



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

MAPEO DE SUELOS AFECTADOS POR SALINIDAD

Manual
técnico



ALIANZA MUNDIAL
POR EL SUELO

Mapeo de suelos afectados por salinidad

Manual
técnico

Christian T. Omuto, Ronald Vargas, Kostiantyn Viatkin and Yusuf Yigini
Alianza Mundial por el Suelo, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

Abdelmagid El Mobarak and Nuha Abdalla Mohamed Khamis
Centro de Investigación de la Tierra y el Agua, Corporación de Investigación Agrícola, Sudán

Cita requerida:

Omuto, C.T., Vargas, R.R., El Mobarak, A.M., Mohamed, N., Viatkin, K. y Yigini, Y. 2021. *Mapeo de suelos afectados por salinidad - Manual técnico*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9215es>

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, ni sobre sus autoridades, ni respecto de la demarcación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-133840-7

© FAO, 2021



Algunos derechos reservados. Esta obra se distribuye bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: “La presente traducción no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en [idioma] será el texto autorizado”.

Todo litigio que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación vigentes serán el reglamento de mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules> y todo arbitraje se llevará a cabo de manera conforme al reglamento de arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Fotografías de la cubierta e contracapa: ©FAO/Christian Omuto

Índice

Prefacio	ix
Agradecimientos	x
Abreviaturas y siglas	xi
Símbolos y notaciones	xiii
Colaboradores.....	xiv
Resumen ejecutivo.....	xv
SECCIÓN 1: INFORMACION SOBRE LOS ANTECEDENTES	1
1. Introducción.....	2
1.1 Presentación	3
2 Características de los suelos afectados por salinidad.....	5
2.1 Génesis de los suelos afectados por salinidad.....	5
2.1.1 Modelo de interacción suelos-agua-clima	5
2.1.2 Modelo del depósito directo	6
2.2 Características.....	6
2.3 Indicadores para evaluar los suelos afectados por salinidad	7
2.4 Causas de los problemas de salinidad en el suelo	8
2.4.1 Causas primarias	9
2.4.2 Causas secundarias	10
2.5 Clasificación de los suelos afectados por salinidad	10
2.6 Distribución global de suelos afectados por salinidad.....	13
3 Métodos para el mapeo de suelos afectados por salinidad	15
3.1 Métodos basados en mapas del suelo y opiniones de expertos	15
3.2 Uso de la aplicación de sensores remotos.....	17
3.3 Métodos basados en indicadores de salinidad de suelos.....	20
3.4 Requisitos de datos para el mapeo de la salinidad del suelo	21
3.4.1 Datos del suelo.....	22
3.4.2 Información sobre factores formadores de suelos.....	23
3.4.3 Otros datos complementarios	23
3.4.4 Modelos de conversión.....	24
SECCIÓN 2: DESAROLLO DE INFORMACION SOBRE SUELOS AFECTADOS POR SALINIDAD	26
4 Preparación para el mapeo a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad.....	27
4.1 Requisitos.....	27
4.1.1 Datos de entrada.....	27
4.1.2 Equipo y programas de computación.....	28
4.1.3 Ejemplo de datos de entrada para demostrar el mapeo de suelos afectados por salinidad ...	29
4.2 Requisitos de los programas de computación para un mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad.....	30
4.2.1 Requisitos de la aplicación del Sistema de Información Geográfica SIG	30
4.2.2 Requisitos de la armonización de datos	31
4.2.3 Requisitos de la modelación espacial	32

4.3	Preparación de los datos de entrada para el mapeo de los suelos afectados por salinidad	33
4.3.1	Organización de los datos de la hoja de cálculo	34
4.3.2	Organización de las capas SIG.....	36
4.3.3	Armonización de las capas de entrada SIG	37
4.3.4	Base de datos SIG de entrada	41
5	Enfoque de mapeo global impulsado por los países	44
5.1	Antecedentes	44
5.2	Paso 1: Armonización de los datos de entrada.....	46
5.2.1	Armonización de las capas SIG.....	46
5.2.2	Armonización de los datos de entrada de suelo.....	50
5.3	Paso 2: Indicadores de modelado espacial	55
5.3.1	Elección del modelado adecuado	56
5.3.2	Construcción y prueba de modelos	58
5.3.3	Predicción espacial y evaluación de la precisión	60
5.4	Parte 3: Modelado espacial de suelos afectados por salinidad	62
5.4.1	Modelado espacial de suelos afectados por salinidad	62
5.4.2	Evaluación de la precisión.....	64
5.4.3	Evaluación de la incertidumbre	66
5.5	Actualización del mapa	71
5.5.1	Actualización de la evaluación de las necesidades	71
5.5.2	Muestreo para el monitoreo y relleno de vacíos.....	71
SECCIÓN 3: INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN Y MOVILIZACIÓN DE RECURSOS.....		73
6	Documentación de los productos e intercambio de información	74
6.1	Documentación de los productos	74
6.1.1	Mapeo de los elementos del mapa.....	74
6.1.2	Archivo de metadatos del mapa	76
6.2	Intercambio de información	77
6.3	Movilización de recursos.....	79
6.3.1	Estrategia de movilización de recursos.....	79
6.4	Programa de desarrollo de capacitación técnica para el desarrollo de información espacial .	82
6.4.1	Descripción del programa	82
6.4.2	Duración y requisitos	83
6.4.3	Objetivos y resultados.....	83
6.4.4	Mejorar las habilidades y conocimientos de los participantes en documentación e intercambio de información sobre suelos	84
6.4.5	Método de impartición	86
6.4.6	Entregables.....	87
Referencias.....		88
Glosario		94
Apéndices.....		98
Apéndice A: Ejemplo de descarga de imágenes del USGS.....		98
Apéndice B: Preguntas frecuentes al implementar R		100
Apéndice C: Revisión de la organización correcta de datos en Excel		104

Figuras

Figura 1.1: Resultados de la encuesta sobre disponibilidad de datos a nivel de países para el mapeo de suelos afectados por salinidad.....	2
Figura 1.2: Esquema impulsado por los países para el mapeo global de suelos afectados por salinidad	3
Figura 2.1: Vías genéticas para el desarrollo de suelos afectados por salinidad.....	6
Figura 2.2: Ilustración gráfica de las características de los suelos afectados por salinidad	7
Figura 2.3: Proporción de la gravedad de superficies afectadas por salinidad en el mundo	14
Figura 2.4: Distribución global de los litorales y valles de los ríos afectados por salinidad (fuente: Li <i>et al.</i> , 2014)	14
Figura 3.1: Marco para desarrollar métodos de mapeo suelos afectados por salinidad.	15
Figura 3.2: Ejemplo de mapa de suelos afectados por salinidad (adaptado de Szabolcs, 1979)	16
Figura 3.3: Esquema para detectar la superficie terrestre con sensores remotos.....	17
Figura 3.4: Mapa global de salinidad del suelo usando aplicaciones de sensores remotos (fuente: Ivushkin <i>et al.</i> , 2019)	20
Figura 3.5: Enfoques para usar indicadores del suelo en el mapeo de suelos afectados por salinidad	21
Figura 3.6: Distribución global de los suelos afectados por salinidad (Fuente: Wicke <i>et al.</i> , 2011).	21
Figura 3.7: Requisitos de datos para el mapeo de suelos afectados por salinidad	24
Figura 4.1: Requisitos para el mapeo a escala múltiple de suelos afectados por Salinidad	28
Figura 4.2: Ubicación de la información de los perfiles del suelo en el norte de Sudán	30
Figura 4.3: Armonización de los datos de entrada para el mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad	32
Figura 4.4: Pasos para proteger una carpeta con datos originales.....	34
Figura 4.5: Formato de entrada de datos de la hoja de cálculo	35
Figura 4.6: Guardado de los datos de la hoja de cálculo en MS Excel como archivo de texto CSV	35
Figura 4.7: Reproyección de las capas SIG en QSIG	38
Figura 4.8: Pasos para la conversión de datos vectoriales a datos raster en QSIG	39
Figura 4.9: Procesamiento de imágenes usando plugins de clasificación semi-automáticos	39
Figura 4.10: Conversión de las imágenes de los sensores remotos en mosaicos.....	40
Figura 4.11: Recorte de imágenes usando QSIG	40
Figura 4.12: Pasos para el análisis digital del terreno en SAGA.....	41
Figura 4.13: Desarrollo de la base de datos SIG para el mapeo de suelos afectados por salinidad.	41
Figura 4.14: Creación de una base de datos armonizada SIG en ILWIS.....	42
Figura 5.1: Enfoque multiescala para el mapeo nacional de suelos afectados por salinidad basado en mapas de indicadores	44
Figura 5.2: Distribución estadística empírica de los índices de la imagen a partir del conjunto de datos del estudio de caso de Sudan.....	49

