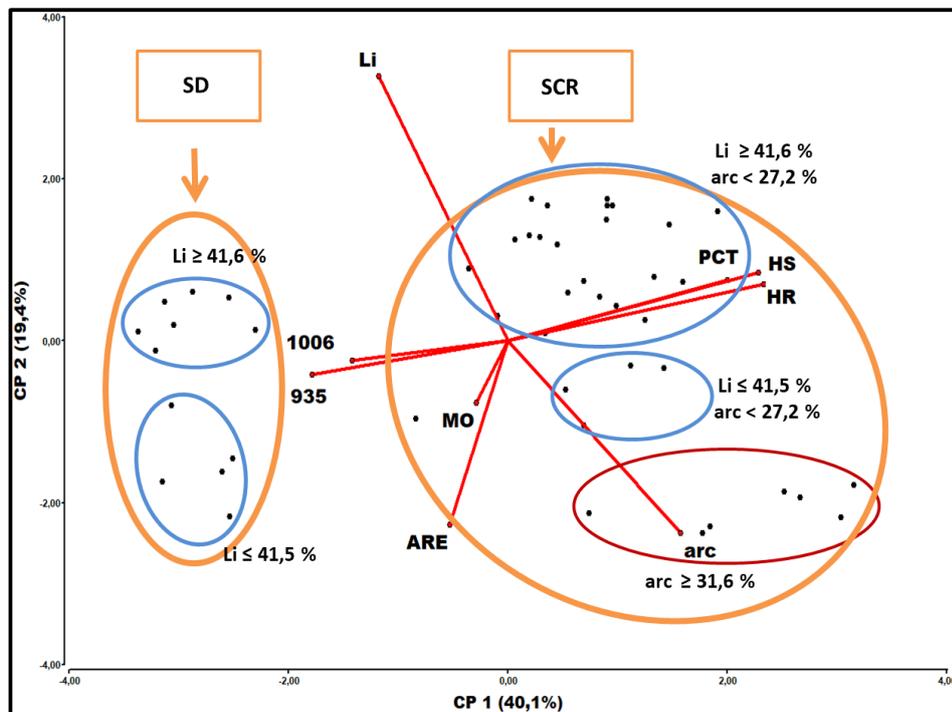


FIGURA 3.5. Biplot CP1 y CP2 para las observaciones en S2014, combinación 935/1006. PCT: % cobertura total, HS y HR: humedad del suelo y rastrojo, respectivamente Arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica. SD y SCR: suelo desnudo y con rastrojo respectivamente.

El comportamiento de la Fig. 3.5 además se da en las combinaciones “507/681”; “1006/1125”; “1125/1190” y “1006/1190”.

En la Fig. 3.6 las observaciones de suelo desnudo se agrupan sobre los valores negativos del CP1 y las de suelo con rastrojos sobre valores positivos y negativos.

Dentro de suelo desnudo las observaciones con $\geq 41,6$ % de limo toman valores negativos en el CP2, y se separan de las observaciones con $\leq 41,5$ % de limo (valores positivos). En el agrupamiento de observaciones de suelo con rastrojos se separan con valores positivos en el CP2 las observaciones con ≥ 50 % de proporción de cobertura de rastrojos, y ≤ 50 % de PCT (valores negativos).

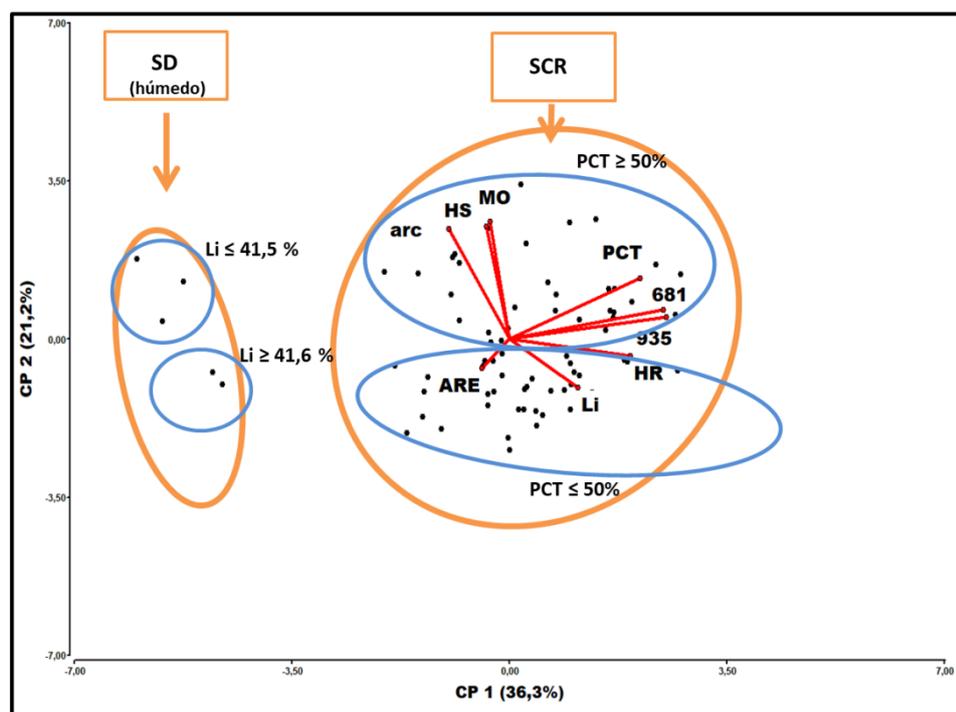


FIGURA 3.6. Biplot CP1 y CP2 para las observaciones en S2017, combinación 681/935. PCT: % cobertura total, HS y HR: humedad del suelo y rastrojo, respectivamente Arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica. SD y SCR: suelo desnudo y con rastrojo respectivamente.

En S2014 las observaciones de suelo con rastrojo aparecen asociadas solamente a la humedad del suelo y rastrojo, y al % de cobertura total. En cambio, las observaciones de suelo desnudo aparecen asociadas a las reflectancias. En S2017 las observaciones de suelo con rastrojos están asociadas a la mayoría de las variables consideradas (PCT, HR, HS, arc, MO, Li y reflectancias). Si bien la variabilidad en la respuesta espectral se encontró mayormente vinculada con las mismas variables en ambas escenas (porcentaje de cobertura total y humedad del rastrojo), la arcilla mostró contribuir altamente a esta variabilidad en S2014. Es interesante considerar la

correlación que este parámetro mostró con las variables antes citadas en la transecta S2014.

3.3.4. Análisis discriminante de los agrupamientos generados en el análisis de componentes principales

Los criterios de agrupamiento que se tuvieron en cuenta para este análisis surgen de los agrupamientos que resultaron en los gráficos de los ACP de todas las combinaciones. Estos criterios se esquematizaron en la Fig. 3.7. De los cinco agrupamientos de observaciones visualizados en los biplots de S2014 (Figs.3.4 y 3.5), dos grupos fueron de suelo desnudo, ambos con arcilla $\leq 27,2\%$ (arB), pero uno con limo $\geq 41,6\%$ (Li A), y otro con limo $\leq 41,5\%$ (Li B). Los tres grupos restantes fueron de suelo con rastrojo, dos con arcilla $\leq 27,2\%$ (arB), uno de éstos con limo $\geq 41,6\%$ (Li A) y otro con limo $\leq 41,5\%$ (Li B), y el tercer grupo con arcilla $\geq 31,6\%$ (arA) y limo $\leq 41,5\%$ (Li B). En los gráficos de S2017, se generaron cuatro grupos en total (Fig 3.6). Dos con suelo desnudo, uno con limo $\geq 41,6\%$ (Li A) y otro con limo $\leq 41,5\%$ (Li B), y dos de suelo con rastrojo, uno con porcentaje de cobertura total (PCT) $\geq 50\%$ y otro con PCT $< 50\%$.

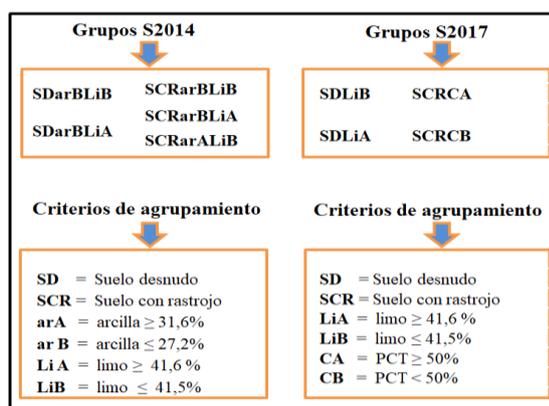


FIGURA 3.7 Grupos considerados en el análisis discriminante y criterios de agrupamientos.

Dos funciones canónicas (FC) reconstruyeron la mayor proporción de separación de todos los grupos en ambas escenas, siendo esta proporción de alrededor

del 99% en S2014, mientras que en S2017 es levemente menor (alrededor del 97%). Pero en S2014 esta proporción varía según las combinaciones de bandas, no ocurriendo lo mismo en S2017. En S2014 la mayor proporción de reconstrucción se da en las combinaciones NIR/SWIR y SWIR/SWIR, en VIS/VIS, se da el porcentaje de reconstrucción más bajo. En cambio, en S2017, son muy similares en todas las diferentes combinaciones de bandas.

En las Fig. 3.8 y 3.9, se visualiza la discriminación entre grupos. Si bien los centroides de cada grupo en el espacio discriminante cambian, con más variaciones en S2014 que en S2017, las diferencias entre todas las combinaciones son pequeñas. En S2014 (Fig. 3.8), la función canónica 1, separa muy bien suelo desnudo (SD) de suelo con rastrojo (SCR) en todas las combinaciones de bandas. En el eje canónico 2 se discriminan los grupos preestablecidos con distintos contenidos de arcilla y limo, tanto en SD como en SCR.

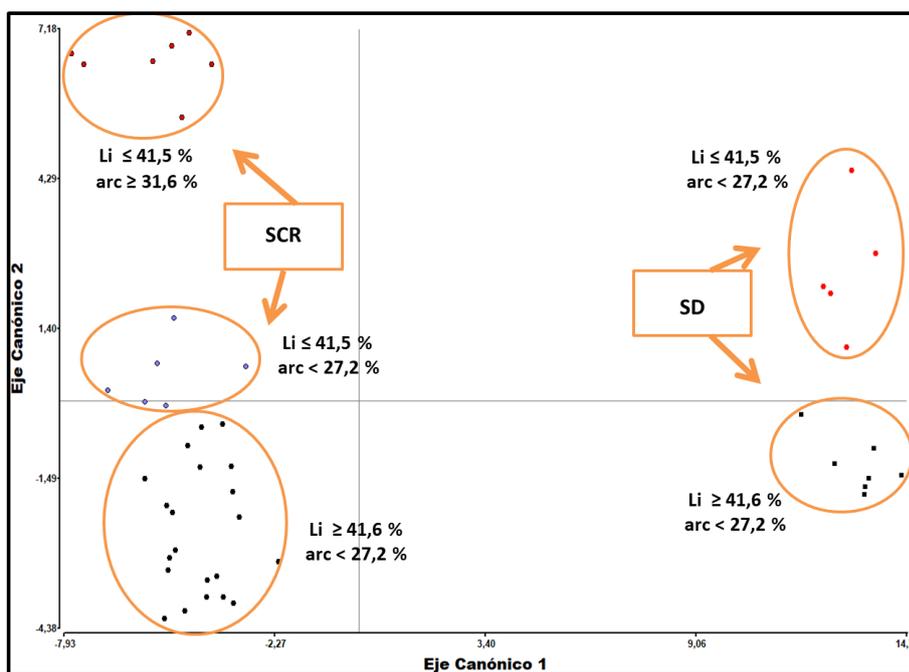


FIGURA 3.8 Agrupamientos de las mediciones en la combinación de las bandas 1485/2083 en S2014. SD: suelo desnudo, SCR: suelo con rastrojo.

En S2017 (Fig. 3.9), en el eje canónico 2, se discriminan los grupos preestablecidos para suelo con rastrojo (SCR) con alta y baja proporción de cobertura de rastrojos (SCRCA y

SCRCB), pero no los preestablecidos para suelo desnudo (SD), alto y bajo contenido de limo (SDLiA y SDLiB).

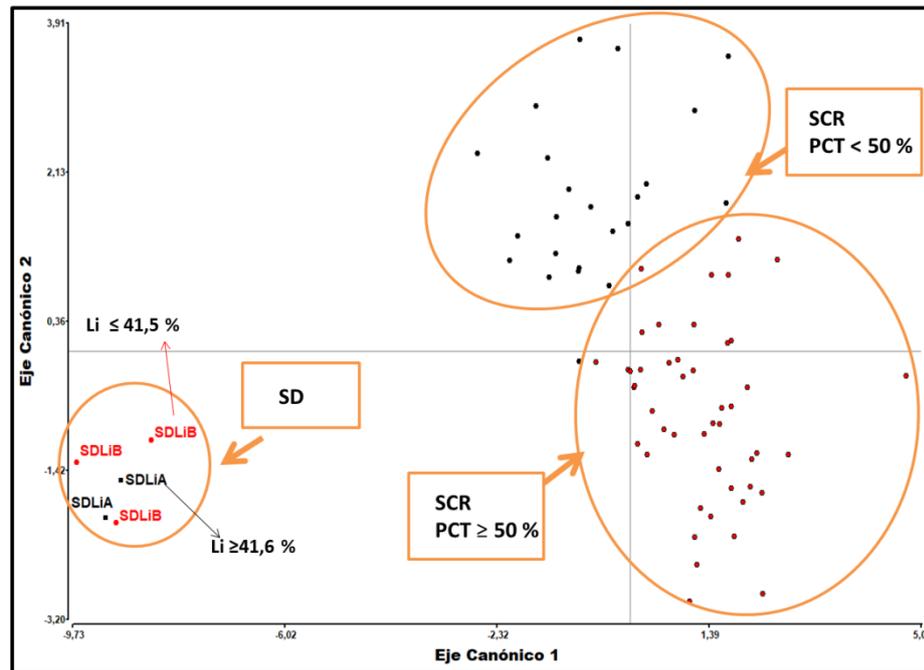


FIGURA 3.9 Agrupamientos de las mediciones en la combinación de las bandas 1190/1485 en S2017. SD: suelo desnudo, SCR: suelo con rastrojo, PCT: proporción de cobertura total de rastrojo, SDLiA y SDLiB: limo alto y limo bajo en suelo desnudo, respectivamente.

Las tasas de error de clasificación, obtenidas a partir del uso de las funciones discriminantes en cada combinación de bandas, fueron muy buenas tanto para S2014 (4,35 %) como para S2017 (entre 1,33 % y 2,67 %), indicando que estas funciones discriminantes son correctas para separar grupos. Además, muy pocas observaciones preclasificadas como pertenecientes a un grupo fueron consideradas en otro grupo al usar la función discriminante, en ambas escenas. De las 46 observaciones de S2014 sólo 2 elementos del grupo SCRarBLiA (arcilla baja y limo alto), fueron asociados a SCRarBLiB (arcilla baja y limo bajo) en todas las combinaciones de bandas. Las 44 observaciones, restantes fueron agrupadas correctamente, lo que implica un error muy bajo. En S2017 entre 1 o 2 elementos del grupo SCRCA (alta cobertura), dependiendo de la combinación de bandas, los asocia a SCRCB (baja cobertura), existiendo una combinación NIR/NIR con un error total = 0%.

Esto llevó a plantear los siguientes interrogantes:

¿Cuál es la combinación de bandas que mejor separa estos grupos en S2014?

¿De hallar una combinación “óptima”, ésta también lo sería en otros suelos, como en S2017?

En los Cuadros 3.7 y 3.8 se resume el porcentaje de reconstrucción, el error total y la separabilidad de las observaciones en los gráficos discriminantes, como criterios para elegir la combinación de bandas óptima. El criterio de “Separabilidad” se refiere a cuando gráficamente todas las observaciones están individualizadas y dentro del grupo preestablecido. “Poca separabilidad” cuando alguna o varias observaciones se superponen con otra o están dentro de otro grupo. Esta información corrobora que los grupos obtenidos mediante componentes principales son correctos y con mínimo error de clasificación. En 2014 si bien la diferencia del porcentaje de reconstrucción entre las distintas combinaciones es pequeña, los mejores valores se dan en el NIR/SWIR. Todas las combinaciones tienen el mismo error total. En S2017 prácticamente no hay diferencias entre las combinaciones en los porcentajes de reconstrucción espectrales, siendo leve la variación en el porcentaje de error total. La combinación NIR/NIR (935/1006) presenta 0 % de error total.

Combinación	% Reconstrucción	% Error	Gráficos
507/681	98.70	4.35	Separabilidad
935/1006	99.03	4.35	Separabilidad
1006/1125	98.95	4.35	Separabilidad
1006/1190	99.08	4.35	Poca separabilidad
1125/1190	99.02	4.35	Separabilidad
1190/1485	99.13	4.35	Poca separabilidad
1485/2083	99.29	4.35	Separabilidad
1485/2336	99.30	4.35	Poca separabilidad
2083/2336	99.23	4.35	Poca separabilidad

CUADRO 3.6. Descripción de los parámetros considerados para la elección de la combinación de bandas óptimas para S2014. La combinación óptima aparece sombreada.

Combinación	% Reconstrucción	% Error	Gráficos
681/935	97,38	1,33	Poca separabilidad
935/1006	97,42	2,67	Poca separabilidad
935/1006	97,54	0,00	Poca separabilidad
1006/1125	97,47	1,33	Poca separabilidad
1006/1190	97,41	2,67	Poca separabilidad
1125/1190	97,52	2,67	Poca separabilidad
1485/2083	97,48	2,67	Poca separabilidad
1485/2336	97,41	2,67	Poca separabilidad
2083/2336	97,41	2,67	Poca separabilidad

CUADRO 3.7. Descripción de los parámetros considerados para la elección de la combinación óptima de bandas para S2017. En la visualización de los gráficos se tomaron los mismos criterios de separabilidad que en S2014. La combinación óptima aparece sombreada.

Se indican las dos funciones discriminantes para S2014 para la combinación de bandas 1485/2083.

Donde A corresponde a la banda espectral 1485 nm
 B corresponde a la banda espectral 2083 nm
 PCT corresponde a cobertura de rastrojos
 HR corresponde a humedad del rastrojo
 HS corresponde a humedad de suelo
 MO corresponde a materia orgánica
 arc corresponde a arcilla
 Li corresponde a limo
 ARE corresponde a arena

FD1: $-1.90 *A + 2.48*B - 0.14*PCT - 0.27*HR - 0.60*HS - 0.17*MO - 108.86*arc - 82.66*Li - 107.23*ARE$

FD2: $0.25 *A - 0.27*B - 0.28*PCT - 0.03*HR - 0.16*HS + 0.16*MO + 130.58*arc + 98.10*Li + 128.25*ARE$

La expresión de las funciones discriminantes para S2017 de la combinación de bandas 935/1006 es

:

Donde C corresponde a la banda espectral 935 nm
 D corresponde a la banda espectral 1006 nm

FD1: $2.32 *C - 2.35*D + 0.83*PCT + 0.71*HR - 0.25*HS + 0.25*MO + 144.56*arc + 208.54*Li + 209.74*ARE$

FD2: $-0.20*925 + 0.75*1125 - 1.04*PCT + 0.64*HR - 0.03*HS + 0.02*MO - 34.20*arc - 49.60*Li - 49.89*ARE$

En ambas funciones canónicas, tanto de S2014 como de S2017, la textura (arcilla, limo y arena) es el atributo que más participa para que los grupos se segreguen.

El porcentaje de cobertura total, la humedad del suelo y del rastrojo, y la materia orgánica, contribuyen menos a la separación entre los grupos. En este sentido, es

necesario tener en cuenta que al ser el análisis discriminante una descomposición multivariada, fundamentalmente la combinación lineal de todas las variables intervinientes es lo que incide en la diferenciación o separación de los grupos.

3.4. Discusión:

De la misma manera que lo plantearon Kauth y Thomas (1976) el análisis de componentes principales dejó ver la estructura de los datos con relación a, identificar los atributos que más contribuyen a la variabilidad espectral de S2014 y S2017, y a detectar las asociaciones entre estos atributos. Los resultados aquí obtenidos fueron diferentes a los hallados por estos autores. Éstos, encontraron que el 97 % de la variabilidad de las escenas con cultivos es explicado por los tres primeros componentes, en cambio en las superficies con rastrojos aquí exploradas, la variabilidad total la definen los 7 primeros componentes en S2017 y los 6 primeros en S2014. Los tres primeros componentes explican entre un 75 % y 76 % de la variabilidad total en S2017, y entre un 77 % y 85 % en S2014. Además Kauth y Thomas (1976) encontraron que cada componente estaba definido por una variable diferente, suelo desnudo, cultivo y agua. En este capítulo se mostró que más de una variable influye fuertemente en la variación espectral en cada componente. Se considera que estas diferencias, fundamentalmente, son el resultado de que las escenas sin cultivos, pero con rastrojos, son más complejas. El comportamiento espectral de estas superficies agrícolas está altamente influenciado por la variabilidad espacial determinada por, el manejo de los rastrojos, la variación de las propiedades de los suelos y la correlación entre los distintos atributos en las diferentes regiones espectrales (discutido en el capítulo 2).

Crist y Cicone (1984b) encontraron que las bandas 5 y 7 de TM (Thematic Mapper en Landsat), centradas en 1550 nm y 2008 nm del infrarrojo respectivamente, estaban relacionadas con propiedades del suelo, y en especial con la humedad de suelo.

Lo novedoso del trabajo de estos autores, fue mostrar que el infrarrojo de onda corta contenía información sobre las propiedades de los suelos y recomendaron su exploración. Los resultados aquí obtenidos mostraron que en la segregación de superficies entre suelo desnudo y con rastrojos, las combinaciones entre bandas del NIR y entre bandas NIR/SWIR son las que mejor reconstruyen y con menor error, los agrupamientos entre ambas superficies. También se mostró que todos los atributos considerados en esta tesis contribuyen con distinto peso a dichos agrupamientos. La textura (arcilla, limo y arena) es el atributo que más participa en la discriminación de las diferentes escenas analizadas en ambas transectas. La proporción de cobertura total, la humedad (del suelo y del rastrojo), y la materia orgánica, contribuyen menos a la separación.

3.5. Conclusiones

El objetivo de este capítulo fue encontrar combinaciones de bandas dentro del óptico que permitieran discriminar superficies con rastrojos de superficies con suelo desnudo. Se plantearon los siguientes interrogantes:

-¿En cuál combinación de bandas es factible discriminar suelo desnudo de superficies con rastrojos?

En ambas transectas el comportamiento espectral fue diferente, a pesar de tener un mismo tipo de rastrojo.

En el infrarrojo se encuentran bandas que mejor segregan superficies con rastrojo de soja, de superficies con suelos desnudos. Las combinaciones: 1485/2083 (NIR/SWIR) para S2014, y 935/1125 (NIR/NIR) para S2017, presentan la mayor separación de ambos tipos de superficies con el menor error de clasificación.

-¿Afectan los atributos de superficie y las propiedades del suelo el ajuste de la línea de suelos?

Todos los atributos considerados en esta tesis contribuyen con distinto peso a la separabilidad de suelos desnudos y suelos con rastrojos. El análisis discriminante generó diferentes combinaciones lineales de estos atributos mostrando además, la importante contribución que tiene la textura en la discriminación de estos suelos con y sin cobertura de rastrojos.

La metodología de análisis de componentes principales es muy útil para analizar la estructura de los datos en superficies tan complejas, en pos de obtener una línea de suelos. El análisis discriminante mostró ser una técnica de análisis estadístico necesaria y complementaria del análisis de componentes principales para segregar superficies de suelo desnudo y con rastrojos.

CAPÍTULO 4. Respuesta espectral de los atributos de superficie en imágenes satelitales

4.1. Introducción

Las dos primeras misiones satelitales de datos hiperespectrales de observación de la tierra con fines civiles y de investigación, comenzaron hace dos décadas. La plataforma Hyperion (EO-1) fue la primera, lanzada en el año 2000 por la NASA, y la misión PROBA-1, lanzada desde India en octubre de 2001 por la Agencia Espacial Europea (ESA) (Transon et al. 2018). En este lapso, tal como se describió en la introducción de esta tesis el número de estudios sobre estimación de propiedades de suelo fue limitado en relación con otros recursos como geología, agua y vegetación, y además con resultados poco precisos. Chabrilat et al. 2019 señalan dos razones que podrían haber incidido en tan reducido número de trabajos. Una razón se refiere a que de las dos misiones antes señaladas, un satélite fue decomisado en el año 2017 (Earth Observer-1” EO-1”). Otra cuestión es que recién en los últimos cinco años, ha tomado gran impulso el desarrollo de software y hardware necesario para analizar el volumen de datos que requieren estas imágenes.

En el año 2019 algunas misiones han puesto satélites en órbita, y en muy breve lapso se dispondrá de las imágenes globales. Éstas, son la misión italiana PRISMA (PRecurso IperSpettrale de Ila Missione Applicativa), la misión Alemana EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) y la misión japonesa HISUI (Hyperspectral Imager Suite). Todas con una mejora sustancial en la calidad radiométrica, y la resolución espectral en relación con las primeras misiones antes citadas. Entre otras misiones que próximamente otorgarán datos están HYPXIM (HYPerspectral-X Imagery) implementada por Francia, se estima para 2021. Para 2022 se planifican HyspIRI (Hyperspectral Infrared Imager) de NASA-USA y SHALOM (Spaceborne Hyperspectral Applicative Land and Ocean Mission”) de Italia e Israel. En

2025 (Sentinel-10/CHIME, “Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment” de la Agencia Espacial Europea (Guanter, L. et al. 2015).

Considerando que, de los resultados antes logrados en esta tesis a través de la radiometría, se observó:

- coincidencia en la respuesta espectral de algunos atributos, en amplios y similares rangos de absorción

- alta variabilidad espacial de la respuesta espectral vinculada a la variabilidad espacial que presentan los atributos en estudio.

- incidencia del estado de descomposición y de humedad del rastrojo; y de la humedad del suelo en la respuesta espectral de algunos componentes granulométricos.

Al seleccionar imágenes para estimar los atributos bajo estudio, se debería esencialmente considerar que las mismas satisfagan ciertos requisitos sobre resolución espectral, espacial y temporal. Deberían contar con un importante número de bandas dentro del óptico, lo cual permitiría detectar la existencia de un atributo específico con más certidumbre. Deberían tener alta resolución espacial en todas las bandas para compensar la gran variabilidad espacial que tienen los atributos. Por último, una frecuencia temporal que aportara certidumbre a la estimación de éstos.

En la actualidad los satélites que suministran datos globales, de libre acceso, que más aproximan a estos requerimientos son Landsat-8 (L8) y Sentinel-2A (S2). El satélite Landsat-8 fue lanzado en febrero de 2013 con el instrumento multi-espectral denominado Operational Land Imager (OLI), desarrollado por NASA y USGS, y el satélite Sentinel-2 con el instrumento multi-espectral MSI, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), fue puesto en órbita en junio de 2015. Ambos, forman parte de un cambio generacional con relación al diseño de su instrumental, fundamentalmente debido a que tienen sensores con una configuración electro-óptica muy diferente a los

empleados en misiones anteriores. Esta configuración conocida como “push-broom”, se basa fundamentalmente, en miles de detectores situados estratégicamente sobre cada plano focal, teniendo cada detector filtros para cada una de las diferentes bandas en las que capta la energía reflejada. La misión de Sentinel-2 incluye un par de satélites en la misma órbita y situados de manera tal que asegure continuidad con SPOT y Landsat (Suhet, 2015; Gatti y Galoppo, 2018; Vaughn, 2019).

Sentinel-2 y Landsat-8, pronto co-existirán con EnMAP (la misión alemana anteriormente mencionada) y compartirán similar cobertura espectral estando todos enfocados en aplicaciones semejantes. Estos satélites multispectrales tienen la posibilidad de volverse “socios ideales” para EnMAP en el desarrollo de aplicaciones sinérgicas explotando muestreos espectrales continuos en el óptico (Guanter et al 2015).

A través de la radiometría se demostró la factibilidad de detectar algunos atributos de suelos en condiciones reales de campo. Pero, trasladar información obtenida desde radiometría (un punto) a una imagen (un pixel) no implica solamente pasar de una escala mayor a una menor. Esta transferencia constituye un gran paso que comprende resolver obstáculos que surgen con las imágenes satelitales, entre otras cuestiones, la interferencia atmosférica, cambios en la geometría de observación entre diferentes satélites, además de las particularidades específicas de cada instrumento de medición (Demattê et al. 2017).

El objetivo de este capítulo es evaluar la respuesta en la discriminación de los atributos de superficie con datos obtenidos desde los satélites Sentinel-2 y Landsat-8. Se buscará responder los siguientes interrogantes:

- ¿Las firmas espectrales adquiridas desde los datos satelitales son similares a las obtenidas con radiometría de campo?

- ¿En cuáles bandas satelitales es factible obtener información referida a los atributos de superficie?
- ¿Incide el tamaño del pixel y el ancho de banda en la discriminación de los atributos mediante formas de absorción?
- ¿Es viable discriminar con datos satelitales, superficies con rastrojo de aquellas con suelo desnudo? ¿Es posible definir una línea de suelos?

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Datos satelitales

4.2.1.1 Características de las imágenes

- Resolución radiométrica

La resolución radiométrica de un instrumento es la determinación del nivel de intensidad o reflectancia que puede distinguir el mismo. Mayor resolución radiométrica, mayor capacidad del instrumento de detectar diferencias en intensidad o reflectancia, logrando mayor precisión en la imagen sensada. Tan alto número de detectores, en ambos satélites, ha logrado una mejora sustancial en la relación señal /ruido. En el caso de Landsat-8, la relación señal /ruido es ocho veces más grande que ETM+ para niveles de radiancia típicos. Tiene una resolución radiométrica superior a ETM+, esta es de 12-bit. Ambos aspectos, mayor resolución radiométrica y mayor relación señal/ruido, hacen posible que OLI pueda resolver diferencias de intensidad más pequeñas que ETM+ (Czapla-Myers et al. 2015). Los requerimientos de calibración para OLI al tope de atmósfera han sido planteados superiores al 3% (Mishra et al. 2014). La resolución radiométrica del MSI en Sentinel-2 es también de 12 bit con alta calidad radiométrica y con una precisión absoluta del 3% (Meygret et al. 2015).

-Resolución espacial y espectral

La resolución espacial es el área de representación en la superficie, de la información que obtiene cada detector en un satélite.

En Sentinel-2 los datos son adquiridos en 13 bandas multiespectrales con resolución espacial que varía entre 10 y 60 m. Cuatro bandas (VIS-NIR) tienen resolución espacial de 10 metros: azul (B2, centrada en 490 nm), verde (B3, 560 nm), rojo (B4, 665 nm) e infrarrojo cercano (B8, 842 nm). Seis bandas tienen resolución espacial con pixel de 20 metros, cuatro de éstas son angostas usadas principalmente para caracterizar la vegetación en la zona del salto rojo–infrarrojo (“red edge zone”, B5, 705 nm, B6, 740 nm, B7, 783 nm y B8a, 865 nm) y dos, son amplias bandas en el SWIR (B11, 1610 nm y B12, 2190 nm). Por último, las tres bandas restantes tienen resolución de 60 metros (B1, 443 nm, B9, 945 nm y B10, 1375 nm). Estas bandas son utilizadas en el preprocesamiento de los productos con nivel 1C de Sentinel-2 para la corrección atmosférica, ya que permiten la detección de nubes, vapor de agua y aerosoles. Al ser empleadas como producto de entrada para la corrección atmosférica se considera que su empleo en un análisis espectral constituye información redundante. Según Richter et al., 2011, esto es debido a la mezcla de respuestas espectrales y “artefactos” que introduce el remuestreo en el procesamiento de los productos. Por esta razón, estas bandas se omiten para el análisis en esta tesis. Además, la banda 10 no brinda información de superficie.

En OLI la información es adquirida en 9 bandas multiespectrales y dos bandas termales. De las bandas multiespectrales, ocho tienen la misma resolución espacial de 30 metros: B1 (aerosol costero, 433 nm); B2 (azul, 482 nm); B3 (verde, 562 nm), B4 (rojo, 655 nm); B5 (infrarrojo cercano, 865 nm); B6 (SWIR1, 1610 nm); B7 (SWIR2, 2200 nm) y B9 (cirrus, 1375 nm). Resta la B8 que es pancromática con 15 metros de resolución espacial. En la Fig.4.1 se comparan las respuestas espectrales (normalizadas a 1) de ambos satélites en la región del visible y parte del infrarrojo, las mayores diferencias se dan en el NIR. Entre 700 nm y 900 nm en Landsat-8 hay una sola banda

que es amplia (B5, 71 nm), y Sentinel-2 posee cuatro bandas angostas (B5 de 19 nm, B6 de 18 nm, B7 de 28 nm y B8a de 34 nm).

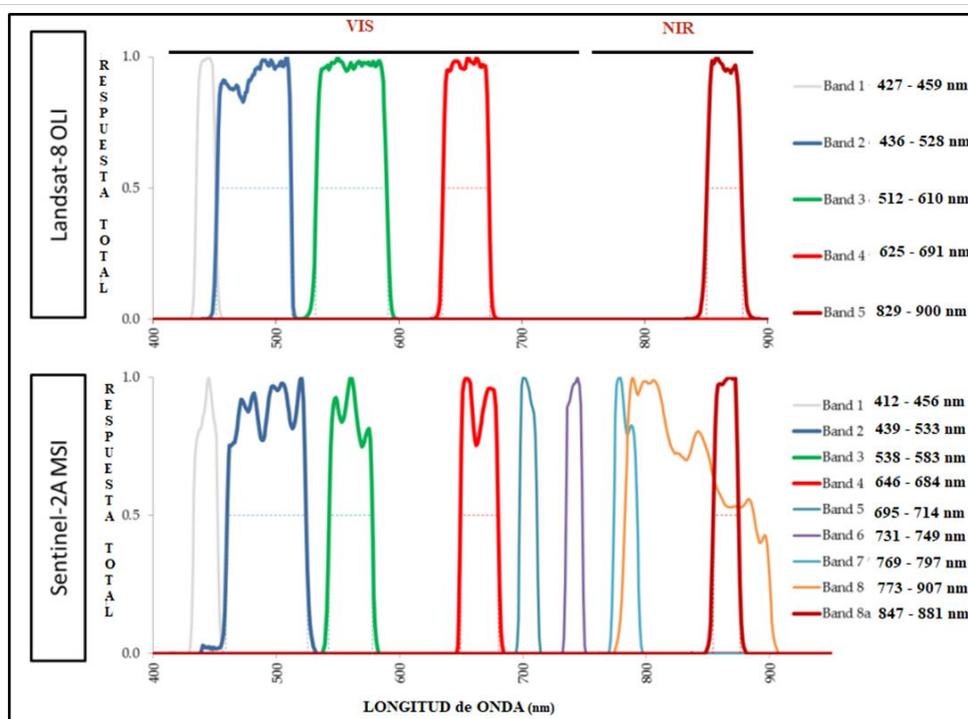


FIGURA 4.1. Respuestas espectrales de Landsat-8 y Sentinel-2 entre 400 nm y 900 nm. VIS: visible, NIR: infrarrojo cercano. Band: banda (Adaptado de Padró et al.2018).

-Precisión geométrica

La imagen Landsat-8 fue solicitada al USGS con nivel 2 que incluye correcciones geométricas (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-surface-reflectance?>). Para Sentinel-2 la imagen adquirida fue en nivel 1C, con una precisión geométrica similar a Landsat-8. El nivel 1C de Sentinel-2 incluye correcciones geométricas como orto-rectificación y registración espacial sobre un sistema global de referencia con precisión sub-píxel.

En la actualidad los marcos de referencia global están siendo definidos con mucha precisión a través de las estaciones permanentes instaladas en todo el planeta. Éstas reciben en forma continua datos provenientes de las constelaciones de satélites NAVSTAR y GLONASS.

El sensor MSI tiene una incertidumbre en la geo-localización absoluta de 12.5 m 2σ (https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2-comparison-sentinel-2-and-landsat?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects).

En ambos sensores el ángulo focal (FOV) es de alrededor de 20 °.

4.2.1.2. Corrección atmosférica

Para desarrollar una relación suficientemente confiable entre las variables de superficie y el dato que suministra el satélite, es muy importante realizar una estimación precisa de la reflectancia de superficie. Ésta, como se ha comentado en el capítulo 1, es el parámetro más extensamente usado para vincular con las propiedades biofísicas aquí consideradas.

Los constituyentes atmosféricos introducen incertidumbre a los datos satelitales. En este sentido la corrección atmosférica compensa la absorción y el scattering debido a estos constituyentes. Los gases existentes en la atmósfera comprendida entre la superficie de la tierra y el satélite son primariamente aerosoles, vapor de agua y ozono, y están parcialmente modulados por la temperatura local del aire. Estos gases absorben y / o generan scattering de la luz solar tanto entrante como la que es “saliente” de la superficie.

La corrección atmosférica o calibración, se realizó a través de procesos diferentes en cada imagen satelital.

La imagen Landsat-8 fue provista directamente con valores de reflectancia de superficie. Corregida por USGS a partir de la imagen nivel L1 con reflectancia al tope de la atmósfera (TOA) (<https://espa.cr.usgs.gov/>). Esta imagen se generó a partir de la implementación de modelos específicos (“Surface Reflectance Code” (LaSRC)) que utilizan el algoritmo “Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

(6SV)” creado por Vermote, 1997, en colaboración con NASA y GSFC, luego modificado por EROS Center (USGS).

LaSRC requiere de información auxiliar para registrar la participación de los componentes atmosféricos y de la configuración de la superficie, en el scattering y la absorción de luz. El instrumento OLI, a bordo de la plataforma, no contiene sensores para medir el vapor de agua, ozono, AOT (espesor óptico de aerosoles). Por consiguiente, esta información es obtenida del espectroradiómetro MODIS que se encuentra en simultaneidad horaria con Landsat, a bordo de los satélites Terra y Aqua. El AOT obtenido es testeado con un modelo de inversión usando los datos de las bandas azules (B1 y B2) de Landsat8. Con un modelo digital de elevación y los ángulos cenital solar y de observación, se corrige la variación temporal y espacial de la absorción y el scattering de los gases y aerosoles obtenidos (Vermote et al., 2016), (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-surface-reflectance>).

El producto con valores de reflectancia de superficie contiene los mapas de los componentes atmosféricos medidos (máscaras) y se puede solicitar la entrega de evaluación de la calidad por bandas (<https://Landsat.usgs.gov/quality-band>).

La imagen Sentinel 2 adquirida a nivel 1 (L1C -TOA) fue transformada a valores de reflectancia a nivel de superficie (Level-2A). Para tal fin se realizó la corrección atmosférica empleando la aplicación Sen2Cor (versión 2.8) (<https://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>).

Este proceso de corrección realiza primero una serie de clasificaciones para detectar, nubes, sombras de nubes, vegetación, suelo desnudo, agua y nieve. El algoritmo usa las propiedades de reflexión de la imagen y datos obtenidos de bandas de la misma imagen a corregir.

Sen2cor, usa la señal de la banda 11 para detectar suelos para la clasificación, fundamentalmente usa la B9 y también información de las bandas de vegetación para detectar vapor de agua. Remueve diferentes tipos de nubes y cirrus clasificadas a partir de la B10. La señal de las bandas 1 a 3 está influenciada por la absorción de ozono. También está disponible una corrección más precisa de aerosoles en los datos de la imagen, debido a la inclusión de la B1 en el dominio del azul (Richter, 2011).

De estas clasificaciones se generan mapas (máscaras) e indicadores de calidad asociados, disponibles dentro del archivo generado. Sen2cor requiere de estas clasificaciones para calcular los parámetros de los componentes atmosféricos antes mencionados. Fundamentalmente de los datos de la clasificación de suelos y vegetación calcula el AOT. De la clasificación de agua genera los datos referidos a vapor de agua. Luego al igual que Landsat OLI, a partir de la información de un DEM y de los ángulos, solar y de visión, corrige el dato de reflectancia, temporal y espacialmente. Mayor detalle sobre el proceso está disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>; en <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>; (Richter et al. 2011; Mueller Wilm et al. 2019)

4.2.1.3 Ubicación de las transectas en las imágenes e identificación de los píxeles

Para relacionar los datos satelitales con los radiométricos se identificaron en las imágenes los píxeles involucrados en las transectas de campo con la mayor precisión posible. Primero se reconocieron en la imagen Sentinel-2 en una composición RGB con las bandas 2, 3 y 4, con 10 metros de resolución espacial, luego, el procedimiento que se describe a continuación se aplicó para las bandas con resolución de 20 m en Sentinel-2, y en Landsat-8 con resolución de 30 m.

En las imágenes Sentinel-2 las coordenadas de pixel (GCP) se refieren al vértice superior izquierdo, incrementando en “x” en longitud y hacia abajo, en “y”, en latitud.

En cambio en Landsat-8 están referidas al centro del píxel, incrementando de la misma forma. No necesariamente los puntos de geo-posicionamiento (GPS) obtenidos a campo fueron coincidentes con las coordenadas de píxel (Fig.4.2). Se calcularon las variaciones existentes entre coordenadas, y se convirtieron a metros. Posteriormente se proyectaron sobre el píxel con la ayuda de las herramientas “GCP manager” y “Range finder tool” de SNAP. La grilla de coordenadas se generó con la herramienta “GCP manager” del toolbox de SNAP. En la Fig. 4.2 se muestra como quedaron distribuidas las transectas en los píxeles de la imagen Sentinel-2A con resolución espacial de 10 metros.

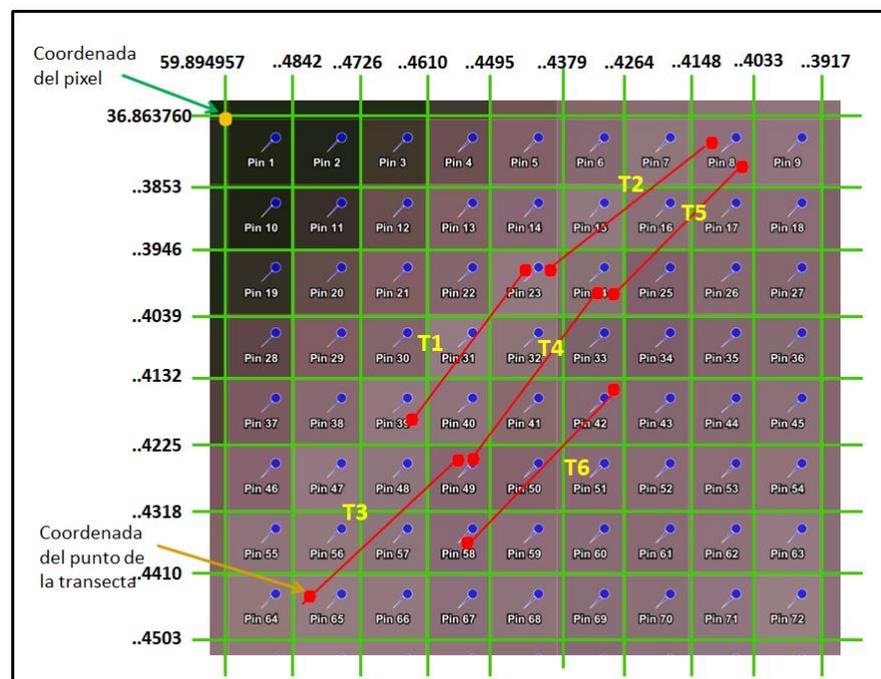


FIGURA 4.2. Ubicación píxeles y transectas de campo en bandas con resolución de 10 metros en Sentinel-2A. T1: transecta 1, T2: transecta 2, T3: transecta 3, T4: transecta 4 , T5: transecta 5 y T6: transecta 6.

Una vez ubicadas las transectas en las tres imágenes, se identificaron y cuantificaron los píxeles involucrados en el área de entrenamiento que reúne todas las transectas, y los puntos de medición a campo comprendidos en cada píxel. En la Fig. 4.3 se observa la variación en el número de píxeles para las áreas de entrenamiento que quedaron definidas según las diferentes resoluciones espaciales. En Sentinel-2 en las

bandas con píxeles de 10 metros, el área de entrenamiento de la totalidad de las transectas quedó comprendida en 23 píxeles, en las de 20 m de resolución las transectas se distribuyen en 9 píxeles. En Landsat-8 el área de entrenamiento que comprende las transectas es de 7 píxeles.

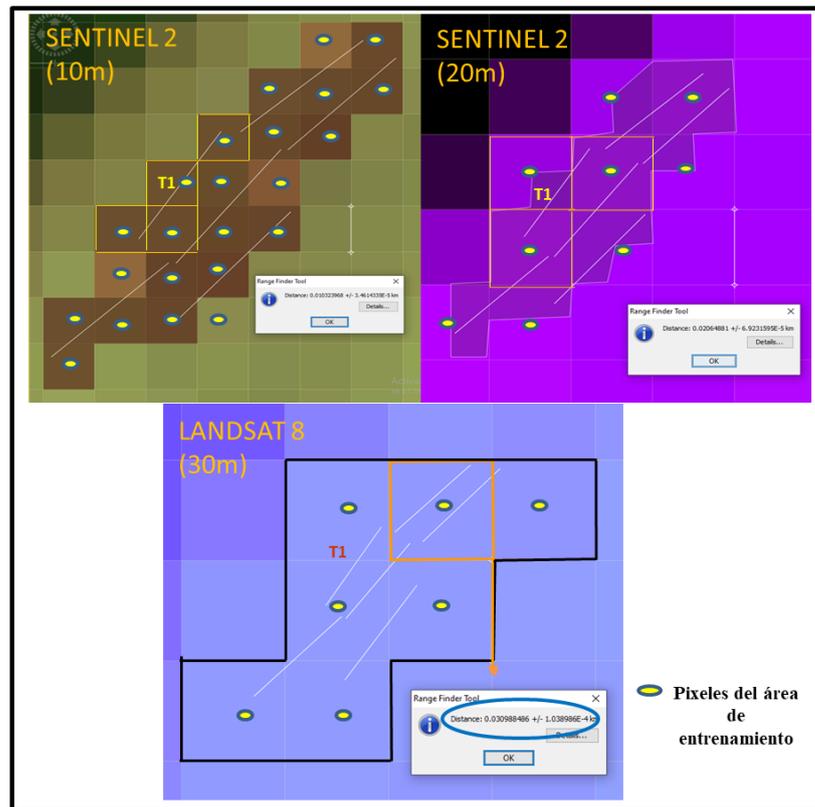


FIGURA 4.3. Distribución de las transectas en diferentes resoluciones espaciales. T1, transecta 1

El diseño de las transectas se describe en el ítem 2.2.3 y en las fotos 2.2 y 2.3, es importante recordar que en cada transecta se realizaron entre 11 y 12 puntos con adquisiciones radiométricas y de mediciones de atributos a campo. En el Cuadro 4.1 se indica el número de puntos que integra cada píxel de acuerdo a las resoluciones espaciales de cada satélite. Se aprecia una proporción y distribución muy irregular en L8-OLI mientras que en S2 –A (10 m) el número de puntos por píxeles es menor y con una distribución más homogénea. Esto implica que el aporte de la información de campo con el diseño en esta tesis propuesto, sea diferente en cada imagen. Los datos

radiométricos se reordenaron para cada imagen de acuerdo a la distribución mostrada en el Cuadro 4.1, esta metodología se detalla en el ítem 4.2.3.

SENTINEL2 -10 m		SENTINEL2 -20 m		LANDSAT-8 -30 m	
Píxeles del AE	Puntos de medición/píxel	Píxeles del AE	Puntos de medición/píxel	Píxeles del AE	Puntos de medición/píxel
1	2	1	4	1	5
2	4	2	3	2	26
3	4	3	5	3	1
4	4	4	14	4	25
5	5	5	3	5	6
6	5	6	13	6	4
7	4	7	3	7	3
8	1	8	14		
9	4	9	11		
10	4				
11	4				
12	4				
13	1				
14	4				
15	4				
16	4				
17	3				
18	1				
19	2				
20	1				
21	1				
22	3				
23	2				

CUADRO 4.1. Distribución por píxel de los puntos medidos a campo en las áreas de entrenamiento para cada imagen y resolución espacial. AE: área de entrenamiento

4.2.2 Datos radiométricos

Los datos que se utilizaron fueron las adquisiciones radiométricas a campo correspondientes a la transecta con rastrojo de soja y la adquisición de referencia de rastrojo de soja con 100% de cobertura (S2017), descritas en el capítulo 2 (ítem 2.2). A estos datos se adicionaron los adquiridos en laboratorio con suelo desnudo, también correspondientes a la transecta S2017, descritas en el capítulo 3 (ítem 3.2). A esta base de datos se adicionaron nuevas mediciones radiométricas adquiridas a campo. Éstas se

realizaron el día 3 de junio del año 2013, en barbecho, en el momento previo a la realización del manejo de “pre-siembra”. Se sumaron estas adquisiciones por ser representativas de una condición de alto enmalezamiento. A continuación se describe brevemente el sitio de medición, el diseño y la distribución de estas adquisiciones.

Las mediciones a campo del año 2013 se ejecutaron sobre un lote con rastrojo de soja en el cual no se había realizado ningún control de malezas durante el período de barbecho, por consiguiente, el nivel de enmalezamiento era muy elevado. El suelo fue descrito como Argiudol típico. Dentro del lote se delimitaron dos parcelas cuadradas de 100 m de lado. La radiometría se adquirió sobre cuatro transectas (dos por parcela), con alrededor de 70 mediciones en cada transecta. El porcentaje de cobertura total (PCT) se midió sobre dos diagonales cruzadas en cada parcela con el método de Laflén (ítem 2.2.4). En cada punto de medición de cobertura se describió la composición de la misma. Los valores promedios por parcela de la composición de la cobertura se muestran en el Cuadro 4.2.

Resumiendo, en total cuatro adquisiciones radiométricas correspondientes al año 2013 se adicionaron a la base datos.

Parcela	PCT %	RC %	RS %	M %	V % °
1	90	--	50	34	6
2	80	2	37	31	10

* Integrado por: 56% rastrojo de soja y 34% malezas. ** Integrado por: 49% rastrojo de soja y 31% malezas

CUADRO 4.2 Descripción de las coberturas de las parcelas con rastrojo de soja enmalezado. PCT: proporción porcentual de cobertura total. RC: rastrojo de cebada, RS: rastrojo de soja, M: malezas, V: grano, chaucha y hojas de soja

4.2.3. Ajuste de los datos radiométricos a las imágenes satelitales

La dimensionalidad de los datos radiométricos se ajustó al rango correspondiente a los intervalos de las respuestas espectrales de cada satélite, obteniendo la mediana de los valores de reflectancia adquiridos con el espectroradiómetro. Las respuestas espectrales medidas para cada banda en Sentinel 2

están disponibles en <https://sentinels.copernicus.eu> y en landsat 8 en <https://landsat.usgs.gov>.

4.2.4. Ajuste de los datos radiométricos a las áreas de entrenamiento

Los datos radiométricos se promediaron por pixel en función de la distribución que tomaban los puntos de las distintas transectas en cada pixel y resolución espacial (Cuadro 4.1).

4.2.5 Metodología de análisis

En función del objetivo planteado en la introducción de este capítulo, se realizaron dos análisis diferentes, a) Se examinó la presencia de formas de absorción en las imágenes de ambos satélites y se vincularon estas formas con los atributos de superficie. b) Se analizó el comportamiento de la línea de suelos en el entorno de las diferentes combinaciones de bandas discutidas en el capítulo 3 y las bandas disponibles en cada satélite.

a) Para aislar las formas de absorción se aplicó la técnica de remover el continuo (Continuum removal), empleando el método del “Polígono convexo” (Convex Hull) (ítem 2.2.4). Para lograr este fin, las firmas satelitales fueron procesadas utilizando el paquete “R prospectr”, versión 0.1.3 (<http://CRAN.R-project.org/package=prospectr>).

b) Para la ejecución de este análisis se ordenaron en tres grupos diferentes los datos de las adquisiciones radiométricas descritas en el ítem 4.2.2 y los datos satelitales:

- a- Este grupo se denominó “SR” y reúne todos los datos de radiometría de campo (transecta S2017) y el de referencia de rastrojo puro del año 2017, más las reflectancias de las áreas de entrenamiento de las imágenes satelitales. Aquí quedan agrupados diferentes porcentajes de cobertura total de rastrojos sin malezas,

- b- Este grupo se denominó “SRE”, y reúne todos los datos de radiometría de campo adquiridos en las parcelas del año 2013. Quedan agrupados aquí datos con distintos porcentajes de cobertura total de rastrojo enmalezado, y
- c- Este grupo se denominó “SD” y reúne aquellos datos radiométricos obtenidos en laboratorio, sin cobertura de rastrojos (suelo totalmente desnudo).

Se consideraron las combinaciones de bandas obtenidas en el capítulo 3 según la disponibilidad en cada resolución espacial de los satélites (Fig. 4.1). En consecuencia quedaron cinco combinaciones de bandas, dos en el VIS/NIR: B4/B8 (S-2), y B4/B5 (L-8); dos en el SWIR: B11/B12 (S-2) y B6/B7 (L-8) y una en la zona “red-edge”, VIS-NIR (B5/B8a - S-2). Se realizó un análisis gráfico de distribución de las superficies en dos dimensiones y se evaluó la predicción de cada combinación mediante análisis de regresión simple.

4.3 Resultados

4.3.1. Bandas de absorción en las firmas satelitales

Se visualizaron las firmas de reflectancia tanto de los datos satelitales como los de radiometría, considerando las variaciones en intensidad y la presencia o no de absorción (Figs.4.4, 4.7 y 4.9). En la Fig. 4.4 se muestran las firmas de los 23 píxeles del área de entrenamiento que integra a las 6 transectas medidas sobre rastrojo de soja (S2017). En las firmas de Sentinel-2 se da absorción en las bandas 3 y 4 de manera similar que en los datos radiométricos. Las diferencias en intensidades (% reflectancias) entre las firmas extremas, son mínimas (2 %). En cambio, entre las firmas generadas sólo a partir de los datos radiométricos aparecen diferencias de 7 % de reflectancia en

B3 (538 nm - 583 nm), 9 % de reflectancia en B4 (646 nm - 684 nm) y 12 % de reflectancia en B8 (773 nm - 907 nm) (Fig. 4.4).

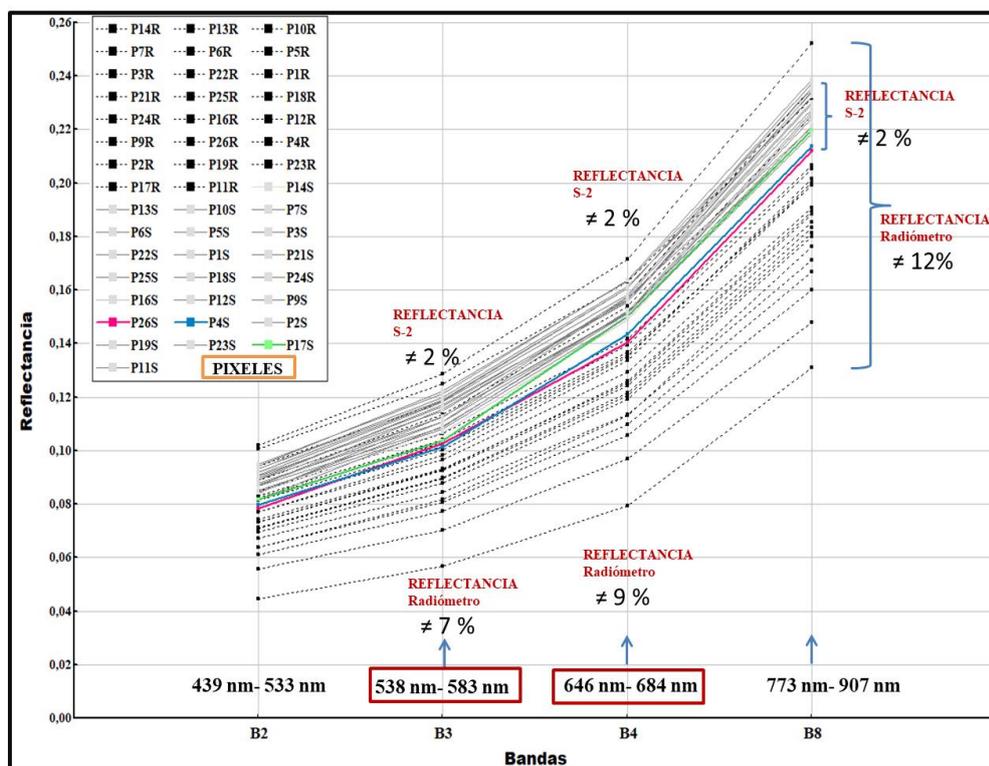


FIGURA 4.4 Firmas espectrales de los datos de radiometría y de Sentinel-2 en bandas con 10 m de resolución espacial. Líneas negras punteadas: las firmas de datos radiométricos. Líneas grises llenas: de datos satelitales.

La absorción en banda 3 (Fig.4.4) está asociada a observaciones con valores $>$ a la media de arena, y/o alrededor de los valores medios de limo, y con contenidos por debajo de los promedios de arcilla, humedad de suelo y materia orgánica. Los valores medios de cada atributo se refieren al promedio obtenido entre las diferentes observaciones que integran cada pixel. Las firmas con mayor profundidad de absorción en la B4 (Fig. 4.4) se vinculan a mediciones con valores de arcilla, materia orgánica, y porcentaje de cobertura total, por encima de la media, y a contenidos por debajo de la media de humedad de suelo y humedad de rastrojo. Las firmas restantes con menor absorción en esta banda, y similar absorción en banda 3, en su mayoría, están vinculados a píxeles con valores por debajo de la media de arcilla y materia orgánica, y

en general con altos contenidos (por encima de la media) de humedad de suelo y/o humedad de rastrojo (este parámetro especialmente). Con respecto a la arena y el limo, el comportamiento es variable. Los valores promedios son ARE= 26,7 %; Li= 45,0 %; arc= 28,3 %; HS= 21,5 %; HR= 5,7 %; MO= 4,7 %; PCT= 49 %.

Las firmas con el continuo removido corroboraron que sólo hay absorción en las bandas 3 y 4. Se analizaron en forma separada las firmas removidas que absorben sólo en B3 o bien con similar absorción en ambas bandas (3 y 4) (Fig. 4.6), de aquellas que absorben en banda 4. (Fig. 4.7).

En las firmas de la Fig. 4.6 la profundidad de absorción en la banda 3 se encontró, vinculada a pixeles con altos contenidos de limo o arena. Se observó gráficamente que dicha profundidad disminuye en los pixeles con mayor contenido de arcilla y humedad del suelo. En cambio en la Fig. 4.7 las firmas de los pixeles con altos contenidos de arcilla y materia orgánica son las más profundas en la banda 4. Al disminuir los contenidos de los parámetros antes citados y aumentar la humedad del suelo y/o del rastrojo, la profundidad de absorción se reduce a valores similares a los de la B3. Ambas bandas tienen moderadas correlaciones, estadísticamente significativas, con el limo, la arcilla (Cuadro 4.3). Las correlaciones del limo son negativas en ambas bandas, esto explicaría el comportamiento observado gráficamente en banda 3. La arcilla se correlaciona positivamente con la banda 4 y las demás variables, lo que explica el comportamiento observado con los pixeles en esta banda del visible.

Banda	PCT %	HR %	HS %	arc %	Li %	ARE %	MO %
B3	0,1315	0,3558	0,4539	0,5862	-0,4531	0,0571	0,3350
valor p	0,5497	0,0957	0,0296	0,0033	0,0299	0,7960	0,1182
B4	0,1134	0,3275	0,3989	0,4843	-0,5741	0,2408	0,2124

CUADRO 4.3. Correlación entre banda y atributo del área de entrenamiento de Sentinel-2 resolución 10 m. PCT: proporción de cobertura total. HR y HS: humedad del rastrojo y del suelo respectivamente, arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica.

En la Fig. 4.5, las formas de las firmas de Sentinel-2 no son similares en todos los píxeles como se observa en las obtenidas con radiómetro. Aparecen algunas firmas con mayor absorción en las bandas 7 y 8A. Los espectros de radiometría tienen gran amplitud en valores de reflectancia, algunos con diferencias entre el 6 %, y el 13 %, y otros con valores casi idénticos. Mientras que, en las firmas de Sentinel-2, las intensidades difieren muy poco, ≤ 3 % entre firmas extremas.