Figura 5.3: Correlación de los índices de la imagen y gráfico <i>scree</i> de sus componentes principales.....	50
Figura 5.4: Ilustración gráfica de la relación entre CE aparente y medida	53
Figura 5.5: Ejemplo de armonización de la profundidad para CE _{se}	54
Figura 5.6: Gráfica de burbujas para CE armonizada superficial 0-30cm	55
Figura 5.7: Distribución de la frecuencia antes y después de la transformación de la CE	56
Figura 5.8: Representación gráfica de la distribución de frecuencia con límites de predicción en el intervalo de confianza del 95%.....	60
Figura 5.9: Representación gráfica de la CE prevista versus CE medidos.....	60
Figura 5.10: Representatividad de los rangos de la CE de validación (puntos de muestreo) en el mapa de predicción (características del mapa)	62
Figura 5.11: Ancho de la predicción espacial al 95% del intervalo de confianza y sobreposición de puntos de validación	62
Figura 5.12: Mapas de suelos afectados por salinidad (0-30 cm).....	64
Figura 5.13: Ilustración gráfica de la precisión de la clasificación para suelos afectados por salinidad	66
Figura 5.14: Proceso de estimación de incertidumbre Monte Carlo.....	67
Figura 5.15: Funciones de correlación para CE (0-30 cm).....	68
Figura 5.16: Realizaciones simuladas de indicadores de entrada de suelos normalizados.....	70
Figura 5.17: Mapa de suelo superficial (0-30 cm) afectado por salinidad en el área de estudio	71
Figura 5.18: Número y lugar de muestras para actualización	73
Figura 6.1: Representación de la salinidad en los mapas	76
Figura 6.2: Documentación de ejemplo en el diseño de mapas.....	77
Figura 6.3: Ejemplo de metafichero que contiene metadatos de mapas.....	77
Figura 6.4: Áreas de consideración al planificar el intercambio de información	78
Figura 6.5: Estrategia de movilización de recursos para la elaboración y actualización de información de suelos afectados por salinidad	81

Cuadros

Cuadro 1.1: Presentación del libro	5
Cuadro 2.1: Características de los suelos afectados por salinidad	8
Cuadro 2.2: Resumen de propiedades del suelo para diagnosticar suelos afectados por salinidad	9
Cuadro 2.3: Causas de problemas de salinidad en los suelos.....	10
Cuadro 2.4: Identificación de la intensidad de problemas de salinidad en el suelo	12
Cuadro 2.5: Clasificación de la intensidad de la salinidad usando mediciones gravimétricas	13
Cuadro 2.6: Estimaciones globales de áreas afectadas por salinidad	14
Cuadro 3.1: Características de las imágenes de sensores remotos usadas comúnmente para suelos afectados por salinidad	19

Cuadro 3.2: Ejemplos de combinaciones bandas de imágenes para el mapeo de suelos afectados por salinidad	20
Cuadro 3.3: Resumen de requisitos de datos para el mapeo de suelos afectados por salinidad	23
Cuadro 3.4: Resumen de propiedades del suelo para cartografiar la salinidad	23
Cuadro 3.5: Modelos existentes de conversión de CE	26
Cuadro 4.1: Requisitos de datos de entrada mínimos para el mapeo de una zona extensa de suelos afectados por salinidad	28
Cuadro 4.2: Datos de entrada del estudio de caso del norte de Sudán (fuente: Gobierno de Sudán, http://suis.sd/)	31
Cuadro 5.1: Paquetes R y su aplicación en el mapeo multiescala de suelos afectados por salinidad	46
Cuadro 6.1: Lista de verificación resumida para el desarrollo e intercambio de mapas de suelos afectados por salinidad en los países	79
Cuadro 6.2: Pasos para la planeación de la movilización de recursos para la obtención de información actualizada sobre suelos afectados por salinidad	83
Cuadro 6.3: Esquema genérico de capacitación	85

Prefacio

Los suelos afectados por salinidad como los suelos salinos o sódicos están distribuidos en todos los continentes con diversos niveles de intensidad de problemas. Se trata de suelos con altas cantidades de sales solubles y/o iones de sodio. La información actualizada de su distribución y causas es un primer paso hacia su manejo sustentable. Este libro brinda las guías técnicas y el método para desarrollar información armonizada a escalas múltiples de los suelos afectados por salinidad. El libro está organizado en tres secciones integradas por siete capítulos. Las secciones están ordenadas en forma consecutiva pero diseñadas en forma independiente a efecto de favorecer una lectura enfocada para los que deseen ir directamente a alguna sección. La Sección 1 proporciona los antecedentes. Consta de tres capítulos que abarcan la literatura sobre las características y métodos de mapeo para suelos con problemas de salinidad. Se pretende ilustrar los conceptos básicos, el vínculo de las características de los suelos afectados por salinidad con los requisitos de los datos de entrada para su mapeo, los métodos de clasificación existentes y la distribución global de estos suelos. La Sección 2 abarca los procedimientos metodológicos para desarrollar información espacial a escalas múltiples de los suelos afectados por salinidad. Cuenta con dos capítulos que describen los requerimientos, la preparación de los datos de entrada y los pasos procedimentales para desarrollar información espacial sobre suelos afectados por salinidad. Expone la forma de armonizar e integrar los datos de diferentes fuentes y características para producir información sobre suelos afectados por salinidad. La Sección 3 abarca el intercambio de información y la movilización de recursos al desarrollar información sobre suelos afectados por salinidad. Provee las guías para preparar mapas espaciales y los pasos para agregar valor agregado para beneficiar a los usuarios finales de la información. Contiene igualmente un programa de capacitación genérico para desarrollar capacidad técnica para mapear los suelos afectados por salinidad. Este programa sirve también como uno de los pasos para armonizar el desarrollo de productos en actividades de mapeo a escalas múltiples.

Agradecimientos

Los datos usados en este manual provinieron de diversas fuentes. El Gobierno de Sudán a través de Centro de Investigación Agrícola (en adelante ARC, por su sigla en inglés) en Wed Madani autorizó el uso de sus datos de suelo y algunas covariables. Las imágenes de sensores remotos y los datos de elevación fueron descargados de la página web de Investigación Geológica de Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Recibimos apoyo técnico y financiero de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) a través de la Alianza Mundial por el Suelo (GSP).

Abreviaturas y siglas

ADR	Reflectometría de Dominio de Amplitud
ASAL	Tierra Árida y Semiárida
ASTER	Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión
AVHRR	Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución
BI	Índice de Brillo
SCRI	Índice de Salinidad en la Respuesta de la Copa Arbórea
SCR	Sistema de Referencia de Coordenadas
CSV	Valores Separados por Comas
DEM	Modelo de Elevación Digital
EC	Conductividad Eléctrica
ER	Resistividad Eléctrica
EMI	Inducción Electromagnética
EOLSS	Enciclopedia de Sistemas de Sustento Vital
ESA	Agencia Espacial Europea
ESP	Porcentaje de Sodio Intercambiable
ESPG	Grupo Europeo de Exploración de Petróleo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FDR	Reflectometría de Dominio de Frecuencia
GIS	Sistema de Información Geográfica
GLS	Exploración (Estudio) Global de Suelos
GLOSIS	Sistema de Información Global sobre Suelos
GLOVIS	Visualización Global
GSOCmap	Mapa Global de Reservas de Carbono Orgánico del Suelo
GSP	Alianza Mundial por el Suelo (AMS)
GSSmap	Mapa Global de Salinidad Suelos
HWSD	Base de Datos Armonizada de Suelos Globales
IPR	Derechos de Propiedad Intelectual
ITPS	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos
ME	Error Medio
MC	Monte Carlo
MLD	Distancia de Lectura Mínima
MODIS	Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada
NIR	Infrarrojo Cercano
NDSI	Índice de Salinidad de Diferencia Normalizada
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales
NSE	Coficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe
NSI	Índice de Salinidad Normalizado
OC	Carbono Orgánico
OLI	Generador de Imágenes Terrestres en Operación
PCA	Análisis de Componentes Principales
RMSE	Error Cuadrático Medio
SR	Relación de Salinidad
SAR	Relación de Absorción de Sodio

SAVI	Índice Ajustado de Salinidad de la Vegetación
SDF	Instalación de Datos sobre el Suelo
SDI	Infraestructura de Datos Espaciales
SI	Índice de Salinidad
SIOR	Relación Sodio – Iones
SWIR	Infrarrojo de Onda Corta
TCP	Proyecto de Cooperación Técnica
TDR	Reflectometría de Dominio de Tiempo
TDS	Total de Sólidos Disueltos
TDI	Total de Iones Disueltos
TSS	Total de Sales Solubles
UAV	Vehículo Aéreo no Tripulado
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos
USGS	Investigación Geológica de Estados Unidos
VSSI	Índice de Salinidad del Suelo Vegetal
WoSIS	Servicio Mundial de Información sobre el Suelo

Símbolos y notaciones

CEES	Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada de suelo
CES	Conductividad eléctrica de la solución suelo-agua
CEa	Conductividad eléctrica del suelo en bruto in-situ
g/l	Gramos por litro
pH	Reacción del suelo (acidez o alcalinidad)
MOD9A1	Notación MODIS para la reflectancia de la superficie terrestre en imágenes compuestas de 8 días
CLORP	Clima, Organismo, Relieve y Materiales parentales
Ls	Factor pendiente-longitud
cnbl	red de canales hasta el nivel de cuenca
loncurve	curvatura longitudinal
BBlue	Banda azul
BGreen	Banda verde
BRed	Banda roja
BIRed	Banda infrarroja
swir	Banda de onda corta
lcover	Cobertura terrestre

Colaboradores

Nombre	Institución
Christian Thine Omuto	Alianza Mundial por el Suelo, FAO
El Mobarak A. Abdelmagid	Centro de Investigación Agrícola (ARC), Sudan
Nuha Muhammed	Centro de Investigación Agrícola (ARC), Sudan
Ronald Vargas	Alianza Mundial por el Suelo, FAO
Kostiantyn Viatkin	Alianza Mundial por el Suelo, FAO
Yigini Yusuf	Alianza Mundial por el Suelo, FAO
Maria Konyuskova	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Rosa Poch	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Mohammad Jamal Khan	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Megan Balks	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Attia Rafla	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Ashok Patra	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Siosia Halavatau	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Lydia Chabala	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Samuel Francke	Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS), FAO
Isabelle Verbeke	Alianza Mundial por el Suelo, FAO
Giulia Stanco	Alianza Mundial por el Suelo, FAO
Matteo Sala	Alianza Mundial por el Suelo, FAO