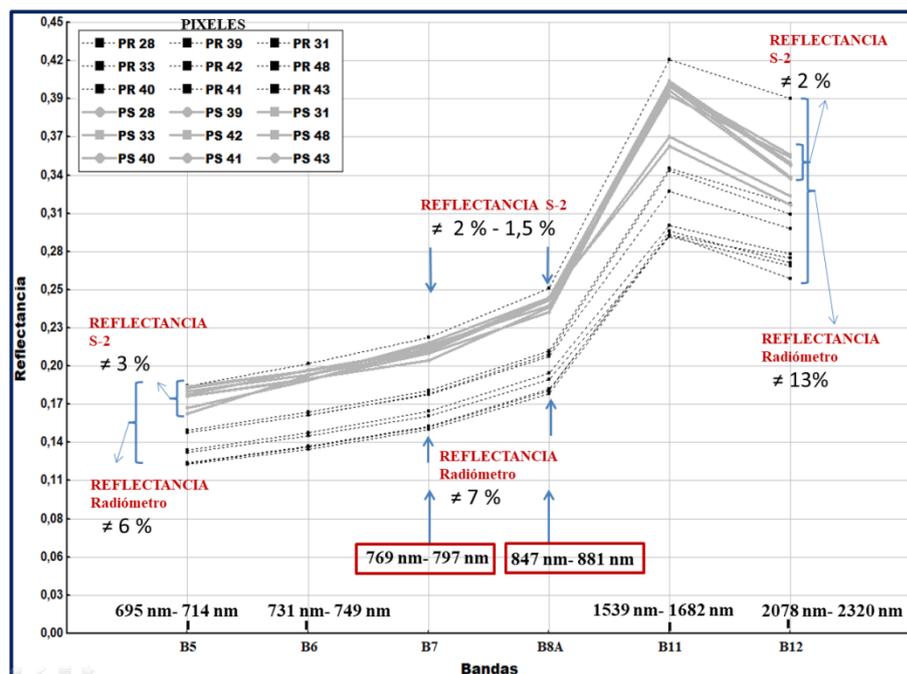


FIGURA 4.5 Firmas espectrales de los datos de radiometría y de Sentinel-2 para 20 m de resolución espacial. Líneas negras punteadas: las firmas de datos radiométricos. Líneas grises llenas: de datos satelitales.

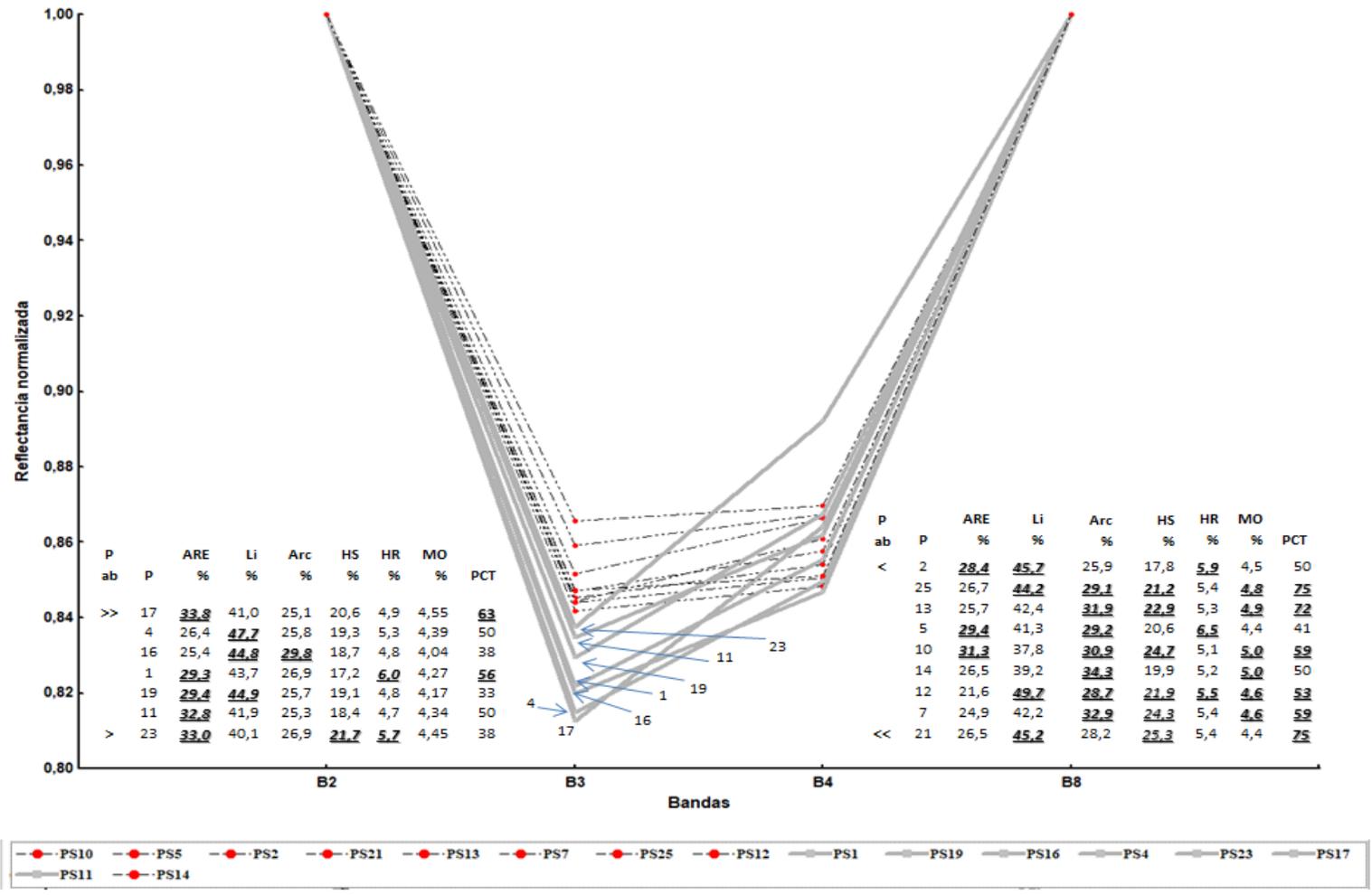


FIGURA 4.6. Firmas con el continuo removido de Sentinel-2 en B 3, 10 m de resolución espacial. Líneas llenas: firmas con mayor absorción B3. Líneas punteadas: firmas con menor absorción en B3. Abajo a la izquierda se indican los pixeles con mayor absorción (columna P), ordenados de mayor a menor absorción (columna “P ab”). A la de la derecha los que muestran menos absorción. Los atributos por encima de la media se señalan en negrita.

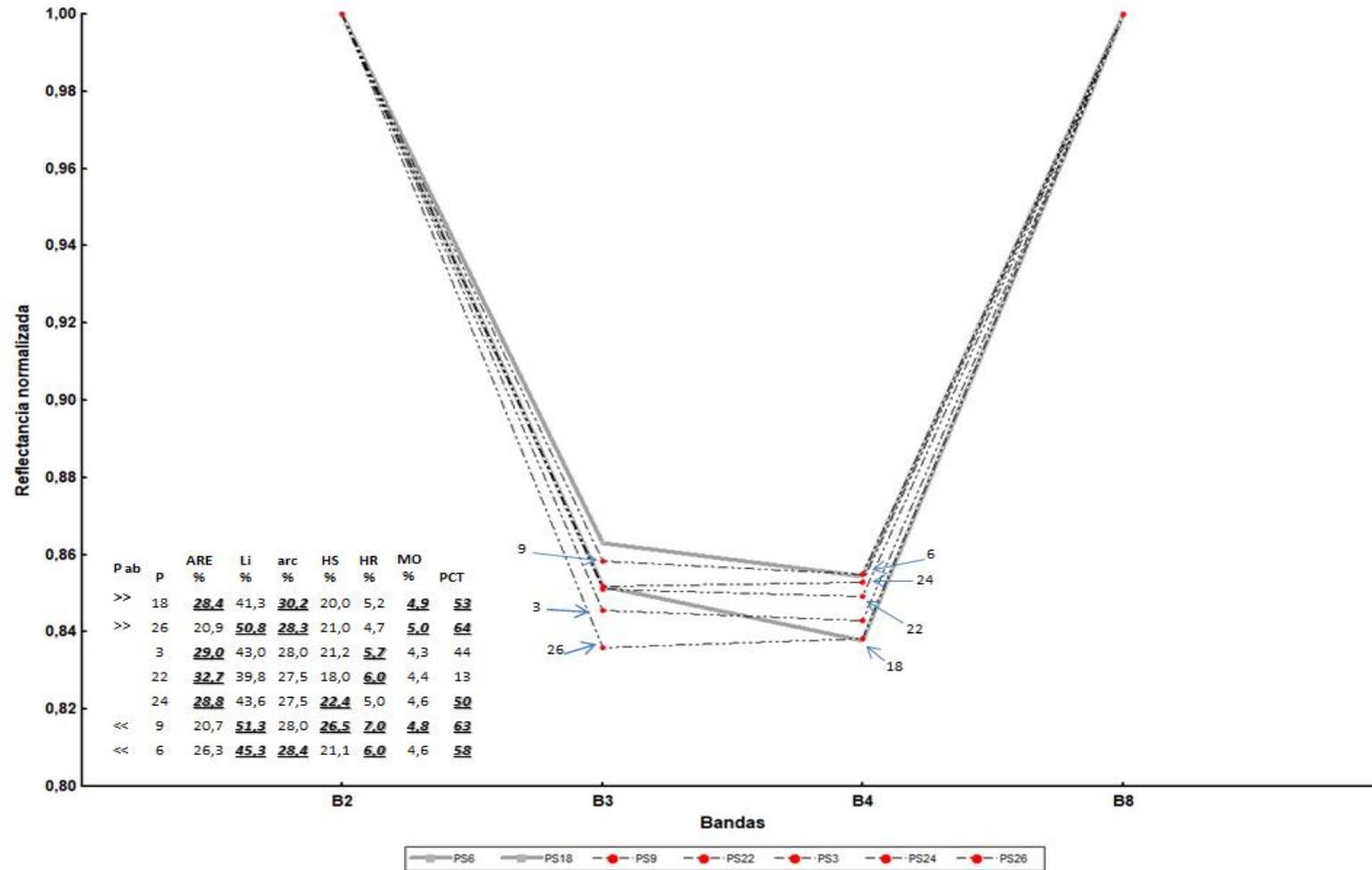


FIGURA 4.7 Firmas con el continuo removido de Sentinel-2 en B4, 10 m de resolución espacial. Líneas llenas: firmas con mayor absorción B4. Líneas punteadas: firmas con menor absorción en B4. La denominación de los pixeles aparece en la columna P. Los pixeles están ordenados de mayor a menor absorción en B4 (columna “P ab”). Los atributos por encima de la media se señalan en negrita

Las firmas de Sentinel-2 (20 m resolución espacial) con el continuo removido (Fig. 4.9), muestran que la absorción es evidente en las bandas B7 y B8a. Los píxeles **43** y **39**, son los que más absorben en B8a. Estos dos tienen los valores más altos de limo (> media) y valores variables en el resto de los atributos. Otras dos observaciones que absorben en B8a corresponden a los píxeles **42** y **41**, con los más altos contenidos de arena, y son muy diferentes entre ambos en el resto de los atributos. Las firmas correspondientes a los píxeles **28** y **31** se separan notablemente, con menor intensidad, en esta banda del resto. Estos píxeles tienen altos valores de arena y arcilla y bajos de limo, también con variaciones en el resto de los atributos. Dos firmas con similar absorción en ambas bandas, B7 y B8a, corresponden a píxeles (**48** y **33**) con altos contenidos de arcilla y humedad de suelo, bajos contenidos de arena, y difieren en el resto de los atributos. Por último el píxel **40** se separa de los anteriores en la B7, con mayor absorción. Éste presenta los valores más bajos de arcilla y muy bajos de humedad de suelo, pero tiene el valor más alto de limo en esta serie de firmas. Todos los píxeles, a excepción del píxel “40”, tienen mayor absorción en B8a que en B7.

Banda	PCT %	HR %	HS %	arc %	Li %	ARE %	MO %
B5	0,1147	-0,3618	-0,5033	-0,1867	0,5389	-0,5147	-0,1959
valor p	0,7689	0,3387	0,1672	0,6306	0,1344	0,1563	0,6135
B7	0,1477	0,1548	0,6455	0,8036	-0,6716	0,1657	0,5090
valor p	0,7045	0,6908	0,0604	0,0091	0,0476	0,6701	0,1617
B8a	0,0228	0,1708	0,1930	0,7004	-0,5576	0,1099	0,3069
valor p	0,9536	0,6603	0,6188	0,0356	0,1188	0,7784	0,4218
B12	0,2411	-0,2783	-0,3380	-0,0875	0,5041	-0,5539	-0,1394
valor p	0,5319	0,4684	0,3736	0,8228	0,1665	0,1217	0,7206

CUADRO 4.4. Correlación entre banda y atributo del área de entrenamiento de Sentinel-2 resolución 20 m. B5: 695 nm -714 nm. B7:769 nm-797 nm, B8a:847nm-881nm, B12:2078 nm- 2320 nm. PCT: proporción porcentual de cobertura total. HR y HS: humedad del rastrojo y del suelo respectivamente, arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica.

Si bien las bandas 5 y 12 tienen moderada correlación con, el limo y la arena,

ninguna es estadísticamente significativa (nivel de confianza del 95 %). De la misma manera ocurre entre la humedad de suelo y la B5. La arcilla y el limo son las variables que se correlacionan más fuertes y significativamente con la B7. Con la B8a, la arcilla tiene fuerte correlación positiva. El limo se correlaciona negativamente con ambas bandas y con la arcilla (Cuadro 4.4).

Las firmas de Landsat-8 tanto en el VIS como en el NIR no difieren entre sí, en términos de intensidades de reflectancia (Fig. 4.8), muy pocas se separan absorbiendo más en las B3 y B4. Sí se puede apreciar, alguna diferencia en intensidad entre firmas en el “SWIR2” (2037 nm- 2355 nm: B7). Las firmas radiométricas en cambio se separan con diferencias en reflectancia entre 3 % y 10 % (entre firmas extremas).

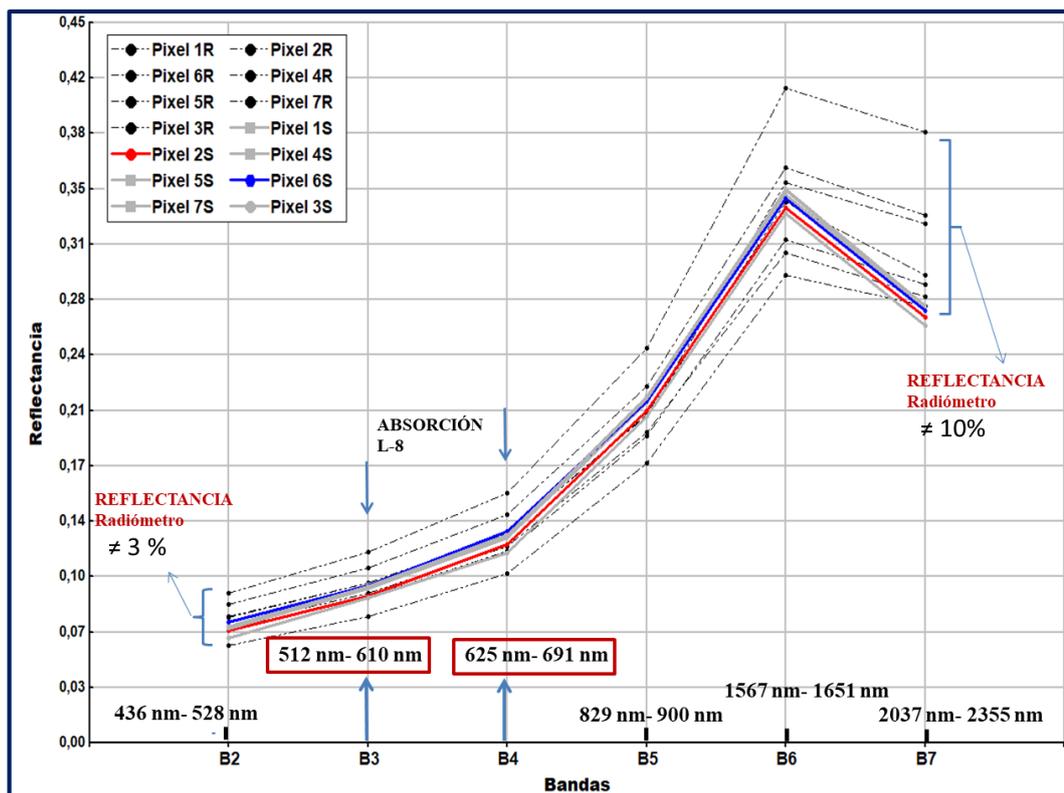


FIGURA 4.8 Firmas espectrales de los datos de radiometría y de L-8 para 30 m de resolución espacial. Con líneas punteadas las firmas de datos radiométricos y las de datos satelitales con línea llena.

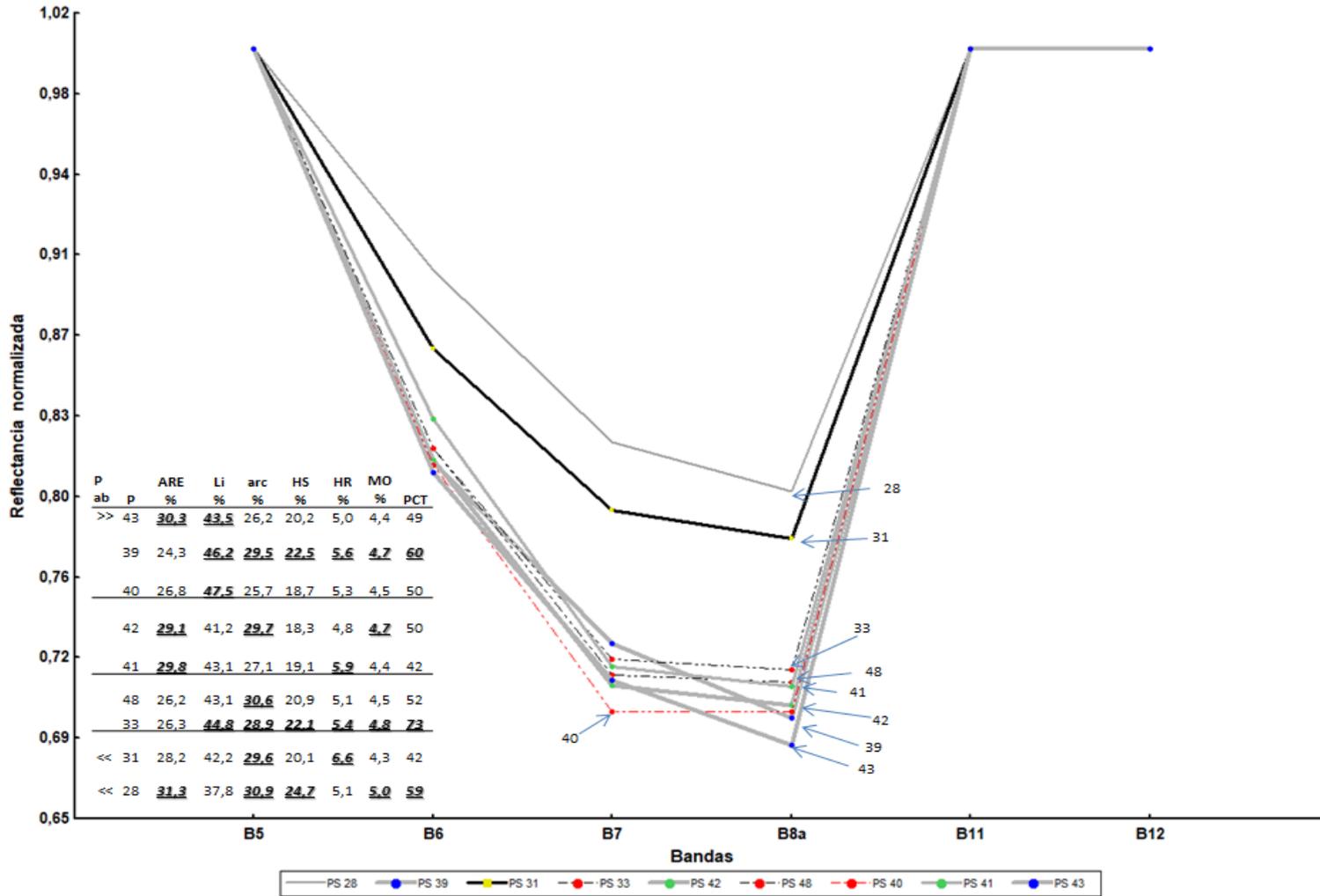


FIGURA 4.9 Firmas con el continuo removido de Sentinel-2 para 20 m de resolución espacial. Los pixeles cuya denominación aparece en la columna P, están ordenados de mayor a menor absorción en B8a (columna “P ab”). Los atributos por encima de la media se señalan en negrita.

Las firmas con el continuo removido (Fig. 4.10) evidencian que la región con absorción definida se da en las bandas 3 y 4 del visible. Las firmas correspondientes a los pixeles 2 y 6 se separan, en términos de reflectancia, del resto. Estos pixeles tienen altos valores de arena, limo y humedad del rastrojo, y difieren en los demás atributos. El resto de los pixeles, cuyas firmas aparecen superpuestas no se vinculan directamente a algún atributo. En Landsat-8 si bien hay absorción en estas bandas, no es factible discriminar entre pixeles en la mayoría de las firmas

Banda	PCT %	HR %	HS %	arc %	Li %	ARE %	MO %
B2	0,1917	0,1326	0,6159	0,5482	- 0,3514	-0,4082	0,7348
valor p	0,6806	0,7769	0,1408	0,2027	0,4396	0,3633	0,0599
B3	0,1407	-0,3062	0,6843	0,5609	-0,4607	-0,2783	0,8501
valor p	0,7635	0,5042	0,0899	0,1902	0,2981	0,5456	0,0154
B4	0,0940	-0,0636	0,6117	0,5170	-0,3541	-0,3537	0,7747
valor p	0,8412	0,8923	0,1444	0,2347	0,4358	0,4363	0,0408
B5	-0,0145	-0,2697	0,6965	0,6240	-0,5422	-0,2687	0,8431
valor p	0,9754	0,5586	0,0821	0,1342	0,2086	0,5601	0,0172
B6	-0,1655	-0,4017	0,6128	0,4960	-0,4623	-0,1705	0,8080
valor p	0,7228	0,3717	0,1434	0,2576	0,2963	0,7147	0,0279
B7	-0,2655	-0,2552	0,4785	0,3768	-0,3623	-0,1142	0,7034
valor p	0,5650	0,5807	0,2774	0,4048	0,4245	0,8074	0,0778

CUADRO 4.5. Correlación entre banda y atributo del área de entrenamiento de Landsat-8. PCT: proporción porcentual de cobertura total. HR y HS: humedad del rastrojo y del suelo respectivamente, arc: arcilla, Li: limo, ARE: arena, MO: materia orgánica

Sólo las B3 (512 nm-610 nm), B4 (625 nm-691 nm), B5 (829 nm-900 nm) y B6 (1567 nm-1651 nm) muestran correlaciones fuertes, estadísticamente significativas con materia orgánica. Si bien se dan también fuertes correlaciones con la granulometría (en especial con arcilla) y con humedad de suelo, en las bandas B3 y B4, éstas no son significativas (nivel de confianza 95 %) (Cuadro 4.5).

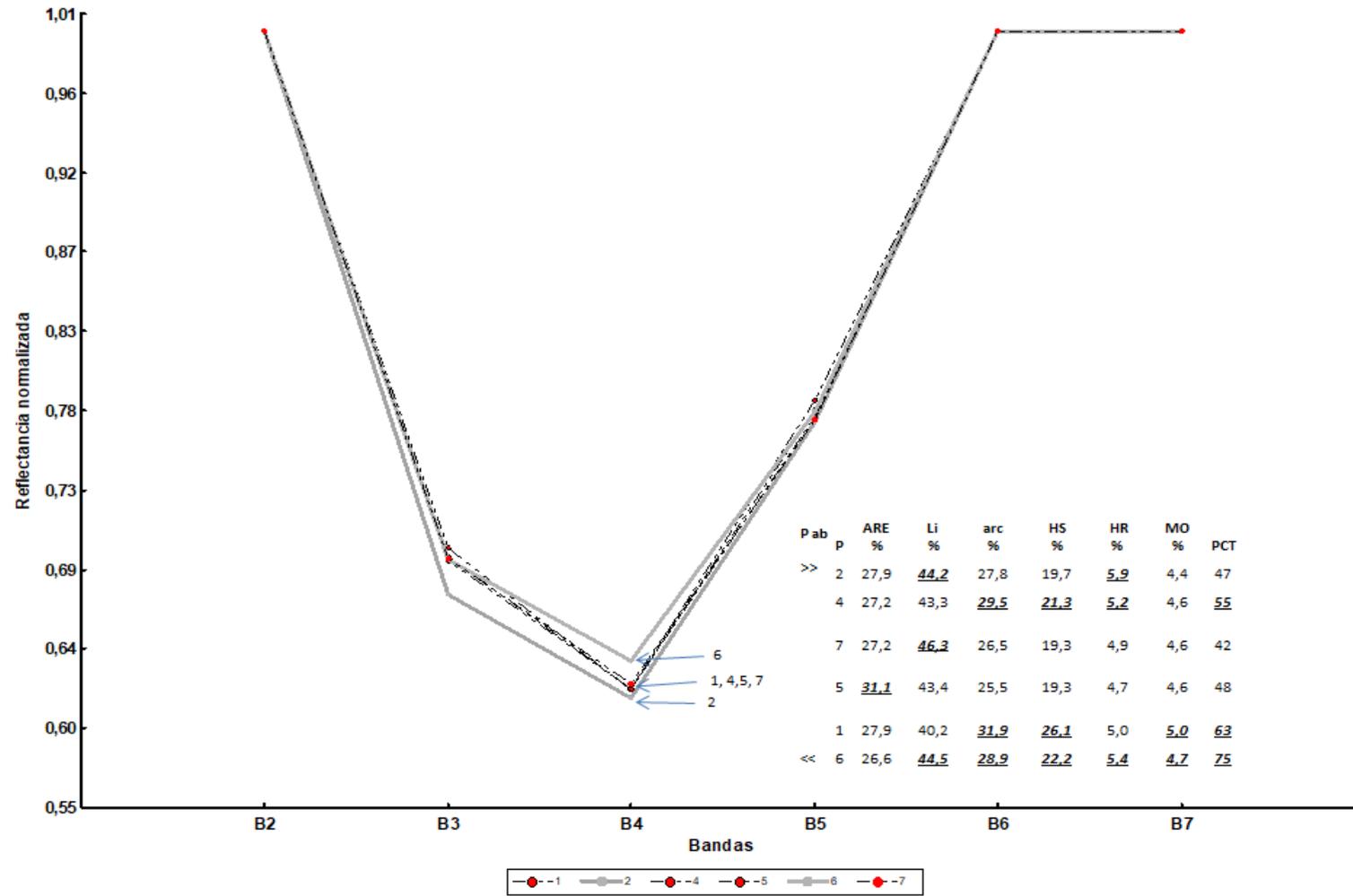


FIGURA 4.10 Firmas con el continuo removido de Landsat-8. En la tabla de abajo, derecha, la denominación de los pixeles aparece en la columna P, éstos están ordenados de mayor a menor absorción en la B4. Los atributos por encima de la media se señalan en negra.

En el Cuadro 4.6 se muestra, a modo de resumen, la correspondencia encontrada entre las regiones de absorción halladas en el capítulo 2 con las equivalentes encontradas en las bandas de L8 y S2 para los datos de S2017. Se indica, además, qué atributo/s tuvieron mayor profundidad de absorción a través del análisis gráfico, y cuál se correlacionó más en el análisis estadístico.

	<i>L-8</i> Banda	RE (nm)	Atributo	<i>S-2</i> Banda	RE (nm)	Atributo	<i>RAD</i>	RD (nm)	Atributo
<i>G</i>	B3	512-610	Li – ARE	B3	538-583	Li	VIS	604-745	NA
	B4	625-691	HR	B4	646-684	ARE			
<i>E</i>	B3	512-610	MO	B3	538-583	Li (-) - arc (+)			
	B4	625-691		B4	646-684				
<i>G</i>				B7	769-797	Li	NIR	910 -994	Li
				B8a	847-881	ARE			
<i>E</i>				B7	769-797	Li (-) - arc (+)			
				B8a	847-881	arc (+)			

CUADRO 4.6. Correspondencia entre resultados radiométricos y satelitales. L-8: Landsat 8, RE: Ancho de la banda satelital, S-2: Sentinel -2, RAD: denominación de región espectral en radiometría, RD: región espectral hallada con el radiómetro. *G*: Gráficamente. *E*: Estadísticamente, NA: no hubo absorción en S2017. Li: limo, ARE: arena, arc: arcilla, MO: materia orgánica, HR: humedad del rastrojo.

4.3.2. “Línea de suelos” en las imágenes satelitales

En las figuras que se muestran a continuación (Figs. 4.12, 4.13 y 4.14) se presentan dos gráficos para cada satélite (L-8 y S-2), en los cuales se altera el orden de las bandas en los ejes x e y para analizar si existen cambios en el comportamiento de los grupos de superficies.

La figura 4.12 muestra, en dos dimensiones, la distribución de los tres tipos de superficies para las combinaciones, “visible/infrarrojo”, correspondientes a la Banda 4/ Banda 8 (en S-2) y a la Banda 4/Banda 5 (en L-8). En ambos satélites, el suelo desnudo presenta los valores de reflectancia más bajos, y los grupos con rastrojos se orientan con valores más elevados. El suelo desnudo y suelo con rastrojos (SR) aparecen alineados, pero el grupo con rastrojo enmalezado (SRE) se orienta hacia valores incrementales de reflectancia en la dirección de la banda 8 (NIR).