Resumen ejecutivo

Antecedentes

Los suelos afectados por salinidad, son suelos con altas cantidades de sales solubles y/o iones de sodio. La primera distribución global de estos suelos fue estimada por vez primera al final de la década de los setenta en aproximadamente 1 000 millones de hectáreas. Desde entonces, han ocurrido actualizaciones inconsistentes de la distribución global. La literatura reciente a escala mundial usa mayormente datos que fueron recolectados a finales de los setenta y aún describen la distribución global de los suelos afectados por salinidad en aproximadamente 1 000 millones de hectáreas. Evidentemente es necesaria una nueva actualización para mejorar el conocimiento del estado y distribución real de los suelos afectados por salinidad. Parte de la razón de la actualización global inconsistente se debe a una coordinación opaca en la recolección periódica de datos y a los protocolos para la recolección de datos armonizados que la sustentan. La Alianza Mundial por el Suelo (AMS) de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), está encabezando la movilización global para arrancar con la actualización de la información desde el nivel nacional al nivel global. El enfoque de abajo hacia arriba de la AMS está respaldado por la doble necesidad de apoyar a los países en la actualización de su información nacional y de contribuir a la actualización de la información global sobre suelos afectados por salinidad. Uno de los desafíos de este enfoque lo constituyen las incertidumbres potenciales debido a las diferencias en los conjuntos de datos y los enfoques de los países. El enfoque de este libro es proveer guías para armonizar los datos de entrada y enfoques para mapear los suelos afectados por salinidad en todos los niveles de actualización de la información.

Desarrollo de información espacial sobre suelos afectados por salinidad

En la literatura existen muchos métodos para mapear suelos afectados por salinidad que incluyen aquéllos basados en mapas por tipos de suelo integrados con opiniones de expertos, aplicaciones de sensores remotos y métodos basados en indicadores del suelo. Este libro pone en realce los requisitos, limitaciones y aplicaciones ilustrativas de dichos métodos. Se ha dado importancia al mapeo de los indicadores de suelos afectados por salinidad ya que 1) el método es sensible a la armonización de procedimientos a nivel de los países, 2) desarrolla información tanto de los suelos afectados por salinidad como de las propiedades vinculadas a los problemas de salinidad, 3) el método es capaz de cuantificar la precisión y la incertidumbre del mapeo, 4) cuantifica información horizontal y vertical. La descripción de sus pasos metodológicos fue ilustrada usando datos de pruebas de estudio de casos de Sudán del Norte y un requisito mínimo de datos de entrada, equipo y programas computacionales. La intención es presentar los pasos claramente, así como repetitivamente sea posible para permitir su implementación con los conjuntos de datos propios.

Movilización de recursos

El desarrollo de información y la actualización del estado de los suelos afectados por salinidad, requieren de muchos recursos y deben ser planeados adecuadamente. Este libro dedica los dos últimos capítulos a la movilización de recursos para estructurar la información nacional sobre suelos afectados por salinidad. Pone énfasis en las áreas clave donde deben concentrarse la movilización de recursos y en los pasos para crear recursos técnicos a fin de desarrollar un conjunto de datos armonizado para evaluar los suelos afectados por salinidad. También establece los pasos para enriquecer los mapas espaciales mediante el valor agregado, con el objeto de mejorar sus recursos de información.

SECCIÓN 1: INFORMACIÓN SOBRE LOS ANTECEDENTES

Esta sección contiene información sobre los antecedentes relacionados con la movilización global para proveer el mapeo de suelos afectados por salinidad. También contiene una breve revisión de la literatura sobre las características, distribución, indicadores y causas, el mapeo y métodos de clasificación de estos suelos. Esta sección fue diseñada para ilustrar la relación entre las características de estos suelos y los requisitos de entrada de datos para su mapeo y clasificación.



1. Introducción

Los suelos afectados por salinidad son suelos con altas concentraciones de sales solubles y/o iones de sodio. Las sales retienen el agua en el suelo con un alto potencial osmótico que limitan un fácil intercambio de agua y nutrientes con las raíces de las plantas. Consecuentemente, retardan el crecimiento y desarrollo de muchas plantas. Su distribución global se estimó inicialmente a finales de la década de los setenta en aproximadamente 1 000 millones de hectáreas (Szabolcs, 1979; Abrol *et al.*, 1988). Desde entonces han tenido actualizaciones inconsistentes de su distribución. La literatura reciente a escala global, utiliza datos que mayormente fueron recolectados a finales de los setenta y que describen una distribución global de las áreas afectadas en aproximadamente 1 000 millones de hectáreas (FAO/IIASA/ISRIC/ISS- CAS/JRC, 2008; Wicke *et al.*, 2011; Ivushkin *et al.*, 2019). Hace falta una nueva actualización para mejorar el conocimiento del estado y la distribución real de los suelos afectados por salinidad.

Los suelos afectados por salinidad tienen un importante impacto sobre el medio, el agua y la agricultura. Influyen negativamente sobre la productividad agrícola y la calidad del suelo y el agua superficial pero también tienen un potencial económico significativo si son manejados correctamente. (Wicke *et al.*, 2011). Es necesario un mejor conocimiento de su distribución, características y tendencias, para su manejo sustentable y su explotación económica. Una falta de actualización de información consistente en la actualidad está obstaculizando el desarrollo de políticas para sustentar el manejo y los usos alternativos de estos suelos. En 2018, La Asamblea Plenaria de la Alianza Mundial por el Suelo (GSP por sus siglas en inglés) deliberó sobre el vacío de información global respecto a los suelos afectados por salinidad y solicitó la movilización global para actualizar la información (GSP-FAO, 2018). Consiguientemente a la solicitud, la AMS llevó a cabo una encuesta entre los países miembros, como primer paso para lograr la comprensión del estado de los suelos afectados por salinidad e identificar las áreas en las que es necesario concentrarse al movilizar la actualización de la información. La encuesta reveló que más del 70% de los países tienen diversos aspectos en cuestión de suelos con problemas de salinidad y datos para mapear los suelos afectados por salinidad (Figura 1.1). Sin embargo, la mayoría de los conjuntos de datos son antiguos y requieren de actualización.

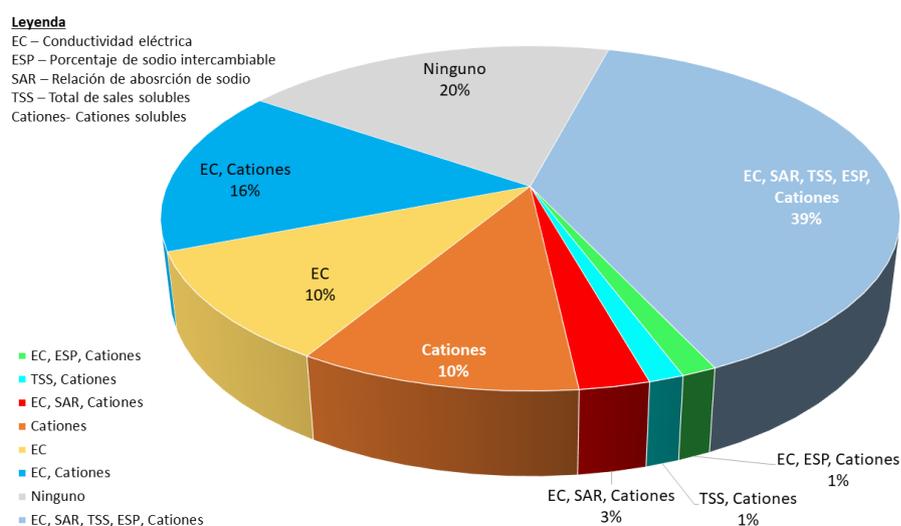


Figura 1.1: Resultados de la encuesta sobre disponibilidad de datos a nivel de países para el mapeo de suelos afectados por salinidad

En este manual, se utiliza el enfoque de movilización global de la AMS para desarrollar la actualización de la información de suelos afectados por salinidad. El enfoque es un proceso impulsado por los países (socios) quienes desarrollan y aportan información global de suelos, pero reservando el derecho de autor de los datos aportados (Figura 1.2). El proceso es una coordinación global por la AMS en colaboración con la Red Internacional de Institutos de Información de Suelos. (INSII) y los puntos focales (FP) en cada país. La totalidad del proceso es apoyada por documentos técnicos desarrollados por los organismos técnicos de la AMS como el Grupo de Trabajo de los Cuatro Pilares (P4WG) y el Panel Técnico Intergubernamental de Suelos (ITPS) (FAO e ITPS, 2018). Este Manual es parte de los documentos técnicos para apoyar el mapeo global de suelos afectados por salinidad (Figura 1.2).

Uno de los desafíos de la actualización de la información global usando en enfoque de la Figura 1.2, se refiere a las incertidumbres potenciales debidas a diferencias en conjuntos de datos y enfoques por países. Existen muchos métodos e indicadores en la literatura que pueden usar los países para el mapeo y clasificación de suelos afectados por salinidad. A menos que los datos por país y los métodos sean armonizados, las contribuciones pueden estar desorganizadas y producir un mapa global incierto de suelos afectados por salinidad. El presente manual está centrado en proveer las guías para armonizar datos de entrada y los métodos para mapear suelos afectados por salinidad. El libro pone énfasis en indicadores de suelos usados popularmente para diagnosticar los problemas de salinidad en los suelos (Figura 1.1) y en un protocolo de armonización para todos los países contribuyentes.

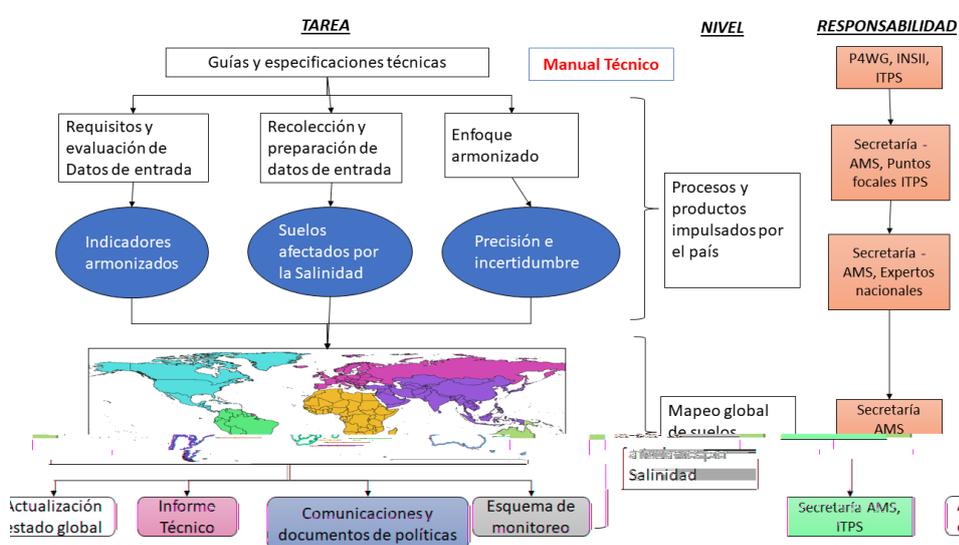


Figura 1.2: Esquema impulsado por los países para el mapeo global de suelos afectados por salinidad

1.1 Presentación

Este libro está organizado en tres secciones que abarcan siete capítulos. Las secciones están ordenadas en forma consecutiva, pero fueron diseñadas independientemente para beneficiar una lectura enfocada a quienes deseen ir directamente a cualquier sección. La Sección 1 contiene información sobre los antecedentes, la Sección 2 cubre los procedimientos metodológicos para el desarrollo de mapas espaciales a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad y la sección 3 describe los pasos para el intercambio de información y la movilización de recursos (Cuadro 1.1). La Sección 1 tiene tres capítulos que contienen una breve revisión de la literatura sobre las características

de los suelos afectados por salinidad y los métodos para su mapeo. La sección tiene por objeto proporcionar a los lectores conceptos básicos que vinculan las características de los suelos afectados por salinidad con los requisitos de datos para mapear y clasificar dichos suelos. También trata sobre los métodos de mapeo y la información existente sobre la distribución global de los suelos afectados por salinidad. La Sección 2 describe los pasos procedimentales para desarrollar mapas de suelos afectados por salinidad (Cuadro 1.1). La Sección 3 subraya los requisitos y procedimientos para el intercambio de información y la movilización de recursos para desarrollar o supervisar los suelos afectados por salinidad.

Cuadro 1.1: Presentación del libro

Áreas principales		Descripción		Capítulo del libro
Sección 1	Antecedentes	Introducción		Capítulo 1
		Características de los suelos afectados por salinidad		Capítulo 2
		Información global sobre los suelos afectados por salinidad		
		Métodos para el mapeo de suelos afectados por salinidad		Capítulo 3
Sección 2	Procedimientos sistemáticos para el mapeo de los suelos afectados por salinidad	Requisitos de evaluación	Evaluación de los datos de entrada	Capítulo 4
			Requisitos de los programas y equipos de computacionales	
		Paso 1: Preparación y armonización de datos		Capítulo 5
		Paso 2: Modelación espacial, validación y evaluación de la incertidumbre		
Paso 3: Clasificación y actualización de mapas				
Sección 3	Intercambio de información	Especificación de productos		Capítulo 6
		Requisitos del intercambio de información		
	Movilización de recursos	Movilización de recursos		Capítulo 7
		Programa de desarrollo de capacidades		

2 Características de los suelos afectados por salinidad

2.1 Génesis de los suelos afectados por salinidad

Los minerales responsables de los problemas de salinidad en el suelo se originan de diversas fuentes y se acumulan gradualmente para contribuir a la formación de suelos afectados por salinidad. Existen muchos modelos en la literatura para describir la acumulación de sales y la evolución de estos suelos. Pueden agruparse en dos amplias categorías (Figura 2.1): una de ellas involucra las interacciones climáticas con el suelo y el agua (Miller y Brierley, 2011) y la otra describe el depósito directo de las partículas de sal en el suelo (Abou-Baker y El-Dardiry, 2015; Daliakopoulos *et al.*, 2016).

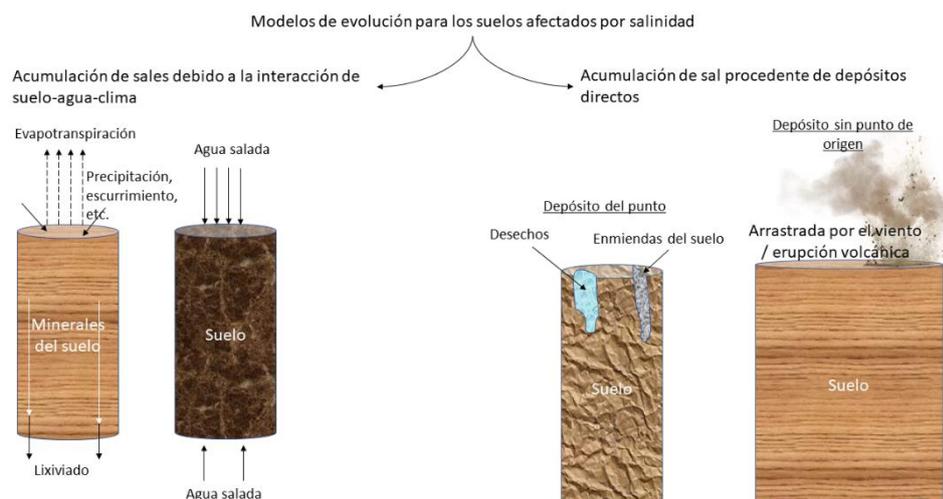


Figura 2.1: Vías genéticas para el desarrollo de suelos afectados por salinidad

2.1.1 Modelo de interacción suelos-agua-clima

Este modelo fue propuesto por primera vez por Gedroiz (Kelly and Brown, 1934) y describió la evolución de los suelos afectados por salinidad a lo largo de la trayectoria de cambios graduales en las características de las sales solubles. Postulaba que los suelos afectados por salinidad, se desarrollan cuando los minerales disueltos en el agua se acumulan y cambian su estado a medida que el agua se desplaza en el suelo. Las sales solubles son depositadas en el suelo cuando el agua se evapora y gradualmente se acumula con el paso del tiempo para formar los suelos salinos. Los suelos sódicos se desarrollan cuando las sales solubles son lixiviadas y/o cuando los cationes divalentes son precipitados fuera del complejo de intercambio seguidos por el correspondiente aumento en los iones de sodio. Si la lixiviación es insuficiente, los suelos afectados por salinidad continúan siendo predominantemente salinos (FAO, 1984). Se forman otros tipos de suelos sódicos (por ej. los suelos sódicos solidificados) cuando se desplazan los iones de sodio fuera del complejo de intercambio y son reemplazados por iones de hidrógeno (Miller y Pawluk, 1994). La evolución genética es común en zonas áridas y semiáridas donde la demanda evaporadora es alta durante ciertas épocas del año.

Los suelos afectados por salinidad también se desarrollan cuando se acumulan las sales debido a un contacto directo constante del suelo con agua salina. En este caso, el tipo de suelo afectado por salinidad es influido particularmente por las sales solubles dominantes del agua salada (Munn y Boehm, 1983). El modelo que describe esta trayectoria genética es común en zonas costeras y en zonas con capa freática salada y alta. El modelo también explica el desarrollo de ciertos tipos de suelos afectados por salinidad o salinidad específica de iones en zonas sujetas a irrigación con aguas de desecho (Jalali *et al.*, 2008).

2.1.2 Modelo del depósito directo

En este modelo, la acumulación de sal en el suelo es facilitada por la repetida deposición de partículas o soluciones de sal en el suelo. Existen dos tipos de este modelo: depósitos de la fuente de origen y depósitos sin fuente de origen (Figura 2.1). Las deposiciones de la fuente de origen introducen una acumulación de sal localizada que gradualmente se extiende hacia otras áreas o desciende por el perfil del suelo por acción de escurrimientos, lixiviado, labranza, etc. Los depósitos sin fuente de origen ocurren cuando partículas de sal arrastradas por el viento o por erupciones volcánicas se asientan en el suelo. Las capas alternas de los depósitos pueden ser enterradas y contribuir a la acumulación de sal en el perfil del suelo. Este modelo también explica el desarrollo de los suelos afectados por salinidad debido a incursiones geológico marinas (Schofield *et al.*, 2001).