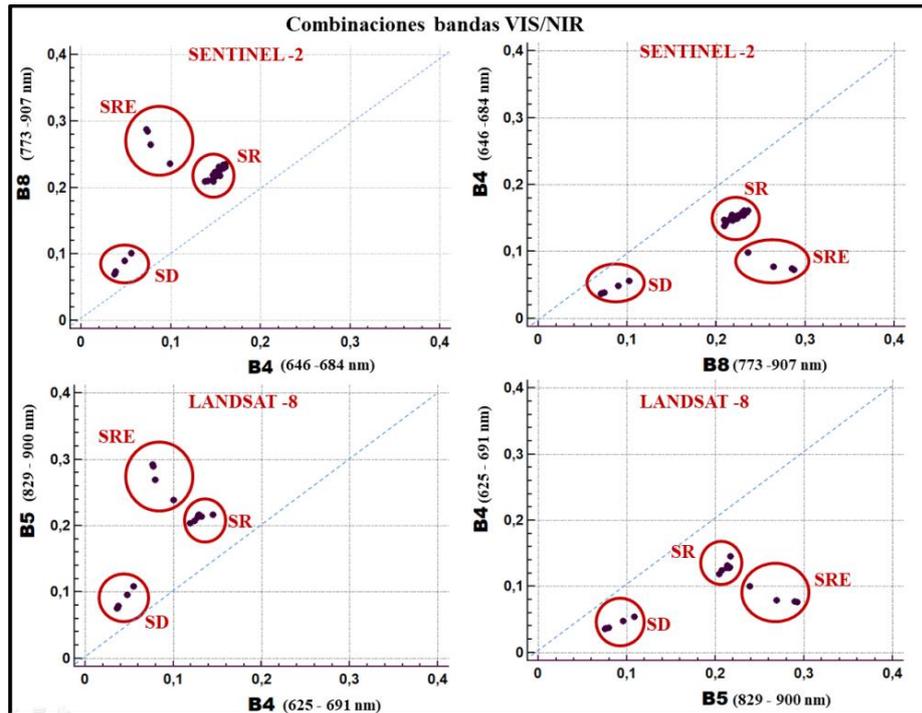


FIGURA 4. 11. Gráfico de dispersión de las observaciones en las combinaciones de bandas en el VIS-NIR. SD: suelo desnudo, SR: suelo con rastrojo, SER: suelo con rastrojo enmalezado. VIS: visible, NIR: infrarrojo cercano.

La predicción del modelo de regresión fue evaluada a través del estadístico R^2 que mide la efectividad de una variable para predecir otra variable, donde EAM mide el error de predicción promedio. Se calculó la correlación (Pearson) entre bandas. En Sentinel-2, empleando cualquiera de las dos bandas como variable independiente, ($x = B4$ o $x = B8$), los valores medidos con rastrojo y con suelo desnudo, permitirían predecir los valores medios de Y (95 % de confianza) (área rosada en la Fig.4.15). En cambio no, todos los valores individuales de Y , dado que algunos puntos quedan excluidos (área blanca en la Fig. 4.15). Comportamiento similar en predecir los valores medios se da con Landsat-8, pero los valores individuales de Y serían predecibles si se emplea la $B5$ como regresora (Fig.4.15).

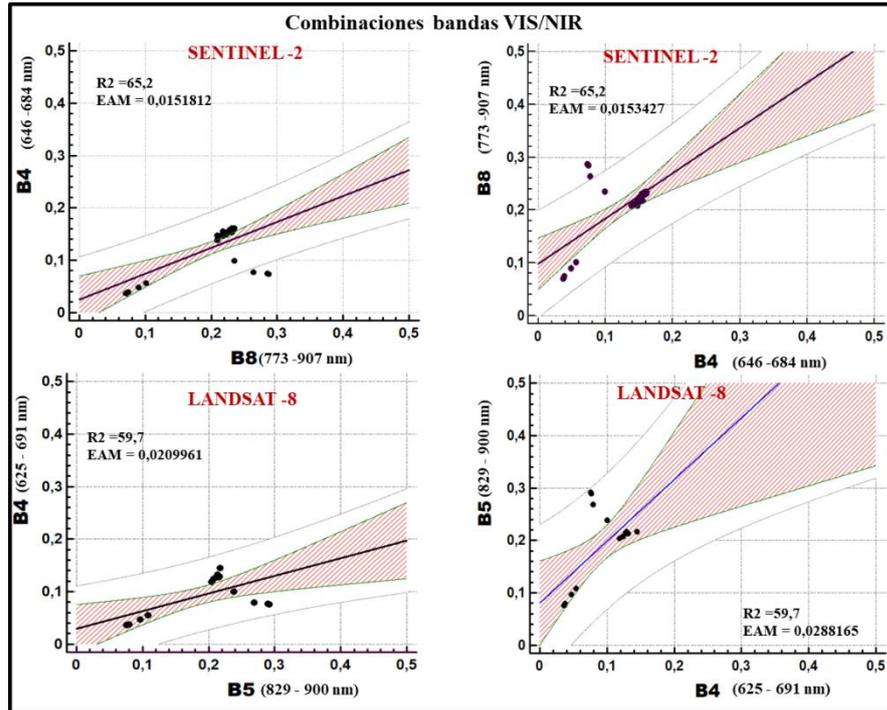


FIGURA 4.12. Relación lineal entre bandas VIS-NIR. Puntos negros los valores observados de las tres tipos de superficies. El área rosa es el intervalo de confianza de la media. El área blanca es el intervalo de confianza blanca para las observaciones individuales de las superficies. La línea sólida negra es la línea de regresión. EAM: Error absoluto medio.

En el Cuadro 4.7 se resume la correlación entre bandas, el % de ajuste (R^2) del modelo lineal, el error absoluto medio y test de significancia.

COMBINACIÓN	OBSERVACIONES (n)	r	R^2 %	p	EAM+	MODELO
B4*/ B8 S-2	31	0,81	65,2	0,0000	0,0153427	$B8 = 0,0657592 + 1,05675*B4$
B8*/ B4 S-2				0,0000	0,0151812	$B4 = 0,00468414 + 0,617013*B8$
B4*/ B5 L-8	15	0,77	59,7	0,0007	0,0288165	$B5 = 0,0551347 + 1,31186*B4$
B5*/ B4 L-8				0,0007	0,0209961	$B4 = 0,0128234 + 0,45539*B5$

*señala la variable independiente

CUADRO 4.7. Ajuste de las diferentes combinaciones de bandas VIS-NIR de ambos satélites. EAM: error absoluto medio.

La correlación entre bandas es positiva y moderadamente fuerte. Las combinaciones de S2 son levemente superiores a L8 para explicar la variabilidad de la respuesta, 65 % para S2 y 60 % para L8. EAM, representa el error absoluto medio y se

refiere al promedio de la diferencia absoluta entre el valor 'Y' observado y los valores predichos, este valor es bajo para ambos satélites.

Los tres tipos de superficies en las combinaciones SWIR/SWIR (B11/B12 para S-2) y B6/B7 para L-8) aparecen segregados en la Fig. 4.13.

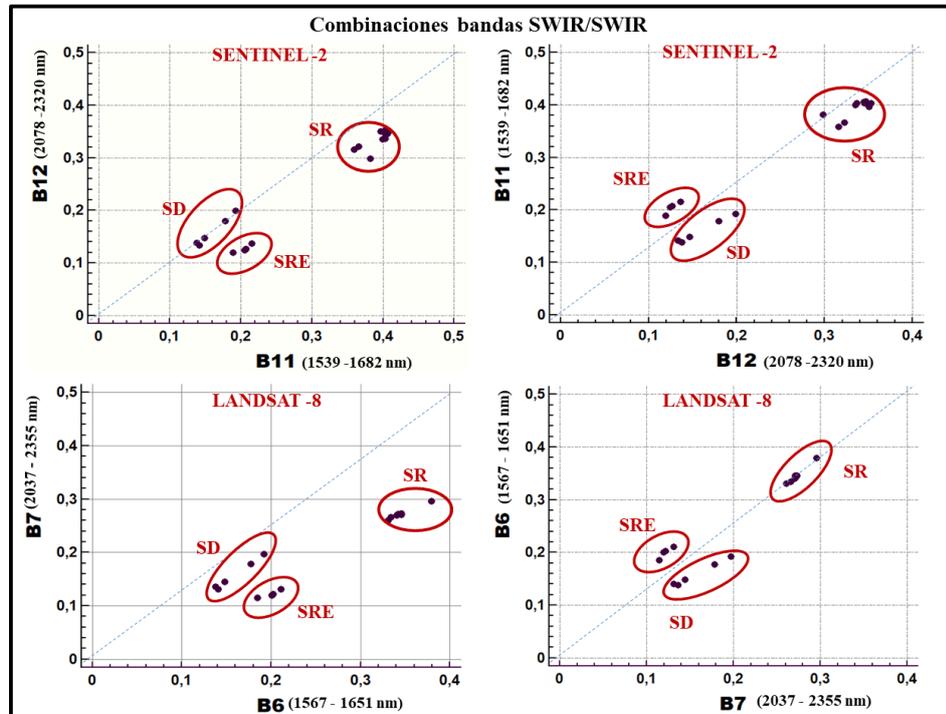


FIGURA 4.13. Gráfico de dispersión de las observaciones en las combinaciones de bandas en el SWIR/SWIR. SD: suelo desnudo, SR: suelo con rastrojo, SER: suelo con rastrojo enmalezado. SWIR: infrarrojo de onda corta.

En estas combinaciones, en ambos satélites, se separa bien suelo desnudo de suelo con rastrojo, tomando valores más bajos de reflectancia el grupo de suelo desnudo. En los gráficos de S-2 se observa una variación lineal entre los grupos con suelo desnudo y con rastrojos, o bien entre los grupos de rastrojos entre sí (no enmalezados y enmalezados). Los grupos de suelo con rastrojo enmalezado toman valores de reflectancia bajos, algo similares a suelo desnudo, con distinto origen.

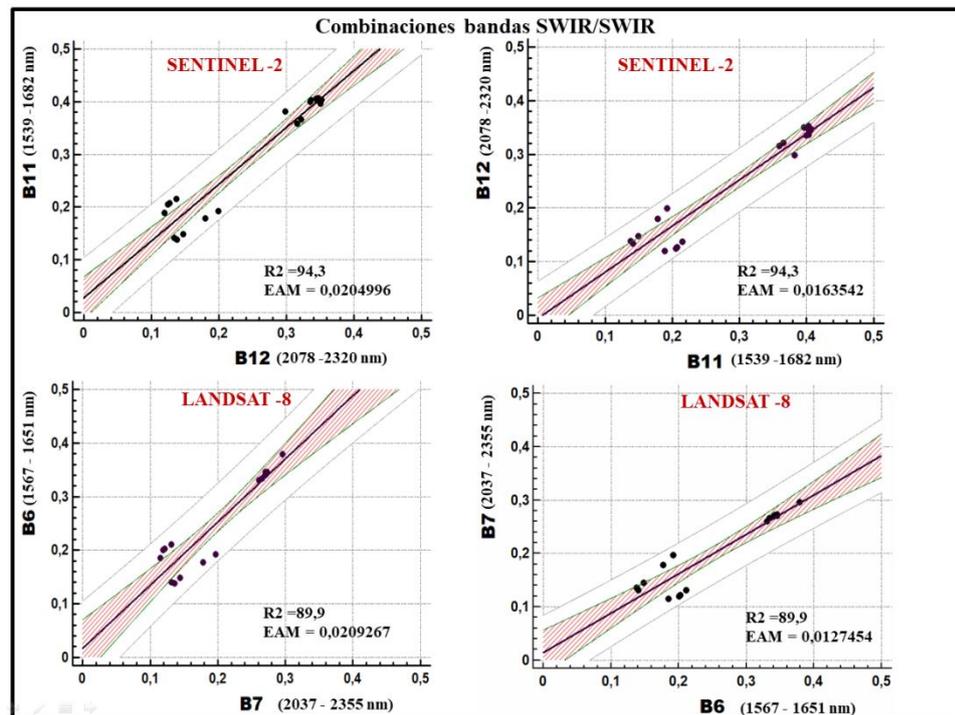


FIGURA 4.14. Relación lineal entre bandas SWIR-SWIR. Puntos negros los valores observados de las tres tipos de superficies. El área rosa es el intervalo de confianza de la media. El área blanca es el intervalo de confianza blanca para las observaciones individuales de las superficies. La línea sólida negra es la línea de regresión. EAM: Error absoluto medio.

Tanto en Sentinel-2 como en Landsat-8, todos los valores observados de suelo con rastrojo, y sólo algunos de suelo desnudo permitirían predecir los valores medios de Y (95 % de confianza) con cualquier banda como regresora. En todas las condiciones de cobertura analizadas son predecible los valores individuales de Y (95 % de predicción).

En el Cuadro 4.8 se resume, la correlación entre las variables, el % de ajuste (R^2) del modelo lineal, el error absoluto medio y test de significancia. La correlación entre bandas es fuerte y positiva. El coeficiente de determinación es levemente superior en Sentinel-2 (94 %) con respecto a Landsat-8 (90 %). El EAM es bajo para ambos satélites

COMBINACIÓN	OBSERVACIONES (n)	r	R ² %	p	EAM+	MODELO
B11*/B12 S-2	17	0,97	94,3	0,0000	0,0163542	B12 = 0,0111126 + 0,820469*B11
B12*/B11 S-2				0,0000	0,0204996	B11 = 0,00447695 + 1,14917*B12
B6*/B7 L-8	15	0,95	89,9	0,0001	0,0127454	B7 = 0,0304447 + 0,696252*B6
B7*/B6 L-8				0,0000	0,0209267	B6 = -0,0127365 + 1,29143*B7

* señala la variable independiente

CUADRO 4.8. Ajuste de las diferentes combinaciones de bandas SWIR-SWIR de ambos satélites. EAM. Error absoluto medio.

Los tres tipos de superficies en la combinación R/IR (B5/B8a para S-2) no aparecen segregadas (Fig. 4.15). Sólo se forman dos grupos alineados. Uno con las observaciones con suelo desnudo (valores bajos de reflectancia) y el otro, con rastrojos con valores más altos, pero no se discriminan rastrojos con o sin malezas. Esta distribución de los agrupamientos no varía en relación a la inversión de los ejes “x”; e “y”, en la región “red edge” (B5/ B8a de Sentinel-2). En esta combinación de bandas

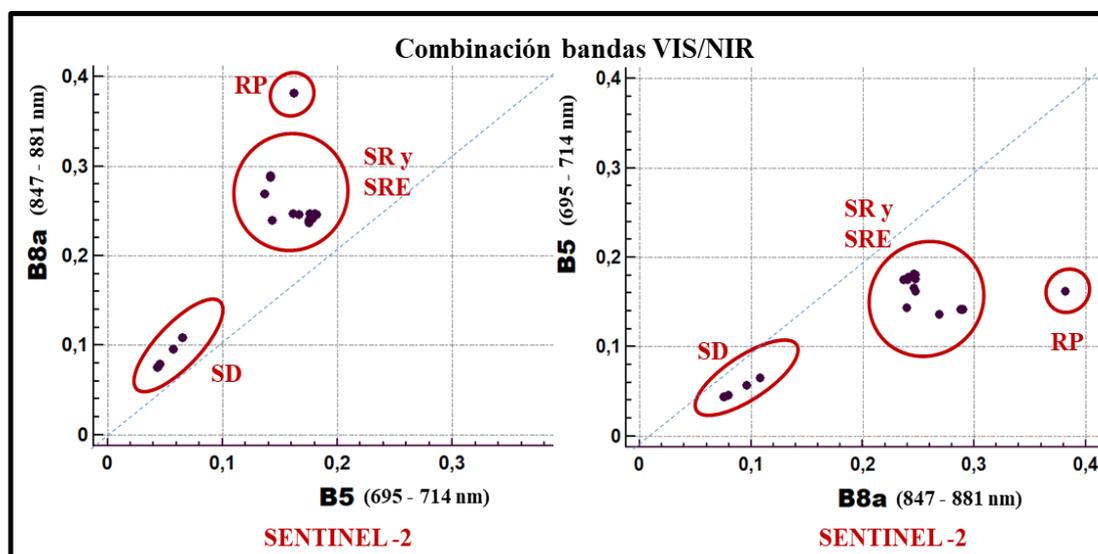


Figura 4.15. Gráfico de dispersión en la región R/IR en Sentinel-2. SD: suelo desnudo, SR: suelo con rastrojo, SER: suelo con rastrojo enmalezado, RP: rastrojo puro (100 % cobertura). VIS: visible, NIR: infrarrojo cercano.

Dentro del grupo con rastrojos los puntos dispersos incrementan sus valores en el mismo sentido de aumento de la reflectancia en B8a. Los dos puntos que se apartan (más dispersos) corresponden a observaciones de suelo con rastrojo enmalezado. El

punto individual señalado con un círculo se refiere al denominado de referencia en S2017 (punto 3.2.1) con 100% de cobertura total.

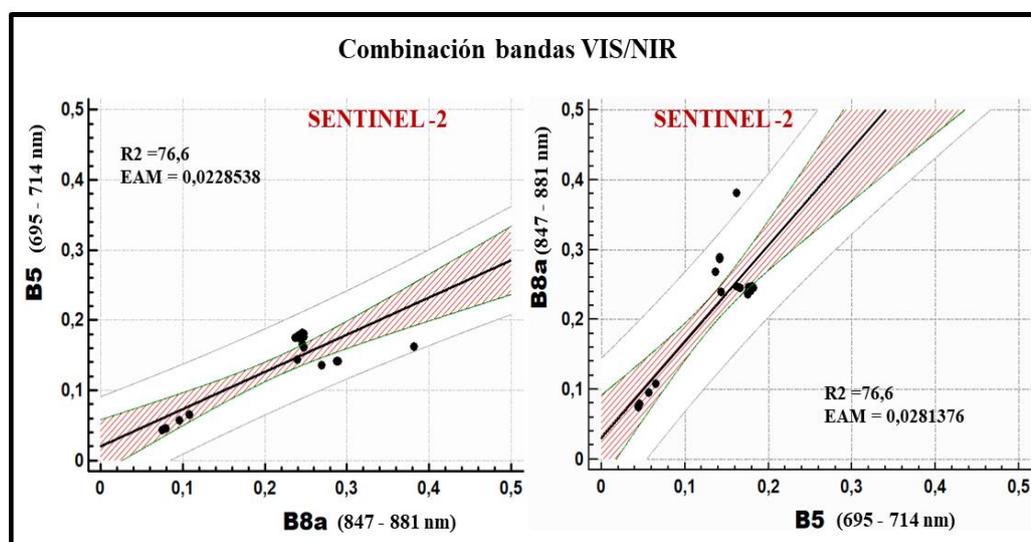


FIGURA 4.16. Relación lineal entre banda 5 y banda 8a en Sentinel-2. Puntos negros los valores observados de las tres tipos de superficies. El área rosa es el intervalo de confianza de la media. El área blanca es el intervalo de confianza blanca para las observaciones individuales de las superficies. La línea sólida negra es la línea de regresión. EAM: Error absoluto medio.

Usando la B5 como regresora todos los valores observados de suelo con rastrojo y de suelo desnudo, permitirían predecir los valores medios e individuales de Y (95 % de confianza).

En el cuadro 4.9 se muestran los ajustes y modelos respectivos.

COMBINACIÓN	OBSERVACIONES (n)	r	R ² %	p	EAM+	MODELO
B5*/ B8a S-2	17	0,87	76,6	0,0093	0,0281376	B8a = 0,0262721 + 1,36847*B5
B8a* / B5 S-2				0,0001	0,0228538	B5 = 0,0166216 + 0,559463*B8a

*se señala la variable independiente.

CUADRO 4.9. Ajuste de la combinación de bandas R-IR en Sentinel-2. EAM: error absoluto medio.

La correlación entre variables es moderadamente fuerte y positiva. El coeficiente de determinación explica un 77 % de la variabilidad de Y. El error absoluto medio (EAM) es bajo.

La combinación B12/B11 en Sentinel-2, empleando la banda 12 como variable independiente, es la de mejor ajuste. La línea de regresión tiene la menor pendiente (1,14917) y ordenada al origen (0,00447695).

4.4 Discusión

-Formas de absorción y vinculación con los atributos de superficie

Mejores resultados para estimar los atributos considerados han sido logrados con la imagen Sentinel-2 en comparación a Landsat-8. Las razones más importantes se citan a continuación:

-El procedimiento utilizado en las imágenes S2 para corrección atmosférica.

La información auxiliar que se emplea para la corrección atmosférica en Sentinel-2 surge de sensores incorporados en la misma plataforma, a diferencia de Landsat-8 que utiliza la información de datos simultáneos de MODIS.

-La resolución espacial. Se demostró la alta variabilidad espacial que tienen los atributos considerados en esta tesis. En este sentido, una resolución espacial con mayor detalle disminuye el error de estimación en el pixel.

-Anchos de bandas. Ambos satélites tienen diferentes funciones de respuesta espectral (SRSf) y anchos de bandas (Fig. 4.1). La función de respuesta espectral es considerada una de las principales razones de diferencias entre datos de satélites, su efecto puede enmascarar o disimular variaciones entre objetos (Teillet et al. 2007, Chander et al. 2013, Cundill et al. 2015). Teillet et al. 2004, en un trabajo de validación cruzada entre varios satélites con respuesta en el dominio del óptico (no incluye S-2), luego de una interesante revisión concluyen que los efectos en las diferencias en sus SRSf resultan significativos a pesar de la similitud de los filtros espectrales empleados en los satélites analizados.

En Sentinel-2 las bandas del NIR (en especial la banda 8) han sido seleccionadas más angostas para “esquivar” la contaminación por vapor de agua (Richter et al. 2011). En los resultados del capítulo 2, la profundidad de absorción en la región del NIR se halló afectada por la humedad del suelo y del rastrojo.

Estos argumentos demuestran la superioridad de Sentinel-2 frente a Landsat-8 en relación con discriminar propiedades de los suelos. Sin embargo, S2 en la región del SWIR tiene bandas muy anchas. Tal como se discutió en el capítulo 2, éstas resultan de gran utilidad para detectar y analizar características de los rastrojos, y de arcilla y materia orgánica.

Trabajos comparativos entre imágenes Sentinel-2 e hiperespectrales, encontraron muy buena precisión en la predicción de materia orgánica y arcilla (leves diferencias a favor de hiperespectrales) en la región del VIS-NIR. Pero, grandes diferencias en precisión fueron halladas en la región del SWIR. Los autores atribuyeron estos resultados a la pérdida de resolución espectral y a la menor relación señal/ ruido existente en esta región en Sentinel-2 (Gholizadeh et al. 2018; Castaldi et al. 2019). Datos simulados de EnMAP y utilizando una librería espectral, Ward et al. 2020 mostraron muy buena performance para mapear materia orgánica. Casa et al. 2020 en el marco de un proyecto basado en las primeras mediciones de PRISMA para la Comunidad Europea, obtuvieron muy buenos resultados para estimar arcilla y arena.

La estimación de propiedades de suelos debería mejorar superlativamente, si se articula en un futuro próximo, información de datos de imágenes hiperespectrales con Sentinel-2. Además se lograría expandir la multiplicidad de potenciales aplicaciones tomando ventaja de sus respectivas resoluciones (espacial, temporal y espectral). Las bandas de Sentinel-2 cubren el 59 % de las bandas hiperespectrales consideradas útiles para aplicaciones en suelos (Transon et al. 2018).

Sin duda que esta fusión será un desafío interesante, pero abre un nuevo reto vinculado al manejo y análisis de grandes volúmenes, y variedad de datos. Por ejemplo, EnMAP tiene más de 240 bandas cubriendo la región del VNIR-SWIR con un tamaño de pixel de 30 m (Guanter et al. 2015). En este sentido el cubo de datos de observación de la tierra (Earth Observation Data Cubes - EODC-) emerge como un nuevo paradigma. Mejora la interacción entre usuario, big data y objetivo, al acercar soluciones (por ej. aplicaciones, interfaces) para almacenar, organizar, manejar y analizar grandes y diversos volúmenes (espacio-temporales) de datos en formatos más accesibles (Giuliani et al. 2020).

-Comportamiento de la “Línea de suelos” en las imágenes satelitales

-Gráficamente todas las combinaciones analizadas separaron espectralmente en dos dimensiones, suelo desnudo de suelo con rastrojo. Para los datos utilizados, suelo desnudo toma valores muy bajos de reflectancia y suelo con rastrojo más elevados.

-Cuando existe una proporción cuantitativamente importante de malezas los rastrojos no enmalezados tienen valores de reflectancia inferiores a los enmalezados en las B8 de S2 y B5 de L8, posibilitando su distinción gráficamente. Debería evaluarse si este comportamiento se sostiene con diferentes proporciones de malezas y con contenidos variables de humedad. Daughtry et al. 2004, sostienen que fracciones pequeñas de vegetación verde tienen poco o nulo efecto sobre la reflectancia, pero sí, esta variable se ve afectada en escenas con más del 30 % de malezas.

La mejor relación lineal se da en la combinación B12/B11 en Sentinel-2, empleando la banda 12 como variable independiente, es la de mejor ajuste. La línea de regresión tiene la menor pendiente (1,14917) y ordenada al origen (0,00447695).

4.5. Conclusiones

En este capítulo se propuso evaluar la respuesta en la discriminación de los atributos de superficie con datos obtenidos desde los satélites Sentinel-2 y Landsat-8, respondiendo a los siguientes interrogantes:

- ¿Las firmas espectrales obtenidas a partir de datos satelitales tienen un comportamiento similar a las adquiridas con radiometría de campo?

En valores de reflectancia (intensidad) Landsat-8 no mostró diferencias entre firmas espectrales. En Sentinel-2 las diferencias en intensidad no superan la precisión absoluta de resolución radiométrica planteada para el MSI (3 %).

- ¿En qué bandas satelitales es factible obtener información sobre las propiedades de los suelos y en cuáles sobre los rastrojos?

En las bandas 3 y 4 de la región del visible se aislaron formas de absorción, encontrando que las mismas contienen información sobre el limo y la arcilla, en Sentinel-2. Estos resultados son coincidentes a los encontrados con radiometría a campo. En cambio en Landsat-8 no se hallaron coincidencias con los datos radiométricos. La materia orgánica fue el atributo fuerte y positivamente correlacionado con estas bandas en la imagen Landsat-8.

En la región del NIR sólo se observó absorción, tanto en B7 como en B8a en Sentinel-2. El limo y la arcilla mostraron fuertes correlaciones con B7, y la arcilla, con B8a.

- ¿Incide el tamaño del pixel y el ancho de banda, para discriminar atributos de superficie a través de formas de absorción?

Comparando las imágenes analizadas en este capítulo, hubo una mayor discriminación de puntos medidos experimentalmente, a escala detallada, en Sentinel-2 que en Landsat-8. No fue factible discriminar pixeles en Landsat-8. La resolución espacial de 10 metros en Sentinel-2 permitió que se triplicara la cantidad de pixeles en

el área de entrenamiento con respecto a Landsat-8. Esto permite que pueda ser mejor interpretada la alta variabilidad espacial medida en las diferentes superficies agrícolas. La discriminación de componentes del suelo fue mayor en Sentinel-2 que en Landsat-8, debido a la presencia de bandas más angostas en la región del NIR, la cual contiene gran información sobre las propiedades de los suelos.

- ¿Es viable discriminar con datos satelitales, superficies con rastrojo de aquellas con suelo desnudo? Es posible definir una línea de suelos?

Todas las combinaciones de bandas analizadas mostraron buenos resultados en discriminar superficies con rastrojos de suelos desnudos. Sin embargo la mejor relación lineal se da en la combinación B12/B11 en Sentinel-2, empleando la banda 12 como variable independiente. Para esta combinación la línea de regresión tuvo la menor pendiente (1,14917) y ordenada al origen (0,00447695).

CAPÍTULO 5. Conclusiones y Recomendaciones

En el capítulo 1 se han discutido las imprecisiones que, en el estado actual del conocimiento, presentan las imágenes satelitales al momento de estimar atributos y propiedades del suelo en superficies agrícolas.

Uno de los inconvenientes aún no resueltos es caracterizar la “condición de suelo desnudo” a partir de la cual pueda obtenerse respuesta espectral de las propiedades de los suelos.

Esta caracterización implica detectar espectralmente la presencia, el tipo, y la proporción de rastrojos y deducir la incidencia que éstos tienen en la respuesta espectral de las propiedades de los suelos.

En esta tesis se demostró que la proporción de rastrojos habitualmente presente en lotes agrícolas no constituye un impedimento para obtener información espectral sobre las propiedades de los suelos. Además se determinó que las interacciones que existen entre los atributos superficiales de los suelos, constituyen el principal determinante de la variabilidad espectral de las superficies agrícolas.

El análisis se realizó en torno a las propiedades de los suelos principalmente vinculadas con la dinámica hídrica de los mismos. En la introducción se describieron interacciones entre propiedades de suelos y dinámica del agua, destacando el importante rol que tienen la textura y la materia orgánica. En esta tesis se aislaron regiones espectrales que contienen información sobre estas propiedades de los suelos.

En los párrafos siguientes se describen los principales logros obtenidos en los diferentes capítulos.

5.1. El aporte de la radiometría

El capítulo 2 convalidó uno de los supuestos planteados al constatar que la radiometría de campo permitió caracterizar la respuesta espectral de los diferentes componentes (e interacciones) que existen en distintos escenarios agrícolas.

Este análisis se sustentó en adquisiciones a campo en sitios (lotes) que integran diferentes ambientes físico-geográficos, con distintas especies de coberturas de rastrojo (soja y maíz) y en proporciones variables.

Los resultados mostraron inicialmente que existe una altísima variabilidad de firmas espectrales dentro de un mismo lote, y aún en sitios con una misma proporción de cobertura. En las 137 firmas espectrales obtenidas a campo, se definieron dos patrones de formas de absorción diferentes dentro del óptico. Estos patrones que se denominaron “picos” y “formas cóncavas”, variaron en profundidad de absorción y a veces estuvieron ausentes en algún punto de medición de los tres diferentes sitios medidos.

Del análisis de estos resultados, se encontró que:

La región del infrarrojo de onda corta es la única que contiene información vinculada al tipo y estado de descomposición de los rastrojos. Esto último tiene un rol determinante en la variabilidad de cromóforos como celulosa, hemicelulosa, trehalosa y lignina de los rastrojos. Las diferencias en concentración de estos componentes se considera que surgen de los distintos manejos en los barbechos realizados en cada sitio. La información de campo permitió reconocer la variación existente en cuanto a “composición o constitución del rastrojo” en las tres coberturas y por ende asumir que esas diferencias en su “constitución” incidieron en las proporciones relativas de los polímeros de celulosa y lignina., las que influyeron en el estado de descomposición de los rastrojos como también en la diversidad de especies presentes en cada cobertura.

Tanto el visible como el infrarrojo cercano, contienen información fundamentalmente vinculada a la composición granulométrica del suelo.

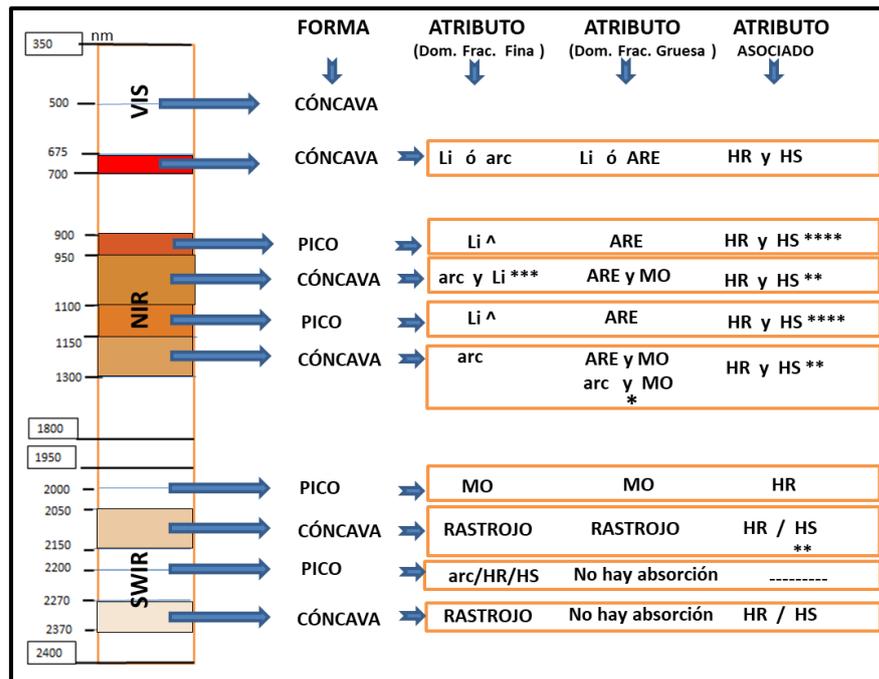
En el infrarrojo cercano se encontró una alta variabilidad en profundidades de absorción, no solo entre sitios sino también dentro de cada sitio (transecta). Los diferentes patrones encontrados y los atributos vinculados a los mismos se resumen en el Cuadro 2.33.

El análisis multivariado (Análisis de Componentes Principales) de las mediciones en cada sitio permitió responder a una de las preguntas de investigación planteadas en este capítulo referida a, si las interacciones entre los diferentes componentes de la superficie inciden o no, en la respuesta espectral. Este análisis mostró que la variabilidad observada en las profundidades de absorción de las firmas obtenidas dentro de un mismo lote, y aún en puntos con una misma proporción de cobertura con rastrojos, está controlada por la correlación entre los componentes medidos en cada punto de observación.

En el visible se encontraron patrones de formas cóncavas, muy profundos y vinculados a la concentración de alguno de limo o arcilla y la materia orgánica. También se halló variabilidad en la profundidad en estas formas de absorción.

La humedad del rastrojo y del suelo mostró incidir en la variabilidad de la profundidad de absorción en el VIS-NIR cuando ésta está positivamente correlacionada con el tamaño de partícula dominante.

En la Fig. 5.1 se resumen los hallazgos, antes comentados, obtenidos mediante la radiometría. En la misma se vincula la región espectral con el o los, atributos que dan cuenta de la presencia de las formas de absorción. Se señalan los atributos (“asociados”) que contribuyen a la variabilidad en la profundidad de estas formas de absorción.



* Sólo en puntos que no absorben entre 950 y 1100

** Sólo hay asociación con los puntos de los sitios que dominan fracciones finas

*** El comportamiento de las formas es muy variable

**** Sólo hay asociación con los puntos de los sitios que dominan fracciones gruesas

^ Sólo en Fr Li o Fr arc Li -fuerte vinculación

FIGURA 5.1. Síntesis sobre los patrones de absorción en las regiones del espectro óptico. Atributo se menciona aquel vinculado con la presencia de la forma de absorción, y atributo asociado al que está vinculado con la variabilidad en la profundidad de estas formas. Se señalan con color y flechas los rangos espectrales en los cuales se encontraron formas de absorción.

Uno de los objetivos específicos planteados se ha referido a caracterizar si la “proporción de cobertura de rastros” y “tipo de especie” incidía en la respuesta espectral de las propiedades de los suelos. Los resultados mostraron que tanto en el visible e infrarrojo, estas condiciones de los atributos no influyen sobre la presencia de bandas de absorción asociadas a propiedades del suelo.

5.2. La “Línea de Suelos” con datos radiométricos

En el capítulo 3 se plantea en la introducción, de manera crítica y mediante una exhaustiva compilación bibliográfica, la necesidad de explorar el comportamiento de la “línea de suelo” entre superficies agrícolas sin cultivos y con rastros.

Uno de los méritos de este capítulo es que los resultados obtenidos se basaron en datos experimentales, asimilando a los mismos la variabilidad que generan las

complejas interacciones que existen en los suelos. Otro logro es haber podido explorar el comportamiento de esta línea en dos suelos diferentes.

Esta experimentación condujo a la necesidad de obtener varios espectros en laboratorio con suelo desnudo de muestras en las que se extrajeron espectros a campo. En consecuencia, se construyó una “caja negra” para mediciones en laboratorio, con diseño e implementos estandarizados (Fig. 3.1).

Bajo la premisa de que bandas espectrales altamente correlacionadas aseguran mayor linealidad entre espectros y predictibilidad de la línea de suelos, se seleccionaron, entre los rangos espectrales resultantes del capítulo 2, las combinaciones de bandas con las correlaciones más elevadas. Preliminarmente se empleó la misma metodología (análisis de componentes principales) usada en los trabajos originales que dieron lugar el concepto de línea de suelos, pero los resultados fueron muy diferentes. Aquí, la variabilidad de las mediciones obtenidas en laboratorio y en dos diferentes lotes con rastrojos, es explicada en los 6 o bien 7 primeros componentes. Este resultado fue diferente a los trabajos originales, en donde se compararon mediciones espectrales de vegetación verde y de múltiples variantes de suelo desnudo, en laboratorio, y en las cuales, la variabilidad es explicada sólo por los dos primeros componentes.

Un análisis gráfico en dos dimensiones de los dos primeros componentes obtenidos, mostró que todas las mediciones espectrales (de campo en ambos lotes, y de laboratorio) se separan en dos grupos según su cobertura, uno de suelo desnudo y el otro de suelo con rastrojos.

Un análisis discriminante permitió corroborar y evaluar la separabilidad de los agrupamientos obtenidos anteriormente. Se generaron funciones lineales de las variables medidas, mostrando que todas las variables consideradas en esta tesis contribuyen con distinto peso a la separabilidad de suelos desnudos y suelos con rastrojos, y que la

textura (arcilla, limo y arena) es la variable que más contribuye a esta separabilidad. Este análisis permitió seleccionar las combinaciones óptimas de bandas para cada escena que minimizan la probabilidad de agrupar erróneamente las observaciones en los grupos predefinidos. Las mejores combinaciones de bandas se encontraron entre bandas NIR/NIR (935 nm/1006 nm), y entre bandas NIR/SWIR (1485 nm/2083 nm).

5.3. Los atributos de superficie en imágenes satelitales

El objetivo planteado en el capítulo 4 fue examinar la respuesta espectral de los datos obtenidos desde los satélites Sentinel-2 y Landsat-8, en relación a la información hallada con radiometría en el capítulo 2 y en la línea de suelos (capítulo 3).

Los resultados logrados no sólo consolidan uno de los supuestos planteados de que la radiometría de campo puede constituirse en una herramienta complementaria contribuyendo a mejorar la precisión en la respuesta espectral de superficies con rastros, sino que además respondieron las preguntas de investigación formuladas.

- Respuesta espectral de los atributos medidos

La separación de firmas espectrales en términos de intensidad no tuvo buena respuesta con imágenes. Landsat-8 no mostró diferencias en intensidad entre firmas. En Sentinel-2 las diferencias en intensidad, no superan la precisión absoluta de resolución radiométrica planteada para el instrumento multi-espectral (3 %). En radiometría, se observaron diferencias en intensidad para los mismos atributos entre 3 % y 12 % de reflectancia.

Las formas de absorción de datos satelitales se vinculan con propiedades del suelo sólo en la región del VIS-NIR. La correspondencia encontrada, en términos de rangos de absorción y atributos asociados, entre datos radiométricos y satelitales se muestra en el Cuadro 4.6.

En el visible tanto en Sentinel-2 como en Landsat-8, las formas de absorción se dan en las bandas 3 y 4 y vinculadas fundamentalmente a la arcilla y al limo.

La discriminación de pixeles con imágenes Sentinel-2 en dichas bandas, es mucho mayor que la obtenida a partir de Landsat-8. En este solo se observó absorción en dos pixeles.

En el NIR no se encontró respuesta en Landsat-8. Si hubo absorción, tanto en B7 como en B8a en Sentinel-2. El limo y la arcilla fueron los atributos fuertemente correlacionados con B7. Mientras que la arcilla tuvo fuertes correlaciones con B8a.

-La línea de suelos con imágenes satelitales

Se mostró que es factible discriminar gráficamente, con datos satelitales, superficies con rastrojos de aquellas con suelo desnudo en distintas combinaciones de bandas pero con diferente precisión. Un análisis de regresión permitió concluir que las combinaciones SWIR/SWIR de ambos satélites mostraron ser las mejores para predecir las tres coberturas analizadas (suelo desnudo, suelo con rastrojo y suelo con rastrojo altamente enmalezado).

En superficies con rastrojos con malezas en alta proporción las bandas que mejor discriminaron suelos con rastrojo, con y sin malezas (dentro de las combinaciones examinadas), resultaron ser aquellas en las cuales la reflectancia de la vegetación fotosintéticamente activa es alta, B8 en Sentinel-2 y B5 en Landsat-8.

5.4 Conclusiones

Tradicionalmente en el campo de la investigación agrícola se han empleado imágenes satelitales para estudiar y monitorear cultivos, o bien como una herramienta de gran utilidad para el ordenamiento y el uso del territorio, considerando el suelo, una cobertura, cuya presencia y distribución es factible cuantificar. Pero en el campo de la ciencia del suelo esta tecnología no ha sido suficientemente aplicada.

En el capítulo 2 se hizo referencia al progresivo incremento, en la última década, de las librerías espectrales en el mundo y su importancia en aplicaciones para el mapeo y predicción de propiedades de suelos. Esta tesis ha generado una diversidad de firmas espectrales que se constituyeron en los primeros aportes de datos radiométricos sobre suelos publicados en la librería espectral generada por CONAE a partir del año 2017 (<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/aplicaciones-de-la-informacion-satelital/biblioteca-de-firmas-espectrales>). En este contexto esta investigación contribuye a fortalecer e iniciar un cambio en los análisis de las clasificaciones digitales temáticas, principalmente en las áreas productivas de cultivos.

Estimar propiedades del suelo con alguna certidumbre por medio de imágenes implica primariamente, detectar la existencia de una “condición de suelo desnudo” que asegure que la respuesta espectral es aportada solamente por las propiedades del suelo.

Por tal motivo en relación a valorar la condición de suelo desnudo en imágenes y a la luz de los resultados obtenidos, se sugiere:

Procurar información

- Sobre la duración del barbecho, de manera de considerar la incidencia de este en el estado de descomposición del rastrojo.

- Sobre el manejo del lote (barbecho químico o mecánico), antecedentes de la rotación (cultivos antecesores), de manera de considerar la incidencia de la diversidad de rastrojos presentes en la cobertura.

-Adquirir imágenes coincidentes con el periodo de barbecho en la zona agrícola en la que se quieran estimar propiedades de suelo. Las imágenes deben ser analizadas en períodos libres de vegetación fotosintéticamente activa y en este sentido la fecha de la imagen debe ajustarse al momento de pre-siembra, en el cual existe una alta probabilidad de tener un bajo o ausente stand de malezas.

Al momento de analizar imágenes se debe considerar que:

-Las firmas espectrales constituyen una herramienta de utilidad para distinguir formas de absorción. La posición en el espectro, profundidad, asimetría y amplitud, de estas formas contribuyen a la caracterización de la respuesta espectral de una escena. Este análisis se potencia aplicando técnicas de preprocesamiento de firmas espectrales. En este sentido “continuum removal” mostró ser una transformación valiosa.

-La línea de suelo es un instrumento eficiente para caracterizar la “condición de suelo desnudo” presente en un lote. Esta tesis mostró que es factible distinguir gráficamente suelo desnudo de suelo con rastrojo, con datos satelitales. Además, generó información para que la línea de suelo sea analizada en el espacio espectral óptimo con relación a minimizar el error de predicción de ambas condiciones de superficie. También mostró que es posible predecir variaciones en coberturas con rastrojos cuando se da la presencia de altos contenidos de malezas.

5.5 Futuras investigaciones

Un hallazgo de esta tesis, en función del estado actual del conocimiento, es haber mostrado que es factible obtener respuesta sobre la composición granulométrica del suelo en imágenes Sentinel-2, en las bandas 3 y 4 del visible, y bandas 7 y 8a del infrarrojo cercano. Esto implica un potencial en Sentinel-2 para generar mapas temáticos de granulometría de suelos, que podrían constituirse en un aporte para

-Mejorar modelos espaciales de obtención de mapas digitales de suelos.

-Generar mapas de infiltración que se constituyan en información de entrada en modelos hidrológicos.

-Contribuir al entendimiento de los mapas de rendimiento generados con equipos de precisión.

-Monitorear cambios granulométricos en cuencas o lotes y vincularlos con procesos de erosión/degradación.

Por otro lado, los resultados mostraron que de las formas de “picos” en el infrarrojo, las más profundas, están relacionadas con observaciones de suelo con valores de limos ≥ 45 %, y valores intermedios (alrededor de la mediana) de humedad del rastrojo. Lograr extrapolabilidad espacial de estos resultados por medio de cartografía temática, requiere poder predecir la concentración de estos componentes a partir de información espectral. Se plantea calibrar los espectros obtenidos para predecir fundamentalmente arcilla, limo, humedad del rastrojo y del suelo, seleccionando técnicas multivariadas adecuadas para los suelos en cuestión. En primera instancia esto implica generar modelos que determinen las combinaciones lineales óptimas de las diferentes bandas espectrales para estimar las concentraciones de los componentes del suelo. Estos resultados de calibración así logrados, luego de validados, serían empleados para predecir la concentración en nuevas observaciones previamente registradas con radiometría y en imágenes satelitales.

Bibliografía

- Ackerson J.**, Morgan C., Ge Y. (2017). Penetrometer-mounted VisNIR spectroscopy: Application of EPO-PLS to in situ VisNIR spectra. *Geoderma* 286, 131–138.
- Adeline K.**, Gómez C., Gorretta N., Roger J. (2017). Predictive ability of soil properties to spectral degradation from laboratory Vis-NIR spectroscopy data. *Geoderma* 288,143–153.
- Agelet, L.** (2011) Single seed discriminative applications using near infrared technologies. *PHD Thesis*. Department Agricultural and Biosystems Engineering. Iowa State University.218p.
- Aguilar J.**, Evans R., Daughtry C. (2012a).Performance Assessment of the Cellulose Absorption Index Method for Estimating Crop Residue Cover. *Journal of Soil and Water Conservation*. 67 (3) 202-210. doi:10.2489/jswc.67.3.202-210.
- Aguilar J.**, Evans R., Vigil M., Daughtry C. (2012b).Spectral Estimates of Crop Residue Cover and Density for Standing and Flat Wheat Stubble. *Agronomy Journal*. 104 (2):271-279. doi:10.2134/agronj.2011.0175.
- Ahmadian N.**, Demattê J., Xu D, Borg E., Zölitz R .(2016) A New Concept of Soil Line Retrieval from Landsat 8 Images for Estimating Plant Biophysical Parameters. *Remote Sensing*. 8, 738: 1-23 doi: 10.3390/rs8090738.
- Angelopoulou T.**, Balafoutis A.,Zalidis G, Bochtis D. (2019). From Laboratory to Proximal Sensing Spectroscopy for Soil Organic Carbon Estimation-A Review. *Sustainability*, 12, 443; doi:10.3390/su12020443
- Antón Martínez M.** (2007). Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta. *Tesis doctoral* Departamento de Física de la *Universidad de Extremadura*. Correo e.: publicac@unex.es . <http://www.unex.es/publicaciones>.
- Bajpai P.** (2016). Structure of Lignocellulosic Biomass. Chapter 2.Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production, *SpringerBriefs in Green Chemistry for Sustainability*; 7-12 doi 10.1007/978-981-10-0687-6_2.
- Baret F.**, Guyot G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35,161
- Baret F.**, Jacquemoud S., Hanocq F. (1993). The Soil Line Concept in Remote Sensing. INRA Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet Cedex, France. *Remote Sensing Reviews*, 1993, Vol. 7, pp. 65-82.
- Baumgardner M.**, Silva L., Biehl L., Stoner E.(1985). Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, Volume 38, pp 1 – 44.
- Ben-Dor E.**; Banin, A. (1995). Near infrared analysis (NIRA) as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science. Society. of America Journal*, 59:364-372.
- Ben Dor E.**, Epema G. (1997). Soil reflectance. 68p. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/200458942_Soil_Reflectance
- Ben Dor E.** (2002). Quantitative Remote Sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*.Volume 75, pp173-242.
- Ben Dor, E.**; Taylor R.; Hill J; Demattê J.;Whiting M.; Chabrillat,S.; Sommer S. (2008) Imaging Spectrometry for Soil Applications. *Advances in Agronomy*, Volume 97. pp 321-392. doi: 10.1016/S0065-2113(07)00008-9.
- Ben-Dor E.**; Chabrillat, S; Demattê J.; Taylor R.; Hill J.; Whiting M.; Sommer S.(2009). Using Imaging Spectroscopy to study soil properties. *Remote Sensing of Environment*, 113, 538–555.
- Ben Dor E.**, Ong C, Lau I. (2013) Reflectance Measurement of Soils in the Laboratory: Standards and Protocols. The Remote Sensing Laboratory, Department of Geography and Human Environment, *Tel Aviv University*, Israel.18p.

- Ben Dor E.**, Ong C., Lau I. (2015) Reflectance measurements of soils in the laboratory: Standards and Protocols. *Geoderma* 245–246 (2015) 112–124.
- Brady N.**; Weil, R., (1996). The Nature and Properties of Soils. 11th ed. *Prentice Hall*. NJ, USA. 678 pp.
- Bricklemeyer R.**, Lawrence R., Miller P., Battogtokh N. (2006) Predicting tillage practices and agricultural soil disturbance in north central Montana with Landsat imagery . *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114: 210–216 . www.sciencedirect.com.
- Bricklemeyer R.**, Brown D. (2010). On-the-go VisNIR: Potential and limitations for mapping soil clay and organic carbón. *Computers and Electronics in Agriculture*.70 (1) 209-216.
- Brodský, L.**, Klement, A., Penížek, V., Kodešová, R., Borůvka, L. (2011). Building soil Spectral library of the Czech soils for quantitative digital soil mapping. *Soil and Water Research*. 6, 165–172.
- Brown D.**, Shepherd K., Walsh M., Mays D., Reinsch T. (2006). Global soil characterization with VNIR diffuses reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132. 273–290. doi:10.1016/j.geoderma.2005.04.025.
- Casa, R.**, Pignatti, S., Pascucci, S., Ionca, V., Mzid, N., and Veretelnikova, I. (2020). Assessment of PRISMA imaging spectrometer data for the estimation of topsoil properties of agronomic interest at the field scale, *EGU General Assembly 2020*, Online, EGU2020-6728, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-672>.
- Castaldi F.**, Palombo A., Pascucci S., Pignatti S., Santini S., Casa R. (2015) Reducing the Influence of Soil Moisture on the Estimation of Clay from Hyperspectral Data: A Case Study Using Simulated PRISMA Data. *Remote Sensing*. 2015, 7, 15561-15582; doi: 10.3390/rs71115561.
- Castaldi F.**, Palombo A., Santini F., Pascucci S., Pignatti S., Casa R. (2016). Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbón. *Remote Sensing of Environment* 179, 54–65.
- Castaldi F.**; Chabrillat S.; Jones A.; Vreys K., Bomans B., van Wesemae B. (2018a). Soil Organic Carbon Estimation in Croplands by Hyperspectral Remote APEX Data Using the LUCAS Topsoil Database. *Remote Sensing*, 10, 153; doi: 10.3390/rs10020153.
- Castaldi F.**; Chabrillat S.; Chartin C.; Genot V.; Jones A ; van Wesemael B. (2018b). Estimation of soil organic carbon in arable soil in Belgium and Luxembourg with the LUCAS topsoil database. *European Journal of Soil Science*. doi: 10.1111/ejss.12553.
- Castaldi F.**; Chabrillat S., van Wesemae B. (2019). Sampling Strategies for Soil Property Mapping Using Multispectral Sentinel-2 and Hyperspectral EnMAP Satellite Data. *Remote Sensing*, 11, 309; doi: 10.3390/rs11030309
- Cierniewski J.**, Kusnierek K. (2010). Influence of Several Soil Properties on Soil Surface Reflectance. *Quaestiones Geographicae* 29/1, pp13-25.
- Clark R.**, Roush T. (1984) Reflectance Spectroscopy' Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 89, No. B7, pp 6329-6340.
- Clark, R. N.** (1999) Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, Chapter 1 in Manual of Remote Sensing, Volume 3, *Remote Sensing for the Earth Sciences*, (A.N. Rencz, Ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58. <http://speclab.cr.usgs.gov>.

- Coleman, T.;** Agbu, P.; Montgomery, O.; Gao, T; Prasad, S. (1991).Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. *Soil Science*. Vol: 151(5):355.
- Crist E.,** Cicone R. (1984a) Comparisons of the dimensionality and features of simulated Landsat 4-MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment* 14:235-246.
- Crist E,** Cicone R. (1984b) Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering Remote and Sensing*.Vol. 50, No. 3, pp. 343-352-
- Crist E.,** Kauth R. (1986) The Tasseled Cap De-Mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.Vol. 52, No1, pp 81-86.
- Crow W.,** Berg A., Cosh M., Loew A., Mohanty B., Panciera R., Rosnay P., Ryu D., Walker J. (2012). Upscaling Sparse Ground-Based Soil Moisture Observations for the Validation of Coarse-Resolution Satellite Soil Moisture Products. *American Geophysical Union*. Reviews of Geophysics, 50, RG2002 / 2012 pp1 – 20
- Cundill S.,** van der Werff H., van der Meijde M. (2015) Adjusting Spectral Indices for Spectral Response Function Differences of Very High Spatial Resolution Sensors Simulated from Field Spectra. *Sensors* 2015, 15, 6221-6240; doi: 10.3390/s150306221.
- Curran P.** (1999) Remote Sensing of Foliar Chemistry. *Remote Sensing of Environment* 30:271-278.
- Czapla-Myers J,** McCorkel J., Anderson N, Thome K., Biggar S, Helder D, Aaron D, Leigh L., Mishra N. (2015) The Ground-Based Absolute Radiometric Calibration of Landsat 8 OLI. *Remote Sensing*. 2015, 7, 600-626; doi: 10.3390/rs70100600.
- Chabrilat, S,** Ben-Dor, E, Viscarra Rossel R., Demattê, J (2013). Quantitative Soil Spectroscopy. *Applied and Environmental Soil Science*, vol 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/616578>.
- Chabrilat, S.;** Ben-Dor, E.; Cierniewski, J.; Gómez, C.; Schmid, T.; VanWesemael, B. (2019). Imaging spectroscopy for soil mapping and monitoring. *Surveys.in Geophysics*, 40, 361–399.
- Chander G.,** Mishra N, Helder D, Aaron D,Angal A, Choi T, Xiong X, Doelling D. (2013) Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for Cross-Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, VOL. 51, NO. 3, pp1267-1281.
- Chavda, Ch.;**(2005). Simulated vs. Actual Landsat Reflectance Spectra of Bare Soils. *Thesis Master of Science* Faculty of Mississippi State University. Department of Agricultural and Biological Engineering. 248p.
- Daughtry C.** Bauer M., Crececius D., Hixson M. (1980) Effects of Management Practices on Reflectance of Spring Wheat Canopies.*Agronomy Journal*, VOL. 72 pp1055-1060.
- Daughtry, C.;** Vanderbilt V.; Pollara, V. (1982). Variability of Reflectance Measurements with Sensor Altitude and Canopy Type. *Agronomy Journal*. 74:744-751.
- Daughtry C.** (2001). Discriminating Crop Residues from Soil by Shortwave Infrared Reflectance. *Agronomy Journal* 93:125-131.
- Daughtry, C.,** Hunt Jr. E., McMurtrey III J. (2004). Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment* 90: 126–134. doi:10.1016/j.rse.2003.10.023.

- Daughtry C.**, Hunt Jr.E. Doraiswamy P., McMurtrey J. (2005). Remote Sensing the Spatial Distribution of Crop Residues. *Agronomy Journal*. 97:864–871. doi:10.2134/agronj2003.0291.
- Daughtry C.**, Serbin G., Reeves J., Doraiswamy P., Hunt Jr.E. (2010). Spectral Reflectance of Wheat Residue during Decomposition and Remotely Sensed Estimates of Residue Cover. *Remote Sensing*. 2010, 2, 416-431; doi: 10.3390/rs2020416.
- Diek S.**, Fornallaz F, Schaepman M, de Jong R. (2017). Barest Pixel Composite for Agricultural Areas Using Landsat Time Series. *Remote Sensing*, 9, 1245; doi: 10.3390/rs9121245 .
- Demattê, J;**Fiorio P., Ben-Dor E. (2009a). Estimation of Soil Properties by Orbital and Laboratory Reflectance Means and its Relation with Soil Classification.*The Open Remote Sensing Journal*, 2, 12-23.
- Demattê, J;** Huete A., Guimaraes Ferreira L., Nanni M., Cardoso Alves M., Fiorio P., (2009b). Methodology for Bare Soil Detection and Discrimination by Landsat TM Image. *The Open Remote Sensing Journal*, 2, 24-35.
- Demattê, J;** Barbosa Guimaraes C, Fongaro C., Felipe Vidoy E., Sayão V., Carnieletto Dotto A., Valadares dos Santos N. (2017). Satellite Spectral Data on the Quantification of Soil Particle Size from Different Geographic Regions. *Revista Brasileira de Ciencia.do Solo*; 42. doi.org/10.1590/18069657rbcs20170392.
- Demattê J.** , Fongaro C., Rizzo R., Safanelli J. (2018). Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. *Remote Sensing of Environment* 212, 161–175.
- Demattê, J;** Dotto A.; Paiva A.; Sato M.; Dalmolin R.; Araujo; Silva E., Nanni M.; ten Cater A.; Noronha N.; Lacerda M.; Coelho de Araujo Filho J.; Rizzoj R.; Bellinaso H.; Francelino M.; Schaefer C.; Vicente L.; Santos U.; de Sa Barretto Sampaio E.; Menezes R.; de Souza J.;Abraham W.; Coelho R.; Grego C.; Lani J.; Fernandes A.; Goncalves D.; Silva S.; de Menezes M.; Curi N.; Couto E.; dos Anjost L.; Ceddiat M.; Pinheiro E.; Grunwald S.; Vasques G.; Marques Junior J.; da Silva A.; de Vasconcelos Barreto M.; Nobrega G.; da Silva M.; de Souza S.; Valladares G.; Viana J.; da Silva Terra F., Horak-Terra I.; Fiorio P.; da Silva R., Frade Junior E.; Lima R.; Filippini Alba J.; de Souza Junior V.; Mendonca Santos Brefi M.; Ruivo M.Ferreira T.; Brait M.; Caetano N.; Bringhentil.; de Sousa Mendes W.; Safanelli J.; Barbosa Guimaraes C.; Poppiel R.; Barros e Souza A.; Quesada C.; Zarate do Couto H. (2019). The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma* 354. doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043.
- Dotto C.**, Dalmolin D, ten Caten A., Grunwald S. (2018). A systematic study on the application of scatter-corrective and Spectral derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. *Geoderma* 314, 262–274. /doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.006.
- Dotto C,** Demattê, J; Viscarra Rossel R, Rizzo R (2019). Soil classification based on spectral and environmental variables. *European Geosciences Union- EGU-* https://doi.org/10.5194/soil-2019-77.
- Dvorakova K.**, Shi P., Limbourg Q, van Wesemael B. (2020). Soil Organic Carbon Mapping from Remote Sensing: The Effect of Crop Residues. *Remote Sensing*, 12, 1913; doi:10.3390/rs12121913
- Elbein A.**, Pan Y., Pastuszak I, Carroll D. (2003). New insights on trehalose: a multifunctional molecule. *Glycobiology* vol. 13 no. 4 pp. 17R±27R, doi: 10.1093/glycob/cwg047.