2.2 Características

Los cationes dominantes en suelos afectados por salinidad son Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Potasio (K^+) y los aniones dominantes son Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Carbonato (CO_3^{2-}), Bicarbonato (HCO_3^-) and Nitratos (NO_3^-) (Richards, 1954). Los suelos afectados por salinidad con altas cantidades de iones de sodio son conocidos como suelos sódicos. El alto contenido de iones de sodio en estos suelos causa la dispersión de arcilla y materia orgánica que se asientan en las superficies de las partículas de suelo para darles un aspecto negro parduzco. A esta apariencia negruzca se debe el nombre de “suelos alcalinos negros” en referencia a los suelos sódicos (Richards, 1954). Cuando la arcilla dispersa se asienta entre las partículas del suelo, cubren los espacios matriciales y bloquean la infiltración del agua. Consecuentemente, los suelos sódicos tienden a permanecer anegados por extensos periodos después de la lluvia o irrigación. En algunos casos, el humus y la arcilla dispersos pueden ser lixiviados a través del perfil del suelo y reflejar la acumulación de arcilla y disminuir en textura en el perfil (Sparks, 2003; Krasilnikov *et al.*, 2013). Se ha usado un alto contenido de iones de sodio como indicador para identificar los suelos sódicos. De acuerdo con Richards (1954), el sodio ocupa más del 15% de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) del suelo en los suelos sódicos. Esta observación ha conducido al uso del Porcentaje de Sodio Intercambiable ($\text{PSI} \geq 15$) como indicador de diagnóstico para los suelos sódicos. Además, como los suelos sódicos son bajos en sales totales pero altos en sodio intercambiable, se ha demostrado que la proporción de iones de sodio a la suma de los aniones principales es más de 1 en los suelos sódicos. (Chhabra, 2005). La Figura 2.2 proporciona un ejemplo de las características de los suelos sódicos.

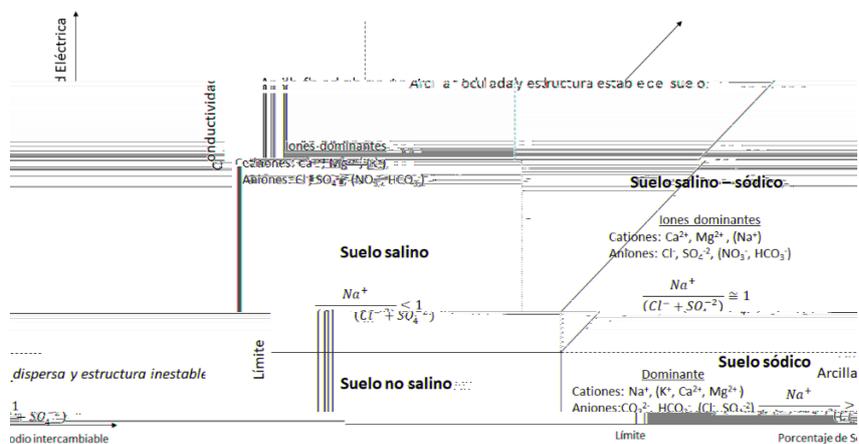


Figura 2.2: Ilustración gráfica de las características de los suelos afectados por salinidad

Los suelos afectados por salinidad con un alto contenido de sales solubles y un bajo contenido de iones de sodio en el complejo de intercambio, son identificados frecuentemente como suelos salinos. Debido a su bajo contenido de iones de sodio intercambiables, los suelos salinos tienen un bajo porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación entre iones de sodio y la suma de aniones principales es inferior a 1 (Figura 2.2). La preponderancia de los iones de cloruro y sulfato dan a los suelos salinos un aspecto blanco parduzco. Por lo tanto, algunas veces son referidos como suelos alcalinos blancos.

Los suelos salinos con proporciones significativas de iones de calcio tienen una buena estructura. Los iones de calcio tienen un alto poder de floculación en el suelo (Sumner and Naidu, 1998; Rangesamy and Marchuk, 2011). Por lo tanto, su presencia en el suelo tiende a promover la floculación de arcilla y la agregación de partículas. Algunos suelos salinos tienen yeso (sulfato de calcio) y cal (carbonato de calcio y magnesio) (Skarie *et al.*, 1987).

Los suelos afectados por salinidad con un alto contenido de iones solubles y una apreciable cantidad de iones de sodio son conocidos como suelos salinos-sódicos. Cuando las sales de sodio en estos suelos se hidrolizan, el pH del suelo aumenta y el suelo cambia y se convierte en suelo sódico. A este respecto, los suelos salinos-sódicos son referidos algunas veces como suelos salinos capaces de sufrir hidrólisis alcalina (Chhabra, 2005). Cuando las sales solubles siguen siendo altas en los suelos salinos-sódicos, las características de los suelos son como los suelos salinos. Cuando la concentración de las sales solubles es disminuida y las sales de sodio se hidrolizan, las características de los suelos cambian para quedar como la de los suelos sódicos.

Richard (1954) usó propiedades mensurables del suelo para cuantificar en mayor grado las características de los suelos afectados por salinidad (Cuadro 2.1). Estas características han sido aplicadas ampliamente para la clasificación general de los suelos afectados por salinidad (Chhabra, 2005; Zaman *et al.*, 2018).

Cuadro 2.1: Características de los suelos afectados por salinidad

Propiedad del suelo	Unidad / Símbolo	Tipo de suelo afectado por salinidad		
		Salino	Salino-sódico	Sódico
Conductividad eléctrica	EC _e (dS/m)	> 4	> 4	< 4
Porcentaje de sodio intercambiable	PSI	< 15	> 15	> 15
pH	-	< 8.5	< 8.5	> 8.5
Relación de absorción de sodio	SAR	< 13	> 13	> 13

2.3 Indicadores para evaluar los suelos afectados por salinidad

Los indicadores de suelos afectados por salinidad, son características que identifican el estado de aparición de los suelos. En este libro, se dividieron en tres categorías: propiedades cuantitativas del suelo, propiedades cualitativas de la superficie/el perfil del suelo y las características de la vegetación.

Los indicadores cuantitativos del suelo son propiedades mensurables del suelo relacionadas con los problemas de salinidad, como la concentración de iones solubles o iones de sodio intercambiable, pH

del suelo, etc. Los indicadores integrales del suelo que representan la concentración general de sales de suelo, son también usados con frecuencia. Estos indicadores incluyen la conductividad eléctrica (CE), total de sales solubles (TSS), total de sólidos disueltos (TSD), total de cationes solubles (TCS), resistividad, etc. (Abrol *et al.*, 1988; Zaman *et al.*, 2018). Diferentes niveles de estos indicadores han sido propuestos en la literatura para identificar los tres tipos de suelos afectados por salinidad. Al respecto, un trabajo inicial fue propuesto por Richard (1954) (Cuadro 2.1). Otros ajustes a los límites anteriores, fueron dados, por ejemplo, usando diferentes niveles de pH del suelo y la introducción de la relación de iones solubles (Cuadro 2.2). Los índices de reflectancia espectral del suelo son también nuevos indicadores en desarrollo y se espera que proveerán un límite de diagnóstico para diferentes tipos de suelos afectados por salinidad (Kalra and Joshi, 1994; Farifteh *et al.*, 2008).

Cuadro 2.2: Resumen de propiedades del suelo para diagnosticar suelos afectados por salinidad

Propiedad del suelo		Unidad/Símbolo	Límite			Referencia
			Salino	Salino-sódico	Sódico	
Conductividad eléctrica		CEe (dS/m)	> 4	> 4	< 4	Richards ¹ (Abrol ^{*1})
Sodio intercambiable		PSI	< 15	> 15	> 15	
pH		-	< 8.5 (<8.2)	< 8.5(<8.2)	> 8.5(>8.2)	
Relación de absorción de sodio		RAS	< 13	> 13	> 13	
Relación de iones de sodio	Sodio	$[Na^+/(Cl^-+SO_4^{2-})]$	<1	-	> 1	Choudhary ²
	Carbonato	$[CO_3^{2-} + HCO_3^{2-}]/(Cl^- + SO_4^{2-})$	< 1		> 1	Chhabra ³
Contenido de sal		TSS (mg/l)	< 2640	> 2640	< 2640	Horneck ⁴
		% Sal soluble	> 0.1	>0.1	<0.1	

¹Richards (1954); ^{*1}Abrol *et al.* (1988); ²Choudhary and Kharche (2018); ³Chhabra (2005); ⁴Horneck *et al.* (2007)

Las propiedades cualitativas del suelo son características observables asociadas a ciertas características de los suelos afectados por salinidad. Incluyen la presencia de costras, propiedades de diagnóstico cualitativo de horizontes de suelo nátrico/salino, estructuras de suelo columnar/prismática en condiciones secas con almohadillas cubiertas de películas negras parduzcas (WRB, 2014; Pankova, 2015). Estas propiedades del suelo se usan mayormente para identificar los suelos afectados por salinidad en el campo. Su evidencia global puede encontrarse en la mayoría de los mapas del suelo con delineaciones de suelos afectados por salinidad (Abuelgasim and Ammad, 2019). La vegetación tolerante a la sal es dominante en las zonas afectadas por salinidad. Su presencia se usa algunas veces como indicador de suelos afectados por salinidad (Bouchhima *et al.*, 2018). Una aplicación avanzada de este concepto se encuentra en los sensores remotos de la superficie terrestre. Muchas pruebas han revelado correlación entre los índices de los sensores remotos con los suelos afectados por salinidad. (Gorji *et al.*, 2019).

2.4 Causas de los problemas de salinidad en el suelo

Las causas de los problemas de salinidad en los suelos, pueden agruparse en dos: primarios y secundarios. Las causas primarias son las fuentes naturales de elementos minerales que contribuyen a los problemas de salinidad. Las causas secundarias son factores que exacerban los problemas de salinidad en los suelos. Están altamente asociados a la intervención humana en el medio natural. La Cuadro 2.3 contiene un resumen de estas causas de problemas de salinidad de suelos.

Cuadro 2.3: Causas de problemas de salinidad en los suelos

Causas primarias	Causas secundarias (inducidos por el hombre)
Materiales precursores salinos	Aplicación de irrigación
Clima (clima árido y semiárido)	Aplicación inapropiada de fertilizantes
Agua subterránea	Eliminación inadecuada de residuos
Agua marina/salobre	Uso inadecuado de aguas residuales
Partículas de sal arrastradas por el viento	Mal uso de enmiendas del suelo
Inundaciones/escurrimientos de zonas afectadas por salinidad	Manejo inadecuado de suelo-agua y cambio en el uso de la tierra

2.4.1 Causas primarias

El material parental salino es una fuente primaria de problemas de salinidad en los suelos. Este libera gradualmente los componentes minerales del suelo durante la erosión química, que reacciona con el aire y el agua, para producir las sales solubles responsables de los problemas de salinidad. Estas sales son lateralmente arrastradas por el agua en movimiento hacia otros sitios, o verticalmente mediante capilaridad en forma ascendente en el perfil del suelo (Fanning and Fanning, 1989). Procesos adicionales como la lixiviación, pueden convertir las condiciones salinas para producir otros tipos de suelos afectados por salinidad.

El clima es otra causa para la formación de suelos afectados por salinidad. En los climas árido y semiárido, la demanda de evaporación seca el agua que deja los cristales de sal en la superficie del suelo. Además, la baja precipitación en estas zonas climáticas no facilita totalmente la lixiviación de los suelos en el perfil del suelo. Los efectos combinados de la demanda de evaporación y la lixiviación insuficiente, originan la acumulación de sal en el suelo y contribuyen al desarrollo de suelos afectados por salinidad. (Schaetzl and Anderson, 2005).

El agua subterránea es otra causa que influye sobre el desarrollo de suelos afectados por salinidad. El agua subterránea salada que se eleva a través del perfil de suelo por capilaridad, aporta las sales que permanecen en el suelo cuando el agua se evapora (Rengasamy, 2006). En ciertas áreas donde la capa de agua subterránea se encuentra con la superficie de la tierra, ésta es descargada en la superficie del suelo en forma de manantiales y géiseres. El agua salada descargada gradualmente genera sales en el suelo y contribuye al desarrollo de problemas de salinidad en el suelo. El agua subterránea también contribuye a problemas de salinidad cuando su agua salada es usada para la irrigación.

Otras causas primarias de problemas de salinidad de suelos son la interacción del agua marina/salobre, los depósitos de sal arrastrada por el viento y escurrimiento de agua. El agua marina/salobre contiene la sal que permanece en el suelo después de la interacción con el suelo en el litoral. También puede influir los problemas de salinidad del suelo cuando el agua se usa para irrigación o si se usa en cualquier otro sitio (como por ejemplo en aguas residuales) pero luego es descargada en el suelo. La interacción de las partículas de sal arrastradas por el viento introduce la sal en los suelos. Los depósitos constantes de partículas de sal arrastradas por el viento, pueden acumular las sales y causar procesos de afectación por salinidad (Yang *et al.*, 2018). El escurrimiento recurrente de aguas de inundaciones de zonas afectadas por salinidad, también pueden aportar sal que se puede acumular con el tiempo y contribuir a procesos de afectación por salinidad (Krasilnikov *et al.*, 2013).

2.4.2 Causas secundarias

La irrigación es la causa secundaria más citada de problemas de salinidad en el suelo. El agua de riego puede inducir problemas por salinidad cuando el agua salada se usa para irrigación o cuando el agua de riego causa una lixiviación inadecuada de sales del suelo. El agua de riego también puede recargar el agua subterránea y hacer que se eleve e introduzca gradualmente las sales de dicha agua en el suelo (Rietz and Haynes, 2003; Pulido-Bosch *et al.*, 2018). El agua de riego fertilizada también puede introducir sales al suelo que, con una aplicación constante, gradualmente se acumulan y contribuyen al desarrollo de suelos afectados por salinidad.

Además de la irrigación, los desechos y las aguas residuales son también importantes causas secundarias de problemas de salinidad en el suelo. El manejo incorrecto de aguas y desechos residuales pueden contribuir a procesos de salinidad (Piotr, 2008). La constante disposición de material de desecho se mezcla directamente con el suelo o bien, contribuye a aportar lixiviados salinos al suelo los cuales se acumulan gradualmente con el tiempo y conducen a la formación de suelos afectados por salinidad. El uso de aguas residuales en la irrigación es también otra forma de inducir el problema de salinidad en el suelo. Las aguas residuales contienen elementos minerales que pueden causar toxicidad específica de los iones y salinidad en el suelo (Muyen *et al.*, 2011; Abd-Elwahed, 2018).

El cambio en el uso/cobertura de la tierra, es también una importante causa secundaria de acumulación de sal en el suelo. La alteración del tipo de vegetación en ciertos ecosistemas potencialmente cambia las características de uso del agua por las plantas y la evapotranspiración, con consecuencias como la resequedad del suelo y la acumulación de sal. El cambio de los tipos de vegetación también puede alterar el equilibrio del manto freático y eventualmente contribuir a la afectación de suelos por salinidad inducidos por aguas subterráneas (Rengasamy, 2006). En los medios áridos y semiáridos, la cubierta de vegetación decreciente también ha sido vinculada a una creciente exposición de los suelos al riesgo de salinización (Perri *et al.*, 2018). Otras fuentes secundarias de problemas de salinidad en el suelo incluyen la aplicación inapropiada de fertilizantes, el drenaje inapropiado y el mal uso de enmiendas del suelo.

2.5 Clasificación de los suelos afectados por salinidad

Los suelos afectados por salinidad son clasificados de acuerdo con los tipos de sal y la intensidad de los problemas de salinidad. La clasificación de los tipos de suelos afectados por salinidad fue propuesta por primera vez por Richard (1954) con base en la conductividad eléctrica (CE), el pH y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) o la relación de absorción de sodio (RAS). De acuerdo con este esquema, hay tres tipos de suelos afectados por salinidad (Cuadro 2.2):

- Salinos: suelos con exceso de sales solubles, en los cuales $CE > 4$ dS/m, $pH < 8.5$, y $PSI < 15$ (or $RAS < 13$)
- Sódicos: suelos con exceso de iones de sodio intercambiable, en los cuales $CE < 4$ dS/m, $pH > 8.5$, y $PSI > 15$ ($RAS > 13$)
- Suelos salinos-sódicos: suelos con alto contenido de sales solubles y una apreciable cantidad de iones de sodio capaces de hidrólisis alcalina. Los suelos tienen $CE > 4$ dS/m, $pH < 8.5$, y $PSI > 15$ (or $RAS > 13$)

La literatura ha hecho muchas propuestas sobre los límites dados por Richards (1954). Abrol *et al.* (1988) propusieron un límite de pH de 8.2 en lugar de 8.5 para las tres clases de suelos afectados por salinidad. Este valor de pH también se consideró satisfactorio en los suelos de India (Choudhary y Kharche, 2018). Szabolcs (1987) también dio una clasificación adicional de suelos salinos como: Suelos yesíferos, suelos salinos debido al cloruro de calcio, suelos salinos debido a sales de magnesio solubles, suelos de sulfato ácido con hierro y sulfatos de aluminio y suelos potencialmente salinos.

La clasificación de la intensidad de los problemas de salinidad en el suelo se expresa comúnmente usando niveles de conductividad eléctrica e iones de sodio intercambiable y con base al peso (Richard, 1954; Abrol *et al.*, 1988; FAO, 2006; Academia China de Ciencias, 2001). Ejemplos de estos niveles aparecen en la Cuadro 2.4.

Cuadro 2.4: Identificación de la intensidad de problemas de salinidad en el suelo

Salinidad (CE _e dS/m)			Sodicidad (PSI)		
Intensidad	FAO (2008)	Richard (1954)	Intensidad	Abrol <i>et al.</i> (1988)	Amrhein (1996)
Ninguna	< 0.75	0 - 2	Ninguna	< 15	< 6
Ligera	0.75 - 2	2 - 4	Ligera	15 - 30	6 - 10
Moderada	2 - 4	4 - 8	Moderada	30 - 50	10 - 15
Fuerte	4 - 8	8 - 16	Alta/Fuerte	50 - 70	15 - 25
Muy Fuerte	8 - 15	> 16	Extrema/ Muy Fuerte	> 70	> 25
Extrema	> 15				
Esquema de clasificación chino (peso de la sal por unidad Kg de suelo) (Academia China de Ciencias, 2001)					
Costera, semi-húmeda, semiárida y árida			Regiones semidesérticas y desérticas		
Ninguna	< 1.0 g/Kg		Ninguna	< 2.0 g/Kg	
Ligera	1 - 2 g/Kg		Ligera	2 - 3 g/Kg	
Moderada	2 - 4 g/Kg		Moderada	3 - 5 g/Kg	
Severa	4 - 6 g/Kg		Severa	5 - 10 g/Kg	
Solonchak	*6 g/Kg		Solonchak	> 10 g/Kg	

Además de la clasificación en la Cuadro 2.4, existen algunos otros parámetros agrupados que se utilizan para evaluar los problemas de salinidad. Los parámetros incluyen el Total de Sólidos Disueltos (TSD en mg/L), Total de Cationes Solubles (TCS) y Total de Aniones Solubles (TSA) en mol_(c)/L. Existen en la literatura aproximaciones para convertir estas medidas gravimétricas en CE. Por ejemplo, el Total de Sólidos Disueltos puede ser aproximado al producto de la multiplicación de la CE (dos/m) por 800 para suelos hipersalinos y 640 para otros suelos salinos. Estas son guías aproximadas ya que no existen relaciones exactas. La clasificación de la intensidad de la salinidad, usando mediciones gravimétricas, fue proporcionada por Vargas *et al.* (2018) (Cuadro 2.5).