- Elvidge C.** (1990). Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, vol. ii, no. 10, 1775-1795.
- England J., Viscarra Rossel R.** (2018). Proximal sensing for soil carbon accounting. *European Geosciences Union- EGU- SOIL*, 4, 101–122. <https://doi.org/10.5194/soil-4-101-2018>.
- Escribano P., Schmid T., Chabrillat S., Rodríguez Caballero E. García M.**(2017). Optical Remote Sensing for Soil Mapping and Monitoring. *Soil Mapping and Process Modeling for Sustainable Land Use Management*. Chapter 4. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-805200-6.00004-9>
- Figueroa-Soto C., Iturriaga G., Valenzuela-Soto E.** (2004). Actividad de Trehalosa 6-fosfato sintasa en plantas de *Selaginella lepidophylla* en respuesta a hidratación y desecación. *Revista. Fitotecnia. Mexicana*. Vol. 27 (1): 17–22.
- Fongaro C., Demattê, J; Rizzo R, Safanelli J., de Sousa Mendes W.; Dotto C., Vicente L; Franceschini M., Ustin S.** (2018). Improvement of Clay and Sand Quantification Based on a Novel Approach with a Focus on Multispectral Satellite Images. *Remote Sensing*. 2018, 10, 1555; doi: 10.3390/rs10101555.
- Gallo B., Demattê, J; Rizzo R, Safanelli J, de Sousa Mendes W, Lepsch I., Sato M., Romero D., Lacerda M.** (2018). Multi-Temporal Satellite Images on Topsoil Attribute Quantification and the Relationship with Soil Classes and Geology. *Remote Sensing*, 10, 1571; doi:10.3390/rs10101571..
- Gatti A., Galoppo A.** (2018). Copernicus Sentinel-2. *Products Specification Document*. ESA. Ref: S2-PDGS-TAS-DI-PSD. Issue: 14.5. Page: 2 / 510.
- Ge Y., Morgan C., Ackerson J.** (2014). VisNIR spectra of dried ground soils predict properties of soils scanned moist and intact. *Geoderma* 221-222 -61-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.011>
- Gerighausen H.;Menz, G.; Kaufmann, H.** (2012). Spatially Explicit Estimation of Clay and Organic Carbon Content in Agricultural Soils Using Multi-Annual Imaging Spectroscopy Data. *Applied and Environmental Soil Science*. Volume 2012, Article ID 868090, 23 pages. doi:10.1155/2012/868090.
- Gholizadeh A., Boruvka L., Saberioon M., Vasat R.** (2013). Visible, Near-Infrared, and Mid-Infrared Spectroscopy Applications for Soil Assessment with Emphasis on Soil Organic Matter Content and Quality: State-of-the-Art and Key Issues. *Applied Spectroscopy* OA.1349-1361. doi:10.1366/13-07288.
- Gholizadeh A., Žižala D., Saberioon M, Borůvka L.**(2018). Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 218. Pages 89-103 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>.
- Gitelson A., Stark R., Grits U., Rundquist D., Kaufman Y., Derry D.** (2002). Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*. vol. 23, no. 13, 2537–2562.
- Giuffrida S., Cottone G., Cordone L.** (2017) Water Association Band as a marker for Hydrogen Bond in trehalose amorphous matrices. *Physical Chemistry Chemical Physics*. doi: 10.1039/C6CP06848K.
- Giuliani G, Camara G.Killough B.; Minchin S.** (2020). Earth Observation Data Cubes. *Special Issue, online, open access journal*. Data (ISSN 2306-5729) disponible en <https://www.mdpi.com/journal/data/special/issues/EODC>.

- Gomez C**, Lagacherie P, Bacha S. (2012). Using Vis–NIR hyperspectral data to map topsoil properties over bare soils in the Cap Bon region, Tunisia. In: Digital soil assessments and beyond. *Proceedings of the fifth global workshop on digital soil mapping*, pp 387–392.
- Gomez C.**, Viscarra Rossel R., McBratney A. (2018). Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma* 146, 403–411. doi:10.1016/j.geoderma.2008.06.01.
- Guanter, L**; Kaufmann, H; Segl, K; Foerster, S; Rogass, C; Chabrillat, S; Kuester, T; Hollstein, A; Rossner; Chlebek, C; Straif, C; Fischer, S; Schrader, S; Storch, T; Heiden, U; Mueller, A; Bachmann, M; Mühle; Müller, R.; Habermeyer, M.; Ohndorf, A; Hill, J; Buddenbaum, H; Hostert, P; Van der Linden, S; Leitão, P.J; Rabe, A; Doerffer, R; Krasemann, H; Xi, H; Mauser, W; Hank, T; Locherer, M; Rast, M; Staenz, K.; Sang, B (2015). The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. *Remote Sensing* 7, 8830-8857.
- Hbirkou, C.** (2011) Heterogeneity of soil properties at the field-scale and spatial patterns of soil-borne pests and weeds. *Thesis Dr Agr.* Institute of Crop Science and Resource Conservation–Soil Science. Universität Bonn.
- Hively, W.**;McCarty, G.; Reeves III, J.; Lang, M.; Oesterling, R.; Delwiche, S. (2011).Use of Airborne Hyperspectral Imagery to Map Soil Properties in Tilled Agricultural Fields. *Applied and Environmental Soil Science*. Volume 2011, Article ID 358193, 13 pages. doi:10.1155/2011/358193.
- Hudson, N.** (1982). Conservación del suelo. Erosión. Esgurrimiento. Degradación. Ed. Reverté S.A. Barcelona Bs.As. 295
- Huete A.**, Post D., Jackson R. (1984) Soil Spectral Effects on 4-Space Vegetation Discrimination. *Remote Sensing of Environment* 15:155-165
- Isikgor F**, Becer R (2015). Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, 6, 4497 doi: 10.1039/c5py00263j.
- Jackson R**, Pinter Jr P, Reginato R., Idso S (1980). Hand-Held Radiometry. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration. *Agricultural Reviews and Manuals ARM-W-19*.
- Jaín R.**, Hoffman A., Jepsen P., Liu P.,Turchinovich D, Vitiello M. (2020). Mid-infrared, long-wave infrared, and terahertz photonics: introduction *Optics Express* Vol. 28, 9 - <https://doi.org/10.1364/OE.395165>
- Jasinski, M**; Eagleson, P. (1989). The structure of red-infrared scattergrams of semivegetated landscapes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol 27, 4. pp. 441-451.
- Ji W.**, Li S. , Chen S., Shi Z., Viscarra Rossel R., Mouazen A. (2016). Prediction of soil attributes using the Chinese soil spectral library and standardized spectra recorded at field conditions. *Soil Tillage Research*. 155. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.004>.
- Kauth, R.**, Thomas, G. (1976). The Tasselled Cap-A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT" (1976). *LARS Symposia*. Paper 159. http://docs.lib.purdue.edu/lars_symp/159.
- Knadel, M.**; Deng, F.; Thomsen, A.; Greve, M., (2012). Development of a Danish national Vis–NIR soil spectral library for soil organic carbon determination. In: Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B. (Eds.), *Digital Soil Assessments and Beyond: Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping*. Sydney, Australia, pp. 403–408.

- Kokaly R.**, Clark R. (1999). Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Remote Sensing of Environment*. 67:267–287.
- Lafren, J.**, Amemiya M., Hintz E. (1981). Measuring crop residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation* 36:341–343.
- Lau I.**, Le Gras M.; Laukamp C.; Mason P; Warren P. (2017). CSIRO Shortwave infrared spectral library. *Evaluation and status report 2017 CSIRO*. Report EP175249, 23p.
- Lehnert L.**, Meyer H., Obermeier W., Silva B., Regeling B., Thies B., Bendix J. (2019). Hyperspectral Data Analysis in R: The hsdar Package. *Journal of Statistical Software* 89 (12.). doi: 10.18637/jss.v089.i12
- Lillesand, T;** Kiefer, R.; Chipman, J. (2004). Remote Sensing and Image Interpretation. 5th ed. *John Wiley New York*. 763 pp.
- Liu Z,** Cao Y, Huang Z., Ren H, Amidon T., Lai Y. (2015). The utilization of soybean straw. I. Fiber morphology and chemical characteristics. *Bio Resources* 10 (2), 2266-2280.
- Lobell, D.**, Asner, G. (2002). Moisture Effects on Soil Reflectance. *Soil Science Society of America Journal*. 66, pp 722-727.
- Lu P;** Wang L; Niu Z; Li L; Zhang W. (2013). Prediction of soil properties using laboratory VIS–NIR spectroscopy and Hyperion imagery. *Journal of Geochemical Exploration* 132, 26–33.
- McBratney, A;** Mendonça Santos, M; Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma* 117, p 3– 52.
- Mc Craig M.**, Osinski G., Cloutis E., Flemming R., Izawa M., Reddy V., Fieber-Beyer S., Pompilio L., van der Meer F, Berger J., Bramble M., Applin D. (2017). Fitting the curve in Excel®: Systematic curve fitting of laboratory and remotely sensed planetary spectra. *Computers & Geosciences*. Volume 100 - Pages 103-114. doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.018
- Meygret A,** Baillarin S, Gascon F, Hillairet E., Dechoz C., Lacherade S., Martimort P, Spoto F., Henry P, Duca R (2015). SENTINEL-2 Image Quality and Level 1 Processing Aimé Earth Observing Systems XIV, edited by James J. Butler, Xiaoxiong Xiong, Xingfa Gu. *Proceedings of SPIE*. Vol. 7452, 74520D-1. doi: 10.1117/12.826184.
- Mishra N,** Haque M., Leigh L, Aaron D, Helder D, Markham B. (2014). Radiometric Cross Calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). *Remote Sensing*, 6, 12619-12638; doi: 10.3390/rs61212619.
- Morrison J,** Huang C., Lightle D., Daughtry C. (1993) Residue measurement techniques. *Journal of Soil and Water Conservation* 48(6): 478-4.
- Mueller-Wilm U.** (2019). Sen2Cor Configuration and User Manual. *ESA, Reference: S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.8*. Issue: 2. Pages 1-59.
- Mulder, V,** de Bruin S, Schaepman M., Mayr T. (2011). The use of remote sensing in soil and terrain mapping. A review. *Geoderma* 16: 1–19. doi:10.1016/j.geoderma.2010.12.018.
- Mulders M.**, (1987). Remote Sensing in Soil Science. *Developments in Soil Science 15* Department of Soil Science and Geology, Agricultural University of Wageningen, P.O. Box 37, Wageningen, The Netherlands. 379 pp.
- Murai S,** Forster B, Ryerson B. (1993). *Remote Sensing Note*. Japan Association on Remote Sensing Ed. 284pp

- Nagler P.**, Daughtry C., Goward S. (2000). Plant Litter and Soil Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 71: 207–215.
- Najafi P.**, Navid H., Feizizadeh B., Eskandari I. (2018). Remote sensing for crop residue cover recognition: A review. *Agricultural Engineering International CIGR Journal*. Vol. 20, No. 1. Disponible en <http://www.cigrjournal.org> .
- Nanni, M.;** Demattê, J. (2001). Quantification and discrimination of Soils Developed from Basalt as Evaluated by Terrestrial, Airborne and Orbital Sensors. *Anais X do Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto* Foz do Iguaçu, INPE, p 1441-1449.
- Nanni, M.;** Demattê, J. (2006). Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 70-2. P393-407.
- Nocita M.**, Stevens A., Noon C., van Wesemae B. (2013). Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma* 199. 37-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.020>.
- Nocita M**, Stevens A., van Wesemael B, Aitkenhead M, Bachmann M, Barth_es B., Ben Dor E., Brown D., Clairrotte M., Csorba A., Dardenne P., Demattê J., Genot V, Guerrero C, Knadel M, Montanarella L, Noon C, Ramirez-Lopez L., Robertson J., Sakai H., Soriano-Disla J., Shepherd K., Stenberg B. Towett E., Vargas R., Wetter J. (2015). Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. *Advance in Agronomy*, Volume 132. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2015.02.002>.
- Padró J.**, Muñoz F, Ávila L, Pesquer L Pons X. (2018). Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry *Remote Sensing*, 10 (11), 1687. <https://doi.org/10.3390/rs10111687>.
- Piscitelli, M.**, Sfeir, A; (2004). Fisiografía detallada del Partido de Azul, para el desarrollo de un planteo conservacionista de manejo de suelos. (Buenos Aires, Argentina). *Segundo Congreso de la Ciencia Cartográfica y IX Semana Nacional de Cartografía*. Pp 147-159. Disponible online.
- Piscitelli, M.**, (2009). Aplicación de teledetección cuantitativa en el análisis de factores condicionantes del proceso de erosión hídrica en el sur del partido de Azul. Tesis de Maestría- UNCPBA. 110p
- Richter R.**, Louis J., Berthelot B. (2011). Sentinel-2 MSI–Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document.S2PAD-ATBD-0001 *Sentinel-2 MSI Issue 1.8*. 79pp. Disponible: https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=349490&name=DLFE4518.pdf.
- Rinnan A.**, van den Berg F., Engelsen S. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 28, No. 10, 1201-1222.
- Rogge D.**, Bauer A., Zeidler J., Mueller A., Esch T., Heiden U. (2018). Building an exposed soil composite processor (SCMaP) for mapping spatial and temporal characteristics of soils with Landsat imagery (1984–2014). *Remote Sensing of Environment* 205, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.004>.
- Schaepman M** (1998). Calibration of a Field Spectroradiometer. *PHD Thesis*. Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät–Universität Zürich. <https://www.geo.uzh.ch>
- Schmid T**, Rodríguez-Rastrero M, Escribano P, Palacios-Orueta A, Ben-Dor E, Plaza A, Milewski R, Huesca M, Bracken A, Cicuéndez V, Pelayo M, Chabrillat S (2016). Characterization of soil erosion indicators using hyperspectral data from a Mediterranean rainfed cultivated region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 9 (2):845–860.

- Schwanninger M**, Rodrigues J., Fackler K. (2011). A review of bands assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. Special issue on wood and wood products.19- 287-308.
- Selige, T.;**Böhner, J.;Schmidhalter, U. (2006).High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures.*Geoderma* 136.p 235–244.
- Serbin, G.;** Daughtry C.; Hunt, Jr. E.; Brown D.; McCarty G.;(2009a). Effect of Soil Spectral Properties on Remote Sensing of Crop Residue Cover. *Soil Science Society of America Journal*, vol 73, 5, pp 1545-1558.doi:10.2136/sssaj2008.0311.
- Serbin, G.;** Daughtry C.; Hunt Jr. E, Reeves III , Brown D, (2009 b) Effects of soil composition and mineralogy on remote sensing of crop residue cover. *Remote Sensing of Environment* 113: 224–238.doi:10.1016/j.rse.2008.09.004.
- Sfeir, A.;** Varni, M.; Piscitelli, M.; Crespo, R.; Ares, G., Studdert, G.(2005).Cuantificación de los procesos de infiltración/ escurrimiento y pérdida de suelo por medio de simuladores de lluvia. *Congreso Nacional del Agua*. Mendoza. Argentina. Disponible *on line*
- Shi, Z.;** Wang, Q; Peng, J; Ji, W.; Liu, H.; Li, X.; Viscarra Rossel, R.(2014). Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations. *Science China Earth Sciences*. 57, 1671–1680. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4808-x>.
- Soriano-Disla J**, Janik L, Viscarra Rossel R., MacDonald L, McLaughlin M. (2014). The Performance of Visible, Near, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49:2, 139-186, doi: 10.1080/05704928.2013.811081.
- Steinberg, A.;** Chabrillat, S.; Stevens, A.; Segl, K.; Foerster, S. (2016). Prediction of Common Surface Soil Properties Based on Vis-NIR Airborne and Simulated EnMAP Imaging Spectroscopy Data: Prediction Accuracy and Influence of Spatial Resolution. *Remote Sensing*, 8, 613.
- Stenberg, B.;** Viscarra Rossel, R.; Mounem Mouazen, A.; Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, Vol. 107. doi: 10.1016/S0065-2113(10)07005-7.
- Stevens A.**, Ramirez–Lopez L. (2014). An introduction to the prospectr package. <https://cran.r-project.org/web/packages/prospectr/vignettes/prospectr.html>.
- Stoner E.;** Baumgartner M.; Biehl L; Robinson, B. (1980). Atlas of Soil Reflectance Properties. *Research Bulletin 962.Agricultural Experiment Station, PurdueUniversity*. West Lafayette, Indiana. USA. 75p.
- Suhet V.** (2015). Sentinel-2 User handbook. *ESA Standard Document. Issue 1 Rev 2*. Page 1-64.
- Szabados L.**, Kovács H., Zilberstein A., Bouchereau A. (2011). Plants in Extreme Environments: Importance of Protective Compounds in Stress Tolerance. *Advances in Botanical Research*, Vol. 57,105-150p. doi: 10.1016/B978-0-12-387692-8.00004-7.
- Teillet P**, Fedosejevs G., Thome K. (2004). Spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between multiple satellite sensors in the Landsat solar-reflective spectral domain. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII. Proceedings of SPIE* Vol. 5570. doi: 10.1117/12.562709.
- Teillet P**, Fedosejevs G., Thome K, Barker J. (2007). Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. *Remote Sensing of Environment* 110, 393–409. doi:10.1016/j.rse.2007.03.003.

- Toth G.**, Jones A., Montanarella L. (2013). The LUCAS topsoil database and derived information on the regional variability of cropland topsoil properties in the European Union. *Environmental Monitoring and Assessment* 185:7409–7425 doi 10.1007/s10661-013-3109-3.
- Transon J**, d’Andrimont R., Maignard A., Defourny P. (2018). Survey of Hyperspectral Earth Observation Applications from Space in the Sentinel-2 Context. *Remote Sensing*, 10, 157; doi: 10.3390/rs10020157-
- Unger P.** (1994). Managing Agricultural Residues. CRC Pres.Inc USA.433pp.
- Waiser T**, Brown D., Hallmark C. (2007). In Situ Characterization of Soil Clay Content with Visible Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:389–396. doi:10.2136/sssaj2006.0211.
- Vaughn I.** (2019). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. *LSDS-1574 Version 5.0*. USGS.
- Verma P.**, Kundu A., Matthew .Poretz S., Dhoonmoon Ch., Chegwidan O., Londergan C., Cho M. (2017). The Bend+Libration Combination Band Is an Intrinsic, Collective, and Strongly Solute-Dependent Reporter on the Hydrogen Bonding Network of Liquid Water. *Journal of Physical Chemistry*, 122, 2587–2599. doi: 10.1021/acs.jpcc.7b09641.
- Vermote E.**, Saleous N., Justice C. Kaufman Y, Privette J, Remer L , Roger J., Tanré D. (1997). Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, 14, pages 17.131-17.141.
- Vermote E.**, Justice C., Claverie M., Franch B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>.
- Viscarra Rossel R.**, McBratney A. (2008). Diffuse Reflectance Spectroscopy as a Tool for Digital Soil Mapping. *Digital Soil Mapping with Limited Data*, Chapter 13. doi:10.1007/978-1-4020-8592-5_13.
- Viscarra Rossel, R.**; Cattle, S.; Ortega, A.; Fouad, Y. (2009) In situ measurements of soil colour, mineral composition, and clay content by vis–NIR spectroscopy. *Geoderma* 150 .p253–266.
- Viscarra Rossel, R.**; Adamchuk V., Sudduth K., McKenzie N., Lobsey C. (2011). Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. *Advances in Agronomy*, Volume 113, Chapter 5. doi: 10.1016/B978-0-12-386473-4.00005-1.
- Viscarra Rossel, R.**, Webster, R. (2012). Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database. *European Journal of Soil Science* 63, 848–860. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01495.x>.
- Viscarra Rossel, R.**; Bouma J. (2016). Soil sensing: A new paradigm for agriculture. *Agricultural Systems*, Volume 148, Pp 71 74 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001>.
- Viscarra Rossel, R.**, Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D., Demattê, J., Shepherd, K., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V., Aichi, H., Barthès, B., Bartholomeus, H., Bayer, A., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C., Chappell, A., Fouad, Y., Genot, V., Gomez, C., Grunwald, S., Gubler, A., Guerrero, C., Hedley, C., Knadel, M., Morrás, H., Nocita, M., Ramirez-Lopez, L., Roudier, P., Campos, E., Sanborn, P., Sellitto, V., Sudduth, K., Rawlins, B., Walter C., Winowiecki L., Hong S., Ji W.,(2016b). A global spectral library to characterize the

- world's soil. *Earth-Science Reviews*. 155, 198–230. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012>.
- Wang Ch.**, Pan X. (2016). Estimation of Clay and Soil Organic Carbon Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy and Unground Samples. *Soil Science Society of America Journal*. 80:1393–1402 doi:10.2136/sssaj2016.05.0136.
- Ward K.**, Chabrilat S, Brell M., Castaldi F, Spengler D, Foerster S. (2020). Mapping Soil Organic Carbon for Airborne and Simulated EnMAP Imagery Using the LUCAS Soil Database and a Local PLSR. *Remote Sensing*, 12, 3451; doi: 10.3390/rs12203451.
- Wold S**, Ruhe A, Wold H, Dunn W. (1984). The collinearity problem in linear regression, The partial least squares approach to generalized inverses. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 5. 735–743.
- Xu D.**, Guo X (2013). A Study of Soil Line Simulation from Landsat Images in Mixed Grassland. *Remote Sensing*, 5, 4533-4550; doi: 10.3390/rs5094533.
- Zhang M.**, Meng J., Dong T., Wu B., Sun H. (2012). Spectral responses analysis of soybean residues. *Journal of Remote Sensing* 16 (6), 115-1129.
- Zhang T.**, Li L., Zheng B. (2013). Estimation of agricultural soil properties with imaging and Laboratory spectroscopy. *Journal of Applied Remote Sensing* Vol. 7, Disponible en <http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/>. doi: 10.1117/1.JRS.7.073587.
- Zhang Q.**, Song X., Bartels D. (2016). Enzymes and Metabolites in Carbohydrate Metabolism of Desiccation Tolerant Plants. *Proteomes*, 4, 40; doi: 10.3390/proteomes4040040.
- Zheng B.**, Campbell J., Serbin, G., Daughtry C., (2013). Multitemporal remote sensing of crop residue cover and tillage practices: A validation of the minNDTI strategy in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*: 68 (2). doi:10.2489/jswc.68.2.1.

APÉNDICE A

Capítulo 2: Comportamiento espectral de diferentes superficies agrícolas

Leyenda de las tablas:

- PCT Porcentaje de cobertura total.
 RS % Porcentaje de rastrojo de soja con respecto al PCT
 RC % Porcentaje de rastrojo de cebada con respecto al PCT
 RM % Porcentaje de rastrojo de maíz con respecto al PCT
 MALEZAS % Porcentaje de malezas con respecto al PCT
 COB SUPERP Proporción en porcentaje de rastrojo superpuesto
 HR % Porcentaje de humedad del rastrojo
 HS % Porcentaje de humedad del suelo
 MO % Porcentaje de materia orgánica
 Arc % Porcentaje de arcilla
 Li % Porcentaje de limo
 ARE % Porcentaje de arena
 CULTIVO ESPONTÁNEO % Porcentaje de plantas verdes de maíz medido con respecto al PCT
 0

I. Firmas espectrales en el SWIR Todas las categorías de PCT, transectas S2014 y S2017

S2017 : PCT 87,5%

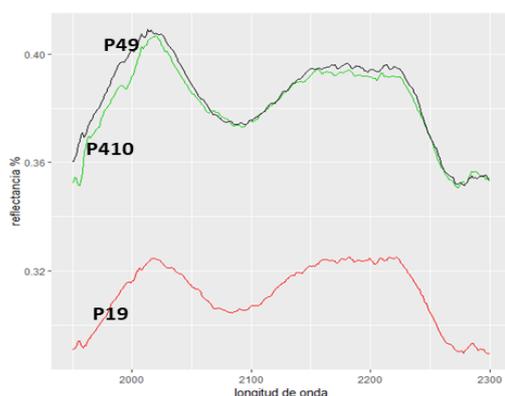
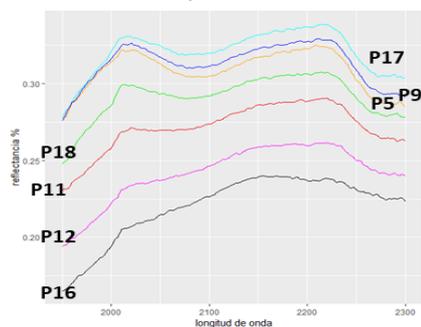


Figura I.1. Firmas espectrales representativas de PCT= 87,5 % en S2017 y > 80 % en S2014. Agrupadas según formas y profundidad de las concavidades similares. En los Cuadros I.1a y I.1b se describen los atributos de superficie medidos en cada transecta.

S2014 : PCT ≥ 80%



PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	SUPERP. COB.	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P19	87,5	87,5	-	-	4,98	27,16	4,32	33,66	41,38	24,96
P49	87,5	87,5	-	-	4,68	19,76	4,53	29,15	50,02	20,83
P410	87,5	87,5	-	-	7,52	19,68	4,22	26,07	44,28	29,64

CUADRO I.1.a Atributos medidos en S2017 en las observaciones con >80 %PCT

PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	SUP.CO.B. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %	PUNTO	PCT %
P17	90	30	60	10	-	-	6,0	25,9	6,8	25,63	42,01	38,29
P18	90	33,3	44,5	11,1	11,1	-	3,2	23,0	5,5	19,16	42,52	38,32
P5	80	25	50	25	-	-	6,2	24,3	7,0	24,03	36,77	39,20
P9	80	25	50	12,5*	-	*	8,0	24,0	6,2	18,78	44,96	36,26
P11	80	25	37,5	25**	12,5	12,5*	6,6	20,5	6,6	18,55	46,07	35,38
P12	80	25***	62,5		-	12,5***	5,9	21,5	6,3	17,22	47,16	35,62
P16	80	37,5	50	12,5	-	-	5,0	17,3	5,2	18,58	41,59	39,83

CUADRO I.I.b Atributos medidos en S2014 en las observaciones con >80

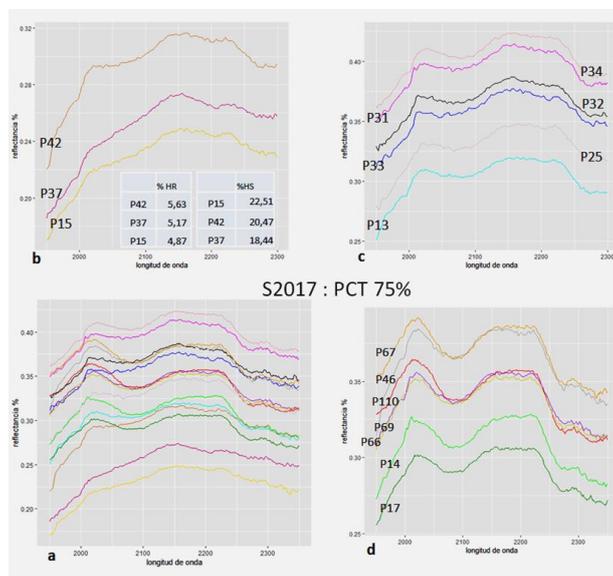


Figura I.2. Firmas espectrales representativas de PCT= 75 % en S2017 en subgráfico a. Agrupadas según formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos b, c y d. En el Cuadro I.2 se describen los atributos de superficie medidos en cada punto.

PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	SUPERP. COB. %	% HR	% HS	% MO	% arc	% Li	% ARE
P13	75	75	-	-	5,58	27,39	5,46	32,10	41,11	26,79
P14	75	75	-	-	5,19	23,61	4,77	32,76	39,41	27,82
P15	75	75	-	-	4,87	22,51	5,11	31,61	38,89	29,50
P17	75	75	-	-	5,09	21,89	5,39	32,18	36,45	31,38
P110	75	75	-	-	5,10	26,87	4,61	32,87	42,94	24,19
P25	75	75	-	-	5,93	22,78	4,25	29,25	41,74	29,01
P31	75	75	-	-	5,44	25,29	4,45	28,21	45,25	26,54
P32	75	75	-	-	5,49	20,02	4,44	29,05	44,63	26,32
P33	75	75	-	-	5,44	21,61	5,02	28,27	44,61	27,13
P34	75	75	-	-	5,41	22,07	4,91	29,93	43,51	26,56
P37	75	75	-	-	5,17	18,44	5,03	34,15	36,77	29,08
P42	75	75	-	-	5,6	20,5	4,59	30,00	48,37	21,63
P46	75	75	-	-	5,52	21,91	4,83	28,57	49,87	21,56
P66	75	75	-	-	5,12	24,72	4,58	25,02	42,36	32,62
P67	75	75	-	-	4,80	19,55	4,33	25,89	40,30	33,81
P69	75	75	-	-	4,40	17,23	4,40	24,17	41,71	34,11

*superposición con rastrojo de cebada, ** con rastrojo de soja, ***con rastrojo de maíz

CUADRO I.2. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 75 %PCT.

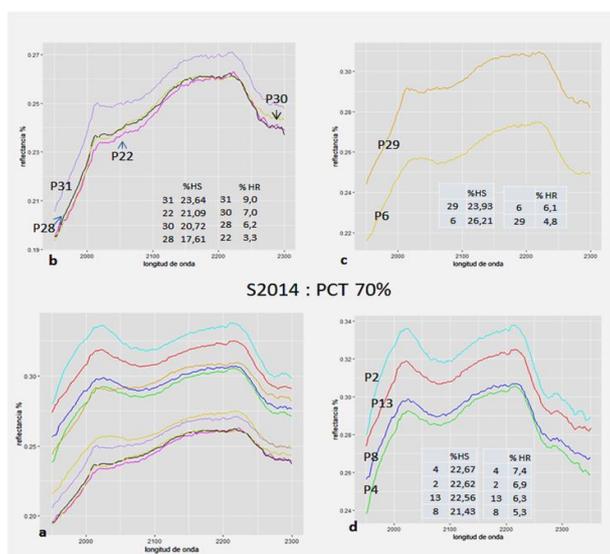


Figura I.3. Firmas espectrales representativas de PCT= 70 % en S2014 en subgráfico a, Agrupadas según similares formas, y profundidad de las concavidades en los subgráficos b, c y d. En el Cuadro I.3 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RS %	RC %	RM %	MALEZAS %	COB SU %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P2	70	86	-	-	14	-	6,9	22,62	6,8	25,63	41,79	32,58
P13	70	29	71	-	-	-	6,3	22,56	7,9	15,57	46,62	37,81
P8	70	14	72	14	-	-	5,3	21,43	6,7	18,85	47,39	33,76
P4	70	71	29	-	-	-	7,4	22,67	7,1	22,18	38,85	38,97
P22	70	14	43	43	-	-	3,3	21,09	7,4	22,38	46,03	31,58
P29	70	-	100*	-	-	* con 8%RS	4,8	23,93	6,3	31,64	31,10	37,26
P6	70	43	43	14	-	-	6,1	26,21	7,4	23,82	38,97	37,20
P31	70	29	14	-	57	-	9,0	23,64	6,6	32,15	30,35	37,51
P28	70	14,5	57	-	28,5	-	6,2	17,61	6,5	33,33	29,41	37,26
P30	70	72	-	14	14	-	7,0	20,72	7,0	33,45	29,39	37,16

CUADRO I.3. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 70 %PCT.

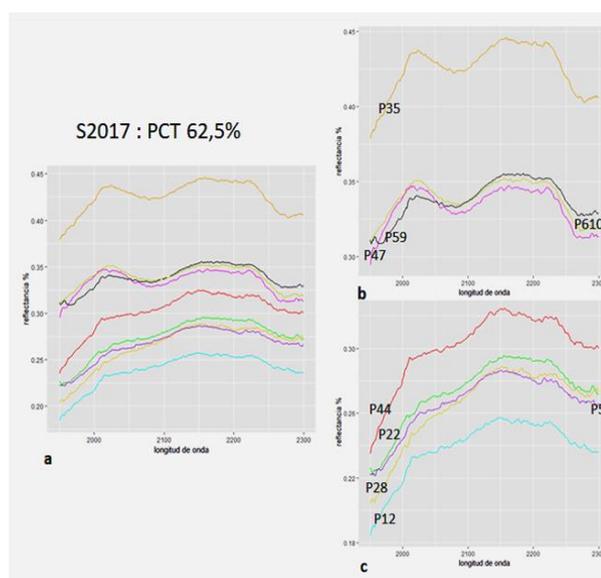


Figura I.4 Firmas espectrales representativas de PCT= 62,5 % en S2017 en subgráfico a. Agrupadas según similares formas, y profundidad de las concavidades en los subgráficos b y c. En el Cuadro I.4 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	COB.SUP. %	HR %	HS %	MO %	Arc %	Li %	ARE %
P12	62,5	62,5	-	-	4,96	19,94	4,7	32,80	40,74	26,46
P22	62,5	62,5	-	-	6,03	20,75	4,5	31,05	43,25	25,70
P28	62,5	62,5	-	-	6,13	27,62	4,2	29,67	40,46	29,87
P35	62,5	62,5	-	-	5,33	21,44	5,1	29,09	45,91	25,00
P44	62,5	62,5	-	-	5,32	23,65	4,7	27,95	50,55	21,51
P47	62,5	62,5	-	-	7,02	26,55	4,8	27,96	51,32	20,72
P59	62,5	62,5	-	-	5,26	20,24	4,4	25,70	44,23	30,07
P512	62,5	62,5	-	-	4,97	17,25	4,2	24,97	46,20	28,83
P610	62,5	62,5	-	-	4,88	18,57	4,5	24,41	42,13	33,46

CUADRO I.4. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 62,5%PCT.

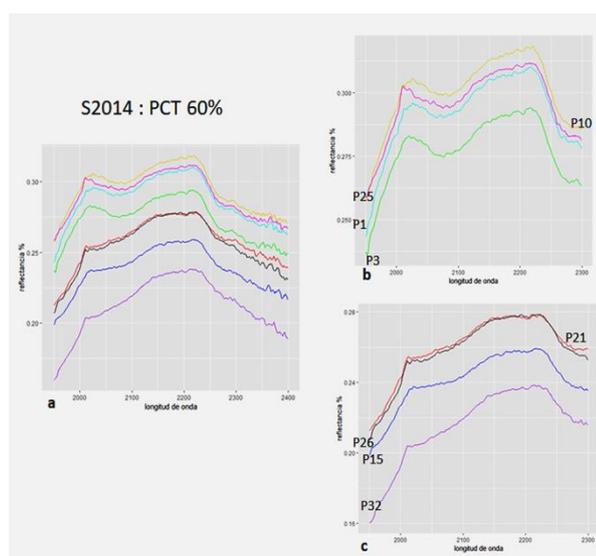


Figura I.5 Firmas espectrales representativas de PCT= 60 % en S2014 en subgráfico a, Agrupadas según similitudes de formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos b y c. En el Cuadro I.5 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RS %	RS %	RC %	RM %	MALEZAS %	COBSUP %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P1	60	100+	60	-	-	-	*17%*	7,2	25,0	6,6	27,12	41,49	31,39
P3	60	17	60	32*	34+	17*	**17%	7,1	26,05	7,08	24,37	42,68	32,94
P10	60	67	60	33	-	-	-	6,4	23,25	5,75	18,09	45,49	36,41
P15	60	-	60	50	50	-	**17% con RC	5,9	22,17	6,33	18,64	39,75	41,61
P21	60	83	60	17	-	-	-	5,1	21,69	6,59	21,06	41,42	37,52
P25	60	33	60	67	-	-	-	6,3	21,38	6,40	20,86	47,19	31,95
P26	60	33	60	50	-	17	-	7,7	19,90	6,71	23,86	42,93	33,20
P32	60	50	60	50	-	-	-	6,8	22,45	6,30	31,95	29,68	38,37

CUADRO I.5. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 60%PCT. * superposición de cobertura con rastrojo de maíz, ** con rastrojo de soja y *** con rastrojo de cebada.

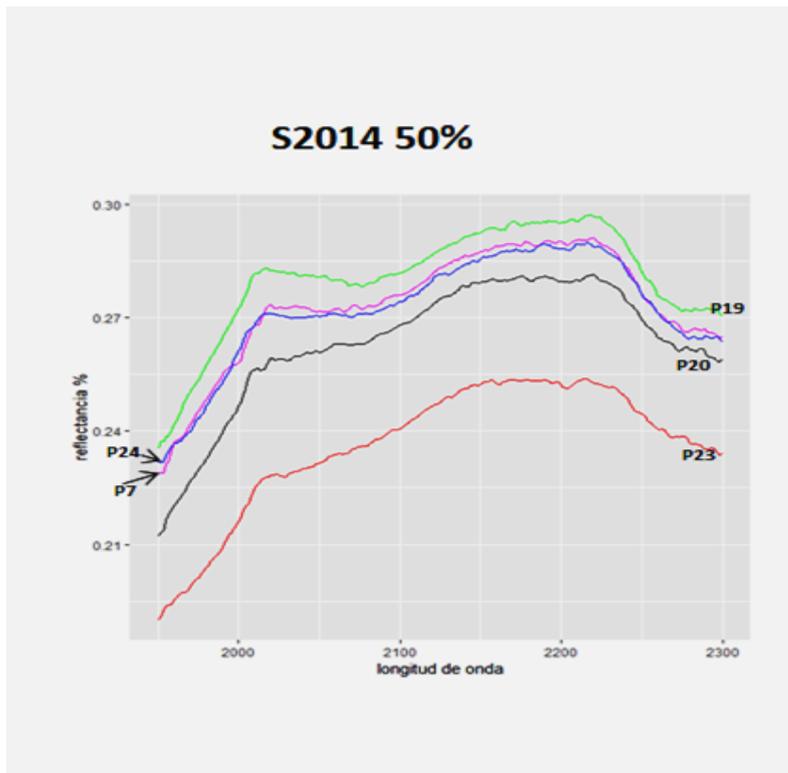


Figura I.6. Firmas espectrales representativas de PCT= 50 % en S2017 en subgráfico a Agrupadas según similares formas, y profundidad de las concavidades en los subgráficos b, c y d. En el Cuadro I.6 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	COB SUP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P11	50	50	-	-	5,20	19,97	5,07	34,33	39,19	26,49
P16	50	50	-	-	5,23	24,77	4,68	31,97	38,22	29,81
P29	50	50	-	-	6,60	18,82	4,39	28,23	35,59	36,18
P212	50	50	-	-	7,12	17,08	4,32	28,86	41,30	29,83
P39	50	50	-	-	5,05	22,39	4,58	27,53	43,63	28,84
P310	50	50	-	-	4,78	20,90	4,17	29,49	42,57	27,95
P41	50	50	-	-	5,21	16,14	3,89	29,88	47,49	22,64
P45	50	50	-	-	5,80	19,93	4,28	29,15	49,10	21,74
P411	50	50	-	-	5,04	24,19	5,11	26,60	47,32	26,08
P51	50	50	-	-	4,89	20,46	4,84	26,38	46,93	26,69
P52	50	50	-	-	5,32	21,36	4,19	26,27	48,52	25,22
P53	50	50	-	-	5,32	18,64	4,23	25,46	46,46	28,07
P54	50	50	-	-	5,04	19,22	4,56	25,99	47,43	26,58
P55	50	50	-	-	5,65	18,15	4,58	25,67	48,54	25,80
P58	50	50	-	-	6,14	17,38	4,57	25,67	46,50	27,83
P511	50	50	-	-	5,36	17,10	4,62	26,88	45,05	28,07
P65	50	50	-	-	4,89	17,98	4,66	25,37	40,38	34,26
P68	50	50	-	-	4,90	20,26	4,63	24,24	41,04	34,72
P612	50	50	-	-	4,86	18,81	4,37	26,57	42,68	30,75

CUADRO I.6. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 50 %PCT.

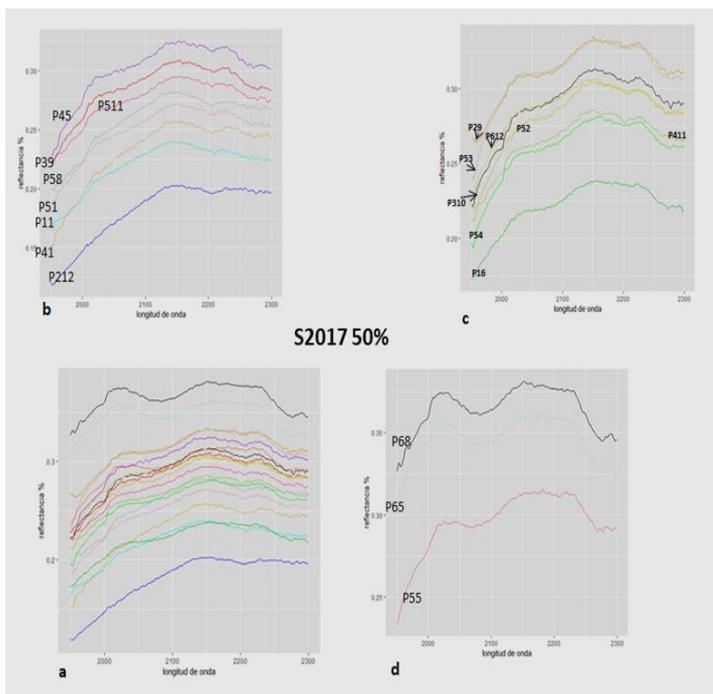


Figura I.7. Firmas espectrales representativas de PCT= 50 % en S2014. En el Cuadro I.7 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	RS %	RC %	RM %	MALEZAS %	COBSUP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P7	50	60	20	20	-	-	8.2	23.3	6.9	18.8	47,06	34,17
P19	50	20	60	20	-	-	6.2	21.9	6.7	18.8	41,99	39,25
P20	50	60	20	20	-	-	5.5	17.6	6.8	17.9	46,88	35,19
P24	50	20	80	-	-	-	7.3	24.2	6.6	21.1	46,43	32,47
P23	50	-	60	20	20	-	7.1	22.5	5.9	22.0	44,89	33,07

CUADRO I.7. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 50 %PCT.

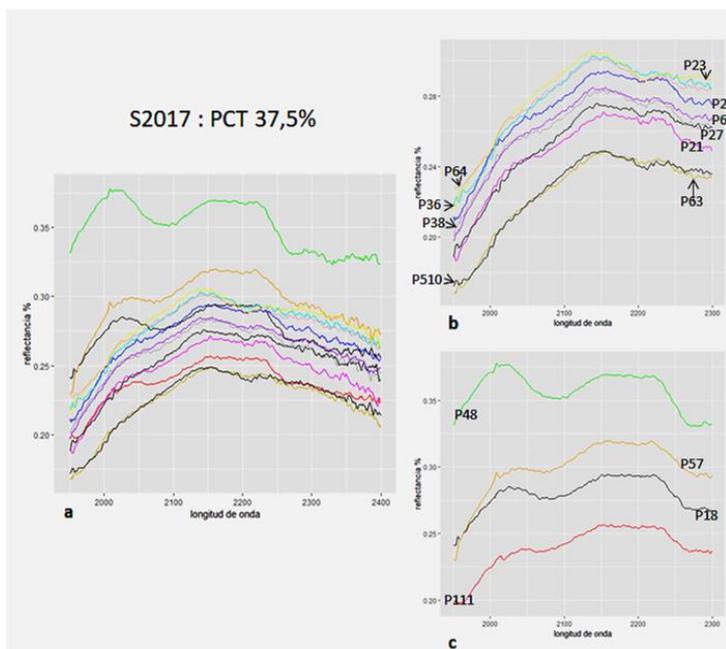


Figura I.8. Firmas espectrales representativas de PCT= 37,5 % y 25 % en S2017 en subgráfico a, Agrupadas según similares formas, y profundidad de las concavidades en los subgráficos b y c. En el Cuadro I.8 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	COB SUP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P18	37.5	37.5	-	-	5,12	29,59	4,93	27,98	37,50	34,52
P111	37.5	37.5	-	-	4,85	25,08	5,79	32,75	42,78	24,47
P21	37.5	37.5	-	-	6,78	18,10	3,89	32,37	41,69	25,95
P23	37.5	37.5	-	-	6,52	20,43	4,31	31,90	44,93	23,17
P26	37.5	37.5	-	-	7,73	18,20	4,35	28,23	43,60	28,16
P27	37.5	37.5	-	-	5,96	22,36	4,68	28,02	38,72	33,26
P36	25	37.5	-	-	4,74	18,61	5,09	29,80	39,68	30,52
P38	37.5	37.5	-	-	5,59	21,45	4,41	27,96	42,85	29,19
P311	25	25	-	-	4,48	17,95	4,13	31,64	42,79	25,58
P312	25	25	-	-	4,79	19,74	3,96	28,38	46,32	25,30
P43	25	25	-	-	5,32	22,21	4,81	29,28	49,31	21,41
P48	37.5	37.5	-	-	4,74	22,16	5,53	27,47	51,54	20,99
P56	25	25	-	-	5,19	19,27	4,31	25,86	50,63	23,51
P57	37.5	37.5	-	-	4,85	19,15	4,25	28,50	45,23	26,27
P510	37.5	37.5	-	-	6,89	16,34	4,27	25,41	47,00	27,59
P61	37.5	37.5	-	-	4,56	17,90	4,11	25,20	47,13	27,67
P62	25	25	-	-	4,79	18,55	4,53	25,15	45,84	29,01
P63	37.5	37.5	-	-	5,03	20,85	3,89	26,79	41,71	31,51
P64	37.5	37.5	-	-	5,74	21,67	4,45	26,86	40,10	33,04

CUADRO I. 8. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 37, 5 % y 25 % PCT.

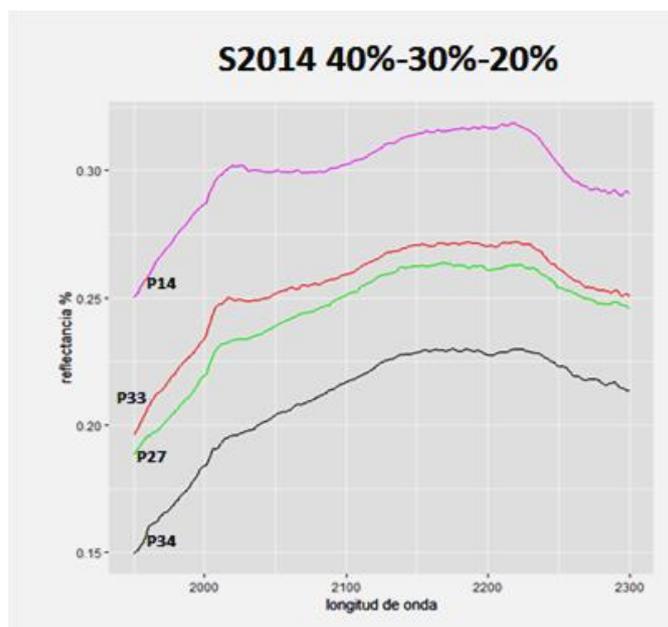


Figura I. 9 Firmas espectrales representativas de PCT= 40 %, 30 % y 20 % en S2014. En el Cuadro I.9 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RS %	RC %	RM %	MALEZAS %	COBSUP %.	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P14	30	66.6	-	33.3	-	-	5,8	18,67	8,4	18,23	40,80	40,97
P27	20	-	50	-	50	-	7,6	19,97	6,2	20,85	45,35	33,80
P33	40	25	50	-	25	-	6,7	20,4	6,60	32,82	31,00	36,18
P34	40	25	50	-	25	-	6,6	20,8	6,99	32,63	31,15	36,22

CUADRO I.9 Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 40 %, 30 % y 20 % PCT.

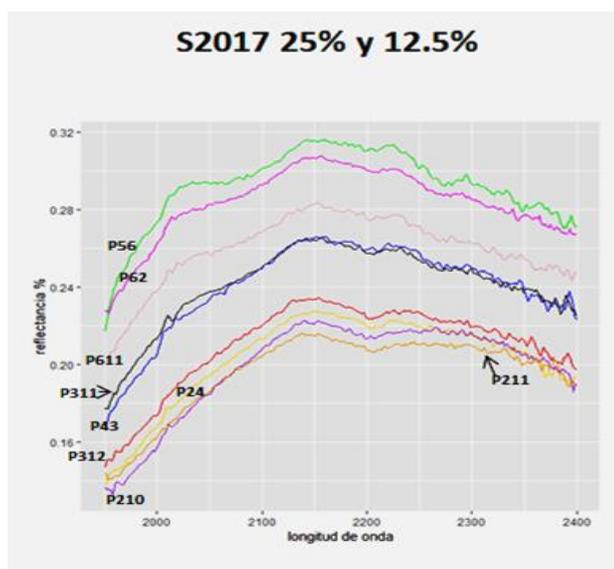


Figura I.10 Firmas espectrales representativas de PCT= 25 % y 12,5 % en S2017. En el Cuadro I.10 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	RS %	MALEZAS %	COB SUP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P24	12,5	12,5	-	-	6,29	19,28	4,44	31,46	41,16	27,39
P210	12,5	12,5	-	-	6,41	19,02	4,63	27,38	39,03	33,60
P211	12,5	12,5	-	-	5,59	17,02	4,22	27,54	40,60	31,86
P611	12,5	12,5	-	-	4,57	19,07	4,09	26,07	41,18	32,75

CUADRO I.10. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 25 % y 12,5 % PCT.

II. Firmas espectrales en el SWIR de las diferentes categorías de PCT para la transecta con rastrojo de maíz

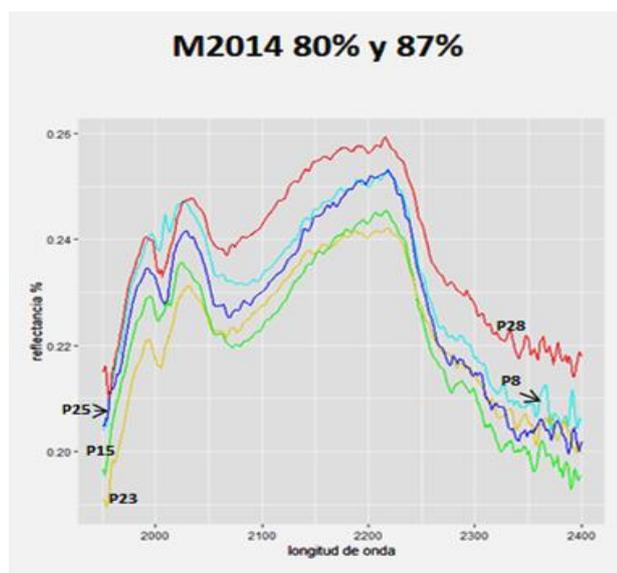


Figura II.1. Firmas espectrales representativas de PCT= 80 % y 87 %. En el Cuadro II.1 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RM %	CULTIVO ESPONTÁNEO %	COB SUPERP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P8	80	80	-	-	31,7	16,97	5,56	18,45	38,42	43,14
P15	87	87	-	-	26,5	23,51	5,72	20,26	45,94	33,80
P23	80	80	-	-	30,7	16,15	5,61	21,56	38,89	39,55
P25*	87	80	20	-	33,8	22,83	5,83	21,53	38,60	39,88
P28*	80	80	-	-	26,3	21,76	5,73	20,21	39,29	40,50

*En 4 puntos se registró el rastrojo en avanzado estado de descomposición

CUADRO II.1. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 80 % y 87 % PCT.

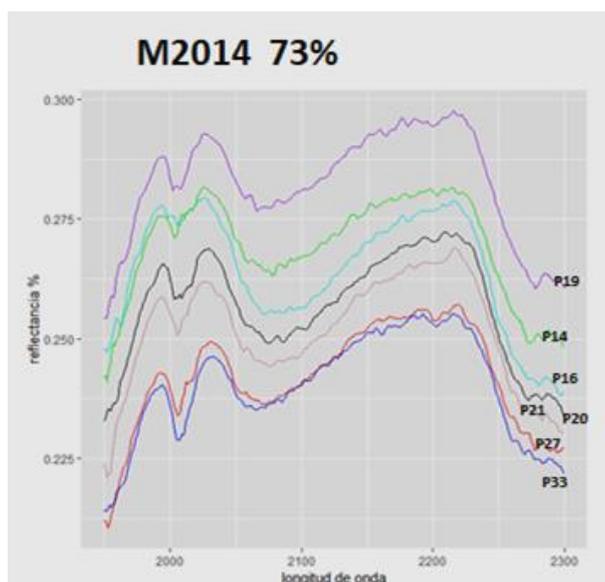


Figura II.2. Firmas espectrales representativas de PCT= 73 %. En el Cuadro II.2 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RM %	CULTIVO ESPONTÁNEO %	COB SUPERP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P3	73	100	-	-	31,5	30,90	5,74	21,13	38,42	40,44
P14	73*^	100	-	-	33,8	15,06	5,21	20,78	45,01	34,20
P16	73 *	100	-	-	25,4	20,24	5,62	17,80	43,44	38,76
P19	73 **	100	-	-	30,1	22,87	4,82	21,67	38,01	40,32
P20	73***	100	-	-	32,6	12,71	5,58	21,74	36,30	41,97
P21	73***	80	20	-	31,7	16,97	5,56	22,02	37,29	40,70
P27	73***	100	-	-	29,8	25,26	5,72	18,87	40,88	40,25
P33	73***	100	-	-	30,7	16,15	5,61	13,57	34,26	52,17

* En 4 puntos se registró el rastrojo en avanzado estado de descomposición

** En 3 puntos se registró el rastrojo en avanzado estado de descomposición

*** En 1 punto se registró el rastrojo en avanzado estado de descomposición

^ En 1 punto se registró bosta

CUADRO II.2. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 73 % PCT.

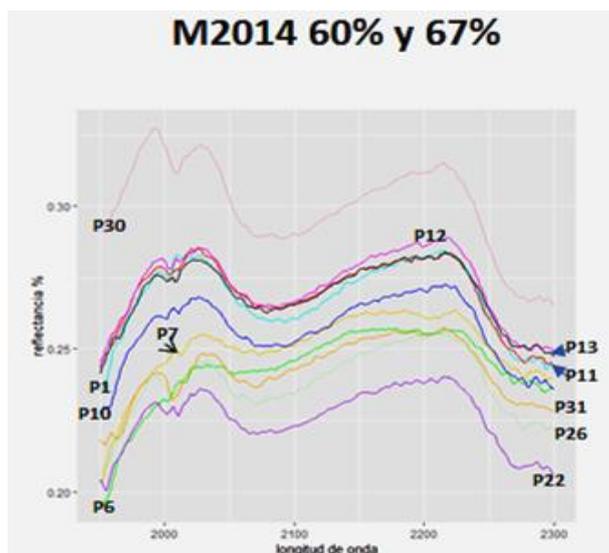


Figura II.3. Firmas espectrales representativas de PCT= 60 y 67 %. En el Cuadro II.3 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RM %	CULTIVO ESPONTÁNEO %	COB SUPERP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
1	67	100	-	-	25,9	26,69	4,91	21,13	39,35	39,52
6	60	90	10	-	34,9	22,42	4,48	17,84	39,20	42,95
7	60	90*	10	-	31,5	30,90	5,74	19,91	36,92	43,17
10	60	100	-	-	33,8	15,06	5,21	18,51	46,40	35,08
11	60	90	10	superpuestos	25,4	20,24	5,62	16,80	46,26	36,94
12	60	100	-	-	30,1	22,87	4,82	19,01	45,77	35,22
13	60	90	10	-	32,6	12,71	5,58	20,71	44,85	34,45
22	67	100	-	-	31,7	16,97	5,56	22,63	35,55	41,83
26	67	100	-	-	29,8	25,26	5,72	22,24	39,63	38,13
30	67	100	-	-	30,7	16,15	5,61	S/D	S/D	S/D
31	60	100	-	-	33,8	22,83	5,83	15,04	37,74	47,21

*1 punto con rastrojo en pie

CUADRO II.3. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 60 % y 67 % PCT.

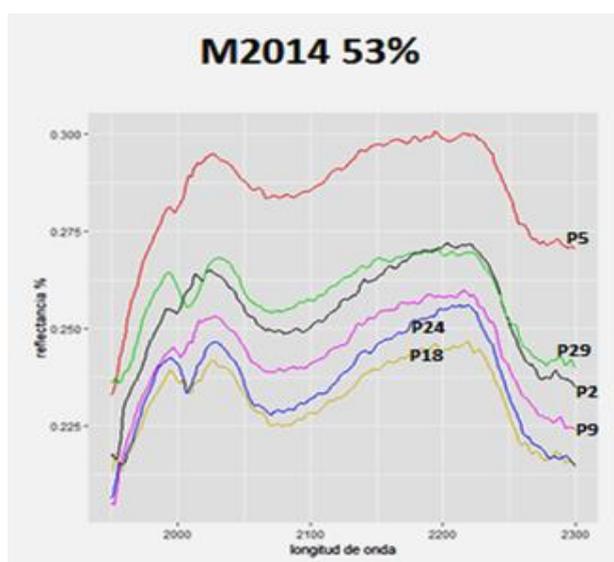


Figura II.4 Firmas espectrales representativas de PCT= 60 y 67 %. En el Cuadro II.3 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RM %	CULTIVO ESPONTÁNEO %	COB SUPERP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
2	53	100	-	-	34,9	22,42	4,48	20,06	38,86	41,08
5	53	90	10	-	31,5	30,90	5,74	18,23	40,20	41,57
9	53	100	-	-	33,8	15,06	5,21	19,44	44,92	35,64
18	53	100	-	-	25,4	20,24	5,62	21,56	34,98	43,46
24	53	90	10	-	30,1	22,87	4,82	20,38	37,61	42,01
29	53	100	-	-	32,6	12,71	5,58	S/D	S/D	S/D

CUADRO II.4. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 53 % PCT.

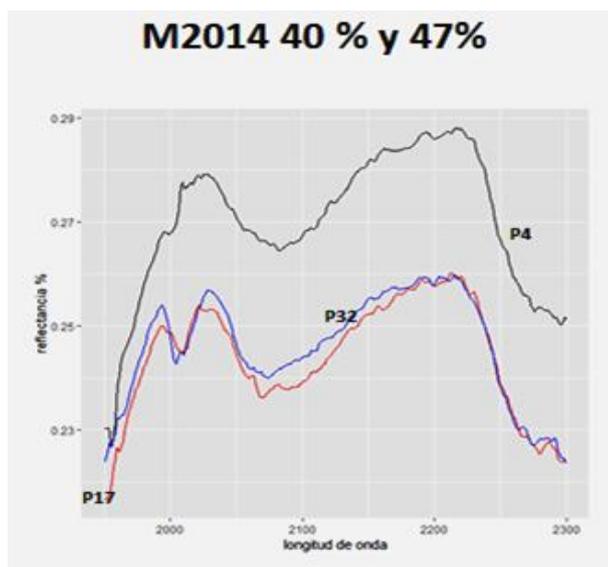


Figura II.5 Firmas espectrales representativas de PCT= 40 y 47 %. En el Cuadro II.5 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	RM %	CULTIVO ESPONTÁNEO %	COB SUPERP. %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
4	40	100	-	-	33,8	15,06	5,21	18,47	39,44	42,09
17	47	100	-	-	26,1	21,47	5,45	20,92	35,93	43,14
32	40	100	-	-	23,7	22,34	7,35	14,89	36,83	48,28

CUADRO II.5. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 40 % y 47 % PCT.

III- Firmas espectrales en el VIS-NIR, correspondientes a las diferentes categorías de PCT para las transectas con rastrojo de soja

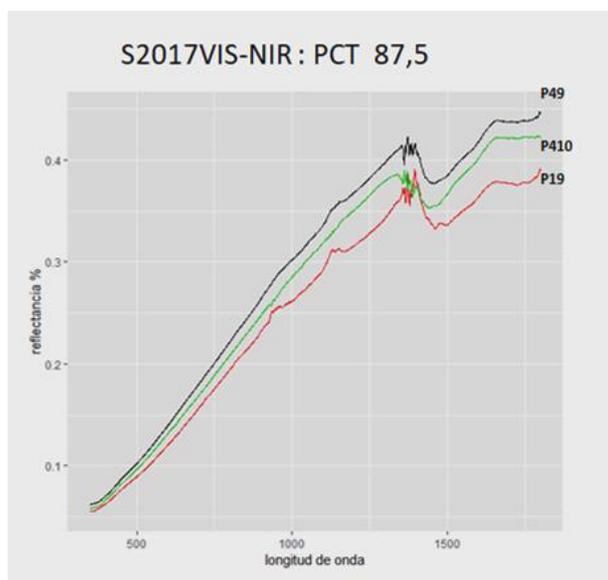


Figura III.1 Firmas espectrales representativas de PCT= 87,5 % en S2017. En el Cuadro III.1 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
49	87,5	4,68	19,76	4,53	29,15	50,02	20,83
410	87,5	7,52	19,68	4,22	26,07	44,28	29,64
19	87,5	4,98	27,16	4,32	33,66	41,38	24,96

CUADRO III.1. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 87,5 % de PCT.

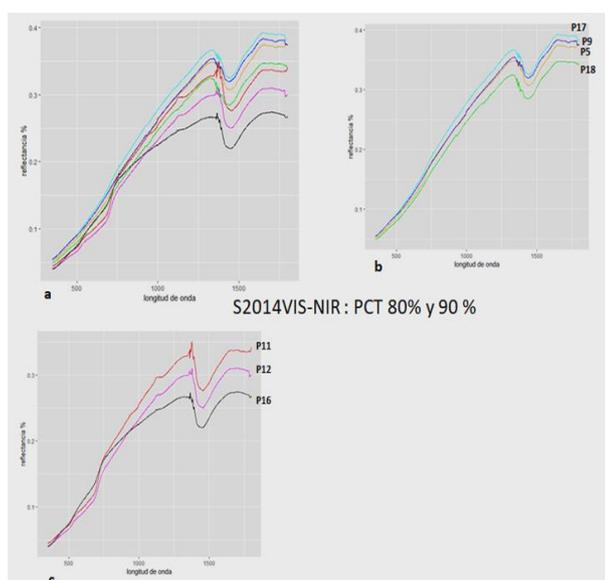


Figura III.2 Firmas espectrales representativas de PCT= 80 % y 90 % en 2014 (subgráfico a.). Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos b y c. En el Cuadro III.2 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P17	90	6,0	25,9	6,8	25,63	42,01	38,29
P18	90	3,2	23,0	5,5	19,16	42,52	38,32
P5	80	6,2	24,3	7,0	24,03	36,77	39,20
P9	80	8,0	24,0	6,2	18,78	44,96	36,26
P11	80	6,6	20,5	6,6	18,55	46,07	35,38
P12	80	5,9	21,5	6,3	17,22	47,16	35,62
P16	80	5,0	17,3	5,2	18,58	41,59	39,83

CUADRO III.2. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 80 % y 90 % de PCT.