Los esquemas de clasificación de la Cuadro 2.4 y la Cuadro 2.5 muestran que existen muchas alternativas para identificar diferentes niveles de problemas de salinidad. Estas pueden ser utilizadas a escala nacional en los países, en los que se usan popularmente.

Cuadro 2.5: Clasificación de la intensidad de la salinidad usando mediciones gravimétricas

Clasificación de salinidad (peso de la sal por kg de suelo) dependiendo de la química de las sales (Vargas <i>et al.</i> , 2018)			
Con predominancia de cloruros $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} > 1$, pH < 8.5		Cloruro de sulfato $0.5 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1$, pH < 8.5	
Ninguna	< 1 g/kg	Ninguna	< 2 g/kg
Ligera	1 – 2 g/kg	Ligera	2 – 4 g/kg
Moderada	2 – 4 g/kg	Moderada	4 – 6 g/kg
Fuerte	4 – 8 g/kg	Fuerte	6 – 10 g/kg
Muy fuerte	>8 g/kg	Muy fuerte	>10 g/kg
Con predominancia de sulfatos $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 0.5$, pH < 8.5		Soda salina $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^-$, $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$, pH > 8.5	
Ninguna	< 3 g/kg	Ninguna	< 1 g/kg
Ligera	3 – 6 g/kg	Ligera	1 – 2 g/kg
Moderada	6 – 8 g/kg	Moderada	2 – 3 g/kg
Fuerte	8 – 15 g/kg	Fuerte	3 – 5 g/kg
Muy fuerte	>15 g/kg	Muy fuerte	>5 g/kg

2.6 Distribución global de suelos afectados por salinidad

Los suelos afectados por salinidad se encuentran en todos los continentes en proporciones de variabilidad espacial. La literatura abunda en intentos de cuantificar la distribución global de estos suelos. Massoud (1976) y Szabolcs (1979) desarrollaron el primer mapa mundial de suelos afectados por salinidad usando el Mapa Mundial de Suelos de FAO/UNESCO. Estimaron las zonas afectadas por salinidad en aproximadamente 0,9 mil millones de hectáreas (Cuadro 2.6). En el año 2004, Squires y Glenn (2004) publicaron nuevas estimaciones de la distribución global y ubicaron la cobertura de áreas afectadas en 1 029 mil millones de hectáreas. Esta estimación clasificó un 40% de las áreas globales afectadas como salinas y 60% como suelos sódicos.

Cuadro 2.6: Estimaciones globales de áreas afectadas por salinidad

Región	Massoud (1974) y Szabolcs (1976)	Squires y Glenn (2004)	Wicke <i>et al.</i> (2011)	FAO-ITPS- GSP (2015)
Norteamérica	15.755	15.8	84	15.8
Centroamérica	1.965	2	5	2
Sudamérica	129.163	129.2	84	129.3
Europa (y ex URSS)	50.747	-	129	30
África	80.438	209.6	322	209.6
Norte y centro de Asia	211.448	211.4	274	211.7
Sur de Asia	85.108	84	52	84.1
Sudeste de Asia	19.983	20	6	20
Pacífico	357.568	357.5	169	357.6
Total, Global (Millones de Has.)	952.175	1029.5	1125	1060.1

En 2011, Wicke *et al.* (2011) estimaron la distribución global de los tipos e intensidad de los suelos afectados por salinidad con base en la Base de Datos Mundial Armonizada del Suelo (FAO *et al.*, 2008). Su estimación reporta que la superficie afectada por salinidad cubría 1 100 millones de hectáreas, de las cuales el 60% de la superficie fueron salinas, 26% sódicas y 14% salinas-sódicas (Figura 2.3). Es importante hacer notar que las proporciones de las áreas afectadas por tipos de afectación fue dado por Wicke *et al.* (2011) fueron proporciones contrarias (invertidas) a las presentadas por Squires y Glenn (2004). En 2018, el Centro Común de Investigación (JRC por sus siglas en inglés) desarrollaron un mapa global de salinización que mostró que las áreas afectadas cubrían 1 100 millones de hectáreas (Cherlet *et al.*, 2018).

Recientemente, Ivushkin *et al.* (2019), publicaron otra estimación global de suelos afectados por salinidad. Este estudio utilizó una combinación de sensores remotos, datos del suelo del Sistema de Información Mundial de Suelo (WoSIS, <https://www.isric.org/explore/wosis>) y su modelación.

Su estimación también sitúa la distribución global de suelos afectados por salinidad en 1 000 millones de hectáreas (Figura 2.3).

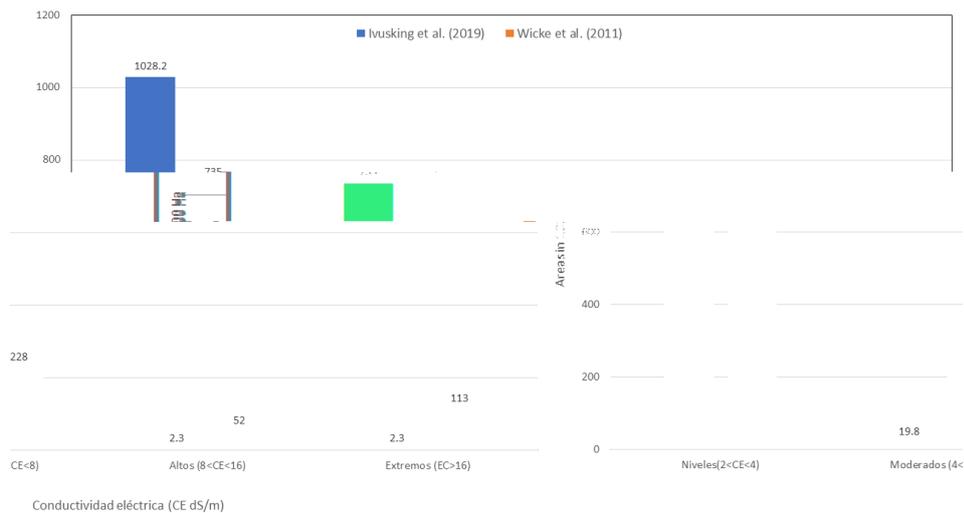


Figura 2.3: Proporción de la gravedad de superficies afectadas por salinidad en el mundo

De manera interesante, todas estas estimaciones globales han permanecido casi iguales en aproximadamente 1 000 millones de hectáreas. Las posibles explicaciones son que: 1) las áreas afectadas por salinidad generalmente no han cambiado con el paso de los años o 2) la entrada de datos para estimar las superficies no ha cambiado, o 3) los métodos de estimación han sido inconsistentes. Existe la necesidad de nuevas actualizaciones para mejorar la información global del estado de los suelos afectados por salinidad.

Aunque todos los continentes tienen suelos afectados por salinidad, las tierras áridas y semiáridas (ASAL por sus siglas en inglés) parecen tener una proporción más alta. Esto se atribuye a las precipitaciones pluviales predominantemente bajas e irregulares y a la alta demanda evaporativa en las tierras áridas y semiáridas que en conjunto se combinan para acumular sales en/sobre el suelo (Sheng *et al.*, 2010; Pankova y Konyushkova, 2013).

Aparte de las tierras áridas y semiáridas, los problemas de las sales de los litorales también son de importancia significativa. Los problemas de las sales de los litorales se deben en gran medida a la intrusión del agua salina. Li *et al.* (2014) dieron una imagen global de los litorales del mundo afectados por salinidad usando información secundaria de la literatura (Figura 2.4). Aparte de este trabajo preliminar, no existen datos claros ni representación alguna de la extensión y gravedad de los litorales del mundo afectados por salinidad.