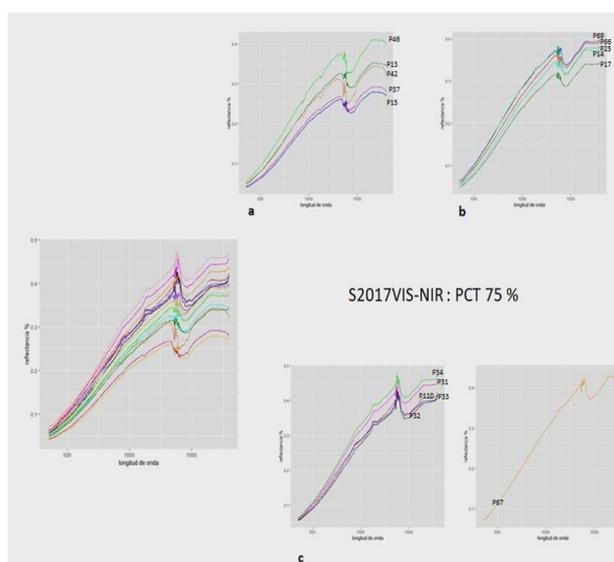


Figura III.3 Firmas espectrales representativas de PCT= 75 % en 2017 (subgráfico a.). Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos b, c, d y e. En el Cuadro III.3 se describen los atributos de superficie medidos,

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P13	75	5,58	27,39	5,46	32,10	41,11	26,79
P14	75	5,19	23,61	4,77	32,76	39,41	27,82
P15	75	4,87	22,51	5,11	31,61	38,89	29,50
P17	75	5,09	21,89	5,39	32,18	36,45	31,38
P110	75	5,10	26,87	4,61	32,87	42,94	24,19
P25	75	5,93	22,78	4,25	29,25	41,74	29,01
P31	75	5,44	25,29	4,45	28,21	45,25	26,54
P32	75	5,49	20,02	4,44	29,05	44,63	26,32
P33	75	5,44	21,61	5,02	28,27	44,61	27,13
P34	75	5,41	22,07	4,91	29,93	43,51	26,56
P37	75	5,17	18,44	5,03	34,15	36,77	29,08
P42	75	5,6	20,5	4,59	30,00	48,37	21,63
P46	75	5,52	21,91	4,83	28,57	49,87	21,56
P66	75	5,12	24,72	4,58	25,02	42,36	32,62
P67	75	4,80	19,55	4,33	25,89	40,30	33,81
P69	75	4,40	17,23	4,40	24,17	41,71	34,11

CUADRO III.3. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 75 % de PCT.

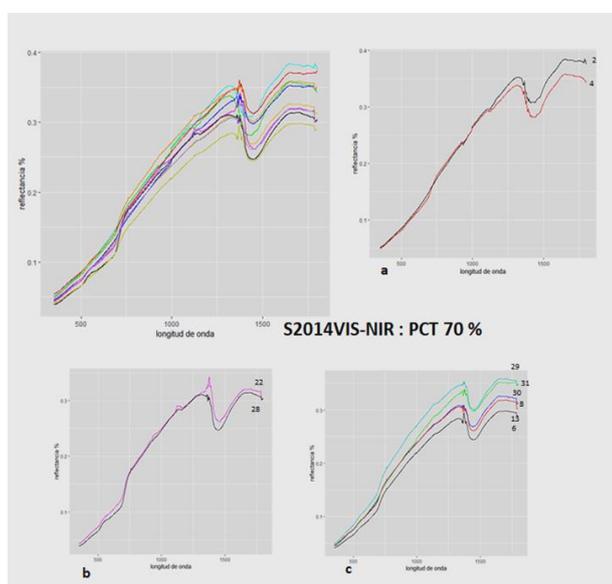


Figura III.4 Firmas espectrales representativas de PCT= 70 % en 2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a, b y c. En el Cuadro III.4 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P2	70	6,9	22,62	6,8	25,63	41,79	32,58
P13	70	6,3	22,56	7,9	15,57	46,62	37,81
P8	70	5,3	21,43	6,7	18,85	47,39	33,76
P4	70	7,4	22,67	7,1	22,18	38,85	38,97
P22	70	3,3	21,09	7,4	22,38	46,03	31,58
P29	70	4,8	23,93	6,3	31,64	31,10	37,26
P6	70	6,1	26,21	7,4	23,82	38,97	37,20
P31	70	9,0	23,64	6,6	32,15	30,35	37,51
P28	70	6,2	17,61	6,5	33,33	29,41	37,26
P30	70	7,0	20,72	7,0	33,45	29,39	37,16

CUADRO III.4. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 70 % de PCT.

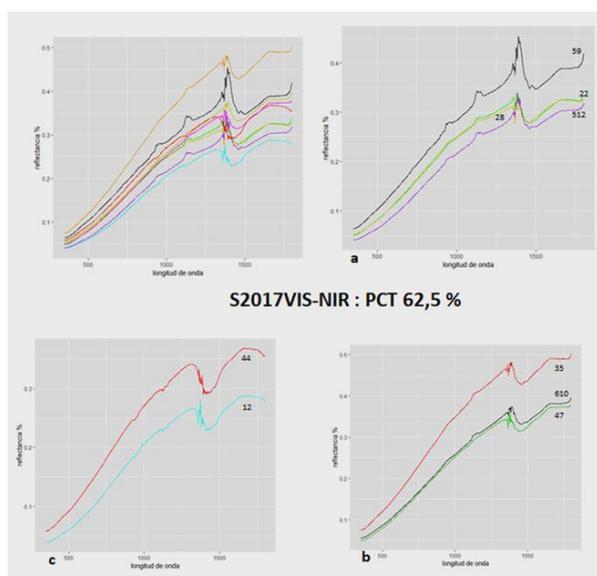


Figura III.5 Firmas espectrales representativas de PCT= 62,5 % en 2017. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a, b y c. En el Cuadro III.5 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P12	62.5	4,96	19,94	4,7	32,80	40,74	26,46
P22	62.5	6,03	20,75	4,5	31,05	43,25	25,70
P28	62.5	6,13	27,62	4,2	29,67	40,46	29,87
P35	62.5	5,33	21,44	5,1	29,09	45,91	25,00
P44	62.5	5,32	23,65	4,7	27,95	50,55	21,51
P47	62.5	7,02	26,55	4,8	27,96	51,32	20,72
P59	62.5	5,26	20,24	4,4	25,70	44,23	30,07
P512	62.5	4,97	17,25	4,2	24,97	46,20	28,83
P610	62.5	4,88	18,57	4,5	24,41	42,13	33,46

CUADRO III.5. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 62,5 % de PCT.

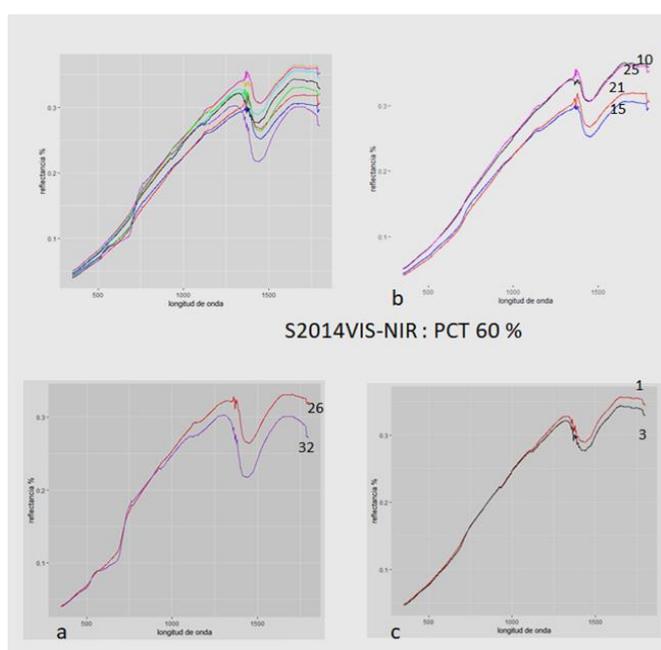


Figura III.6 Firmas espectrales representativas de PCT= 60 % en 2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a, b y c. En el Cuadro III.6 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P1	60	7.2	25.0	6.6	27,12	41,49	31,39
P3	60	7,1	26,05	7,08	24,37	42,68	32,94
P10	60	6.4	23,25	5,75	18,09	45,49	36,41
P15	60	5,9	22,17	6,33	18,64	39,75	41,61
P21	60	5.1	21,69	6,59	21,06	41,42	37,52
P25	60	6,3	21,38	6,40	20,86	47,19	31,95
P26	60	7,7	19,90	6,71	23,86	42,93	33,20
P32	60	6,8	22,45	6,30	31,95	29,68	38,37

CUADRO III.6. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 60 % de PCT.

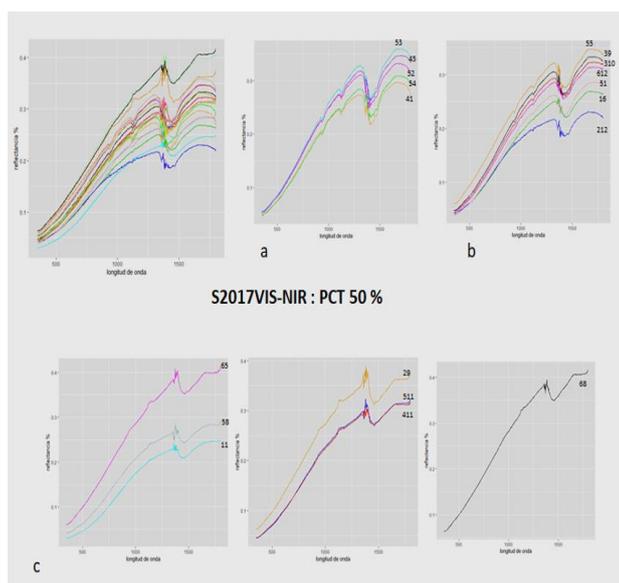


Figura III.7 Firmas espectrales representativas de PCT= 50 % en 2017. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades (subgráficos a, b c d y e). En el Cuadro III.7 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P11	50	5,20	19,97	5,07	34,33	39,19	26,49
P16	50	5,23	24,77	4,68	31,97	38,22	29,81
P29	50	6,60	18,82	4,39	28,23	35,59	36,18
P212	50	7,12	17,08	4,32	28,86	41,30	29,83
P39	50	5,05	22,39	4,58	27,53	43,63	28,84
P310	50	4,78	20,90	4,17	29,49	42,57	27,95
P41	50	5,21	16,14	3,89	29,88	47,49	22,64
P45	50	5,80	19,93	4,28	29,15	49,10	21,74
P411	50	5,04	24,19	5,11	26,60	47,32	26,08
P51	50	4,89	20,46	4,84	26,38	46,93	26,69
P52	50	5,32	21,36	4,19	26,27	48,52	25,22
P53	50	5,32	18,64	4,23	25,46	46,46	28,07
P54	50	5,04	19,22	4,56	25,99	47,43	26,58
P55	50	5,65	18,15	4,58	25,67	48,54	25,80
P58	50	6,14	17,38	4,57	25,67	46,50	27,83
P511	50	5,36	17,10	4,62	26,88	45,05	28,07
P65	50	4,89	17,98	4,66	25,37	40,38	34,26
P68	50	4,90	20,26	4,63	24,24	41,04	34,72
P612	50	4,86	18,81	4,37	26,57	42,68	30,75

CUADRO III.7. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 50 % de PCT

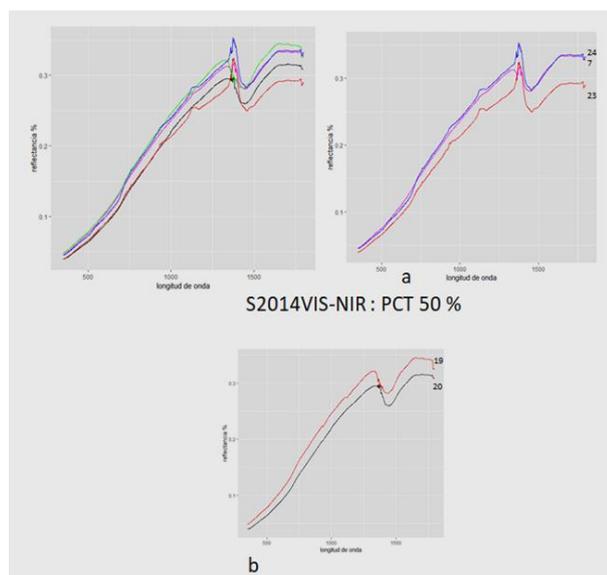


Figura III.8 Firmas espectrales representativas de PCT= 50 % en 2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro III.8 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	Arc %	Li %	ARE %
P7	50	8.2	23.3	6.9	18.8	47,06	34,17
P19	50	6.2	21.9	6.7	18.8	41,99	39,25
P20	50	5.5	17.6	6.8	17.9	46,88	35,19
P24	50	7.3	24.2	6.6	21.1	46,43	32,47
P23	50	7.1	22.5	5.9	22.0	44,89	33,07

CUADRO III.8. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 50 % de PCT.

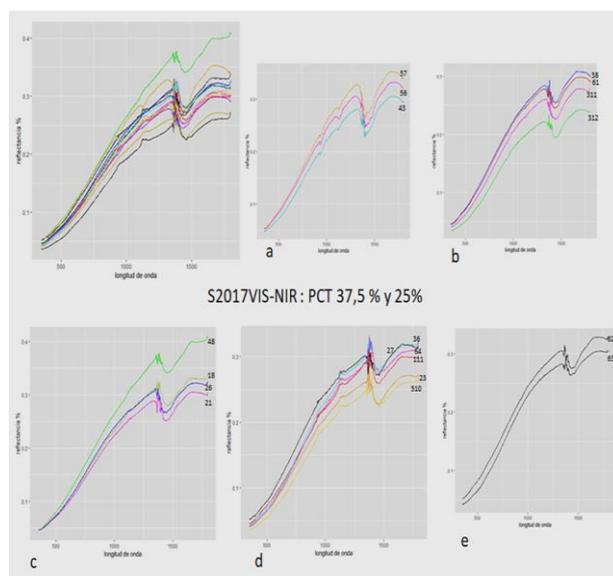


Figura III.9 Firmas espectrales representativas de PCT= 37,5 % y 25 % en 2017. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a b c d y e. En el Cuadro III.9 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P18	37.5	5,12	29,59	4,93	27,98	37,50	34,52
P111	37.5	4,85	25,08	5,79	32,75	42,78	24,47
P21	37.5	6,78	18,10	3,89	32,37	41,69	25,95
P23	37.5	6,52	20,43	4,31	31,90	44,93	23,17
P26	37.5	7,73	18,20	4,35	28,23	43,60	28,16
P27	37.5	5,96	22,36	4,68	28,02	38,72	33,26
P36	25	4,74	18,61	5,09	29,80	39,68	30,52
P38	37.5	5,59	21,45	4,41	27,96	42,85	29,19
P311	25	4,48	17,95	4,13	31,64	42,79	25,58
P312	25	4,79	19,74	3,96	28,38	46,32	25,30
P43	25	5,32	22,21	4,81	29,28	49,31	21,41
P48	37.5	4,74	22,16	5,53	27,47	51,54	20,99
P56	25	5,19	19,27	4,31	25,86	50,63	23,51
P57	37.5	4,85	19,15	4,25	28,50	45,23	26,27
P510	37.5	6,89	16,34	4,27	25,41	47,00	27,59
P61	37.5	4,56	17,90	4,11	25,20	47,13	27,67
P62	25	4,79	18,55	4,53	25,15	45,84	29,01
P63	37.5	5,03	20,85	3,89	26,79	41,71	31,51
P64	37.5	5,74	21,67	4,45	26,86	40,10	33,04

CUADRO III.9. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 37, 5 % y 25 % de PCT.

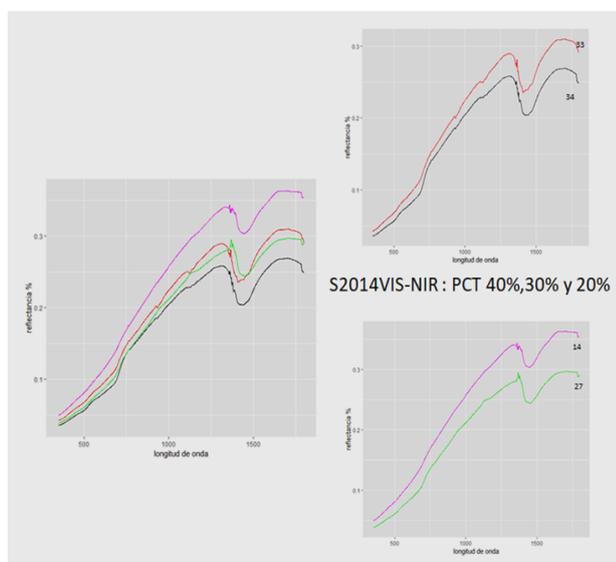


Figura III.10 Firmas espectrales representativas de PCT= 40 % 30 % y 20 % en 2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro III.10 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P14	30	5,8	18,67	8,4	18,23	40,80	40,97
P27	20	7,6	19,97	6,2	20,85	45,35	33,80
P33	40	6.7	20.4	6,60	32,82	31,00	36,18
P34	40	6.6	20.8	6,99	32,63	31,15	36,22

CUADRO III.10. Atributos medidos en S2014 en las observaciones con 40%, 30% y 20 % de PCT.

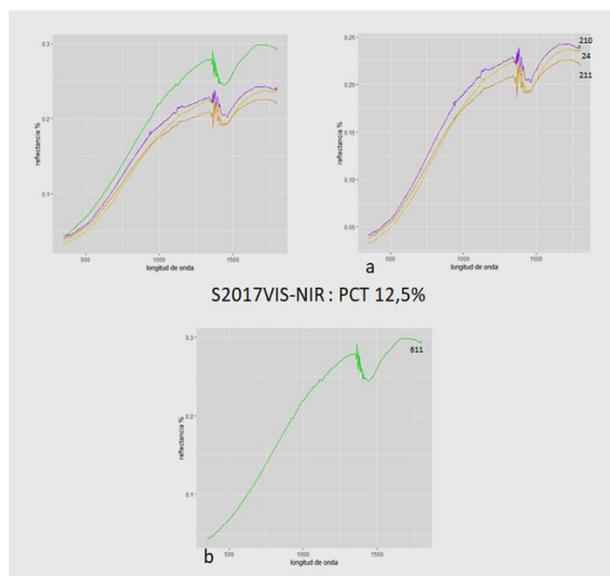


Figura III. 11 Firmas espectrales representativas de PCT= 12,5 % en 2017. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro III.11 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P24	12.5	6,29	19,28	4,44	31,46	41,16	27,39
P210	12.5	6,41	19,02	4,63	27,38	39,03	33,60
P211	12.5	5,59	17,02	4,22	27,54	40,60	31,86
P611	12.5	4,57	19,07	4,09	26,07	41,18	32,75

CUADRO III.11. Atributos medidos en S2017 en las observaciones con 12, 5 % de PCT.

IV. Firmas espectrales entre 350 nm y 1800 nm, correspondientes a las diferentes categorías de PCT para la transecta con rastrojo de maíz

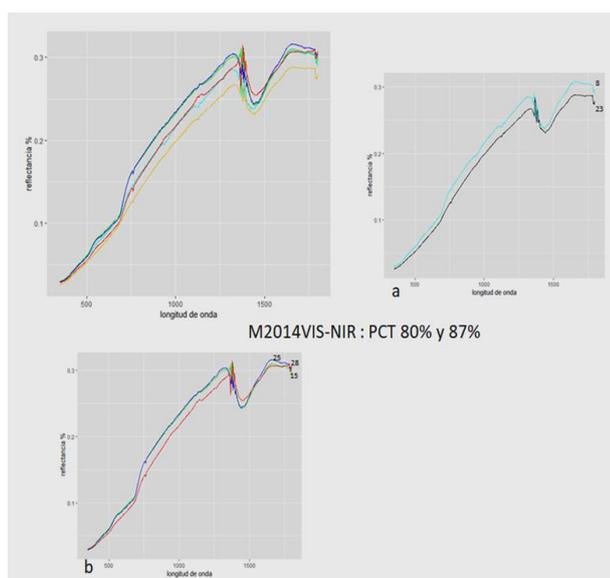


Figura IV.1 Firmas espectrales representativas de PCT= 80 % y 87 % en M2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro IV.1 se describen los atributos de superficie medidos

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P8	80	31,7	16,97	5,56	18,45	38,42	43,14
P15	87	26,5	23,51	5,72	20,26	45,94	33,80
P23	80	30,7	16,15	5,61	21,56	38,89	39,55
P25*	87	33,8	22,83	5,83	21,53	38,60	39,88
P28*	80	26,3	21,76	5,73	20,21	39,29	40,50

CUADRO IV.1. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 80 %, y 87 % de PCT.

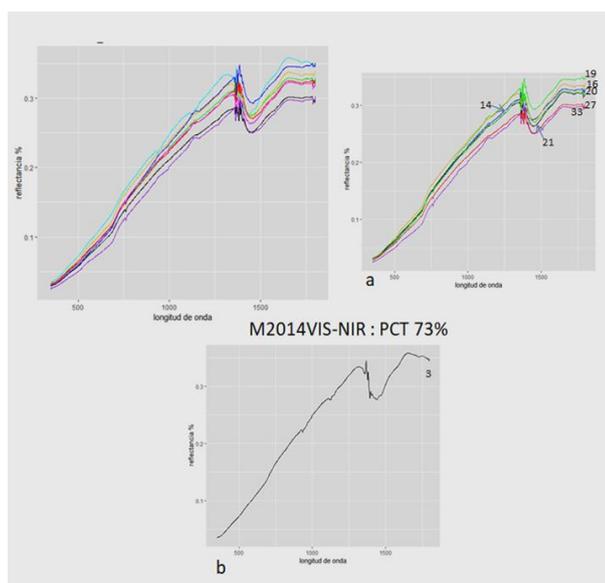


Figura IV.2 Firmas espectrales representativas de PCT=73 % en M2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro IV.2 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
P3	73	31,5	30,90	5,74	21,13	38,42	40,44
P14	73*^	33,8	15,06	5,21	20,78	45,01	34,20
P16	73 *	25,4	20,24	5,62	17,80	43,44	38,76
P19	73 **	30,1	22,87	4,82	21,67	38,01	40,32
P20	73***	32,6	12,71	5,58	21,74	36,30	41,97
P21	73***	31,7	16,97	5,56	22,02	37,29	40,70
P27	73***	29,8	25,26	5,72	18,87	40,88	40,25
P33	73***	30,7	16,15	5,61	13,57	34,26	52,17

CUADRO IV.2. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 73 % de PCT.

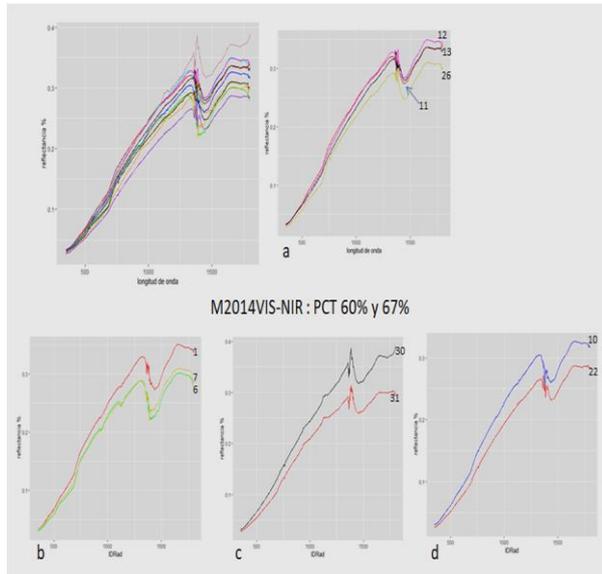


Figura IV.3 Firmas espectrales representativas de PCT=60 % y 67 % en M2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a b c y d. En el Cuadro IV.3 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
1	67	25,9	26,69	4,91	21,13	39,35	39,52
6	60	34,9	22,42	4,48	17,84	39,20	42,95
7	60	31,5	30,90	5,74	19,91	36,92	43,17
10	60	33,8	15,06	5,21	18,51	46,40	35,08
11	60	25,4	20,24	5,62	16,80	46,26	36,94
12	60	30,1	22,87	4,82	19,01	45,77	35,22
13	60	32,6	12,71	5,58	20,71	44,85	34,45
22	67	31,7	16,97	5,56	22,63	35,55	41,83
26	67	29,8	25,26	5,72	22,24	39,63	38,13
30^	67	30,7	16,15	5,61	S/D	S/D	S/D
31	60	33,8	22,83	5,83	15,04	37,74	47,21

Compactado (rueda pulverizadora)
S/D sin dato

CUADRO IV.3. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 60 % y 67 % de PCT

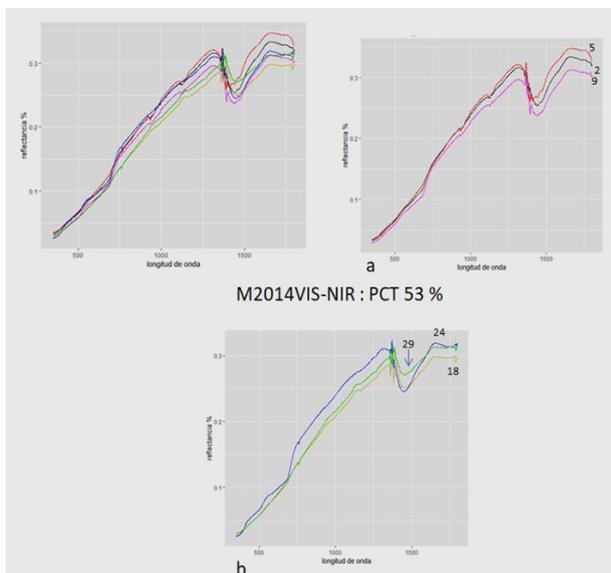


Figura IV.4 Firmas espectrales representativas de PCT= 53 % en M2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro IV.4 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	Arc %	Li %	ARE %
2	53	34,9	22,42	4,48	20,06	38,86	41,08
5	53	31,5	30,90	5,74	18,23	40,20	41,57
9	53	33,8	15,06	5,21	19,44	44,92	35,64
18	53	25,4	20,24	5,62	21,56	34,98	43,46
24	53	30,1	22,87	4,82	20,38	37,61	42,01
29^	53	32,6	12,71	5,58	S/D	S/D	S/D

^ Compactado (rueda pulverizadora)

S/D sin dato

CUADRO IV.4. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 53 % de PCT

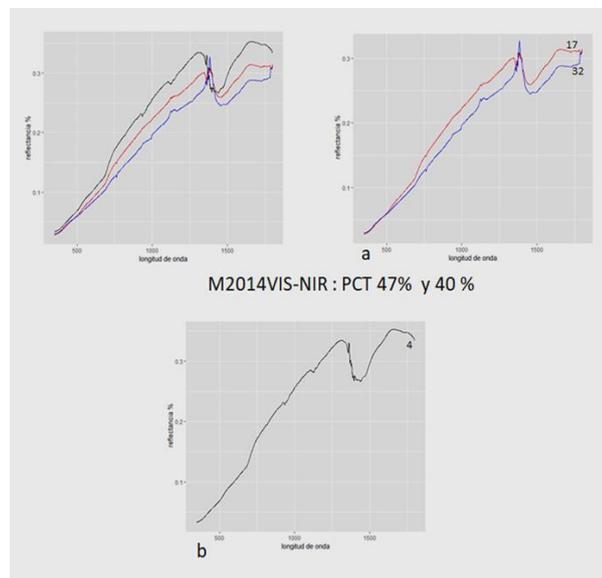


Figura IV. 5 Firmas espectrales representativas de PCT= 40 % y 47 % en M2014. Agrupadas según similares formas y profundidad de las concavidades en los subgráficos a y b. En el Cuadro IV.5 se describen los atributos de superficie medidos.

PUNTO	PCT %	HR %	HS %	MO %	arc %	Li %	ARE %
4	40	33,8	15,06	5,21	18,47	39,44	42,09
17	47	26,1	21,47	5,45	20,92	35,93	43,14
32	40	23,7	22,34	7,35	14,89	36,83	48,28

CUADRO IV.5. Atributos medidos en M2014 en las observaciones con 40 % y 47 % de PCT.

APÉNDICE B

Capítulo 3: Comportamiento de la línea de suelos en superficies agrícolas en barbecho conservacionista

I-Correlación de las combinaciones de bandas -

S2014:

Bandas	507	681	935	1006	1125	1190	1485	2083	2336
507	1	0	2,40E-03	0,04	0,26	0,23	0,72	0,05	0,02
681	0,94	1	1,40E-05	2,20E-04	0,01	3,30E-03	0,1	0,85	0,82
935	0,44	0,59	1	0	0	0	7,00E-07	1,90E-04	6,10E-04
1006	0,31	0,52	0,95	1	0	0	5,20E-12	2,80E-08	2,80E-07
1125	0,17	0,4	0,92	0,97	1	0	0	5,40E-11	7,50E-10
1190	0,18	0,42	0,87	0,97	0,98	1	0	0	2,10E-11
1485	0,06	0,25	0,66	0,82	0,88	0,92	1	0	0
2083	0,29	0,03	0,52	0,71	0,79	0,84	0,97	1	0
2336	0,35	-0,04	0,49	0,67	0,76	0,8	0,95	1	1

S2017

Bandas	507	681	935	1006	1125	1190	1485	2083	2336
507	1	0	0	0	0	0	0	0	0
681	1	1	0	0	0	0	0	0	0
935	0,98	0,99	1	0	0	0	0	0	0
1006	0,98	0,99	0,99	1	0	0	0	0	0
1125	0,97	0,98	1	0,99	1	0	0	0	0
1190	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1	0	0	0
1485	0,95	0,96	0,98	0,98	0,99	0,99	1	0	0
2083	0,92	0,93	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	1	0
2336	0,93	0,94	0,95	0,97	0,97	0,98	0,98	1	1