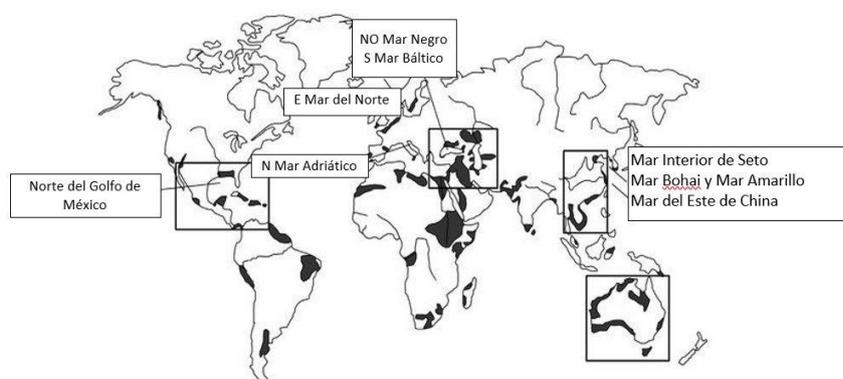


Figura 2.4: Distribución global de los litorales y valles de los ríos afectados por salinidad (fuente: Li *et al.*, 2014)

3 Métodos para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Los mapas de suelos afectados por salinidad contienen información espacial de la distribución de los tipos e intensidad de los problemas de salinidad en los suelos. Estos mapas son desarrollados considerando las causas, indicadores, prevalencia de los suelos afectados por salinidad en el paisaje y las herramientas y recursos para el mapeo. (Figura 3.1). Los datos de entrada en las causas e indicadores proporcionan evidencia sobre la aparición de problemas de salinidad en el suelo. Estos influyen el tipo de herramientas cartográficas para la extracción de la información y representación de los mapas finales. Algunas de las herramientas cartográficas comúnmente usadas incluyen los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la modelación estadística, los estereoscopios, etc. Además de los datos de entrada y las herramientas de mapeo, los métodos de mapeo también son influidos por los requisitos de recursos, como son el conocimiento experto, facilidades computacionales y el financiamiento.

Método de mapeo

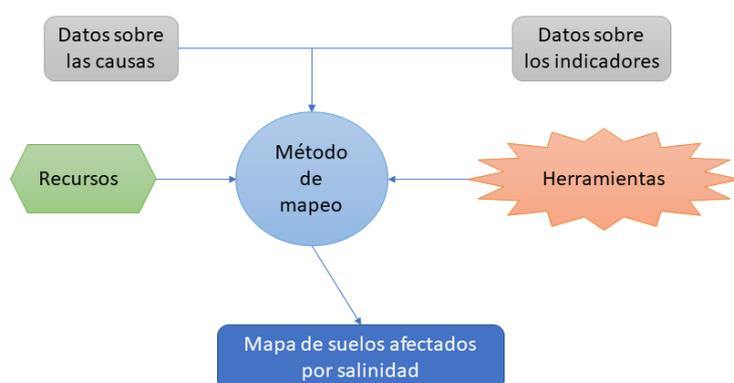


Figura 3.1: Marco para desarrollar métodos de mapeo suelos afectados por salinidad

Las principales categorías de los métodos de mapeo de suelos afectados por salinidad son:

- i. Métodos basados en mapas del suelo y opiniones de expertos
- ii. Aplicaciones de sensores remotos
- iii. Modelación de indicadores de problemas de salinidad del suelo

Este capítulo ahondará en el potencial y las limitaciones de estas categorías de métodos de mapeo con relación a su: 1) contribución a la construcción de información global integral de los suelos afectados por salinidad, 2) habilidad para cuantificar la precisión de mapeo y la incertidumbre y 3) la flexibilidad para actualizar información periódica.

3.1 Métodos basados en mapas del suelo y opiniones de expertos

Los mapas del suelo han sido utilizados tradicionalmente para identificar los suelos afectados por salinidad en muchos territorios del mundo. Su aplicación descansa en la identificación y verificación, en los mapas de suelo, de las zonas que tienen designaciones relacionadas con suelos afectados por

salinidad. Un trabajo inicial en la evaluación global de suelos afectados por salinidad usando este enfoque fue publicado por Szabolcs (1979). La publicación utilizó el mapa mundial de suelos de la FAO-UNESCO, en el que se clasificaron los suelos afectados por salinidad como suelos salinos (solonchak y fases salinas), suelos alcalinos (solonetz y fases alcalinas) y suelos potencialmente afectados por salinidad.

Los suelos potencialmente afectados por salinidad, fueron suelos de zonas que no estaban afectados por salinidad en el momento (o afectados por salinidad en un grado muy bajo) pero que podrían verse afectados fácilmente a causa de las actividades humanas. El enfoque dado por Szabolcs (1979) también utilizó opiniones de expertos para identificar las zonas que no estuvieron bien representadas en el mapa mundial de suelo de la FAO-UNESCO. La Figura 3.2 es el ejemplo producido con base en este enfoque de mapeo.

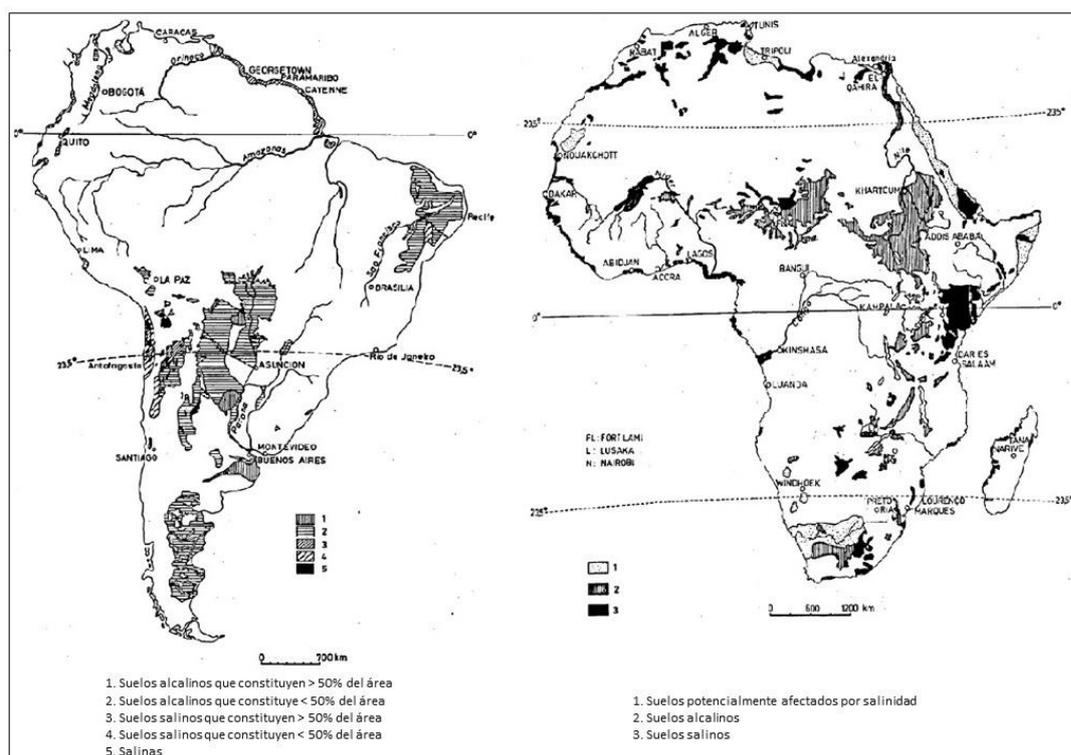


Figura 3.2: Ejemplo de mapa de suelos afectados por salinidad (adaptado de Szabolcs, 1979)

Aplicaciones de mapas de suelo, para cuantificar áreas de suelos afectados por salinidad, ha sido empleada desde entonces en varias partes del mundo. Como ejemplos se incluyen el mapeo de suelos salinos y sódicos en la Unión Europea (Toth *et al.*, 2008), suelos afectados por salinidad en la parte europea de Rusia (Khitrov *et al.*, 2009), evaluación digital de suelos afectados por salinidad en India (Mandal *et al.*, 2011), entre otros.

La mayoría de las aplicaciones de los mapas de suelo, usan la secuencia de los procesos de identificación, verificación y cuantificación para producir la información espacial de los suelos afectados por salinidad. El proceso de identificación apunta hacia la localización de unidades tipológicas/ de mapeo en el mapa de suelos, con designaciones clasificadas de suelos afectados por salinidad. Las unidades son posteriormente verificadas mediante opiniones de expertos o muestreos de campo y pruebas confirmatorias. Las áreas confirmadas son finalmente delineadas y su extensión de aérea cuantificada. Esta secuencia puede ir precedida por el desarrollo de un nuevo mapa de suelos o la digitalización de viejos mapas cuando sea necesario (Khitrov *et al.*, 2009; Mandal *et al.*, 2011).

Aunque la aplicación de mapas de suelos, para identificar los suelos afectados por salinidad es popular en algunos países, carece de falta de precisión y cuantificación de incertidumbre de los mapas finales. El enfoque también produce mapas de suelos afectados por salinidad con límites rígidos que presumiblemente no son frecuentes en la mayoría de los paisajes. Otra información sobre suelos asociada a suelos afectados por salinidad como la distribución de electroconductividad, pH. Otra información del suelo asociada con los suelos afectados por salinidad, como la distribución de la conductividad eléctrica, el pH, los iones solubles, etc., pueden no existir o proporcionarse de forma imprecisa.

3.2 Uso de la aplicación de sensores remotos

La aplicación de sensores remotos ha sido usada en la agricultura y el medio ambiente durante muchos años. La tecnología brinda información espacial y temporal sobre la cobertura de la tierra, las características de la cobertura del suelo, el clima y las condiciones atmosféricas, que son de importancia en el manejo de los recursos de suelo y agricultura. Se basa en la interacción de las radiaciones electromagnéticas con el suelo y la vegetación, para producir firmas características en las radiaciones reflejadas. Las firmas reflejadas son posteriormente modeladas para extraer las características del suelo y la vegetación. Dos amplias categorías de radiaciones son discernibles con esta tecnología: las radiaciones del sol (también llamadas radiaciones pasivas) o radiaciones del sensor (radiación activa). También se clasifican de acuerdo con el tipo de sensores que detectan las radiaciones: 1) sensores proximales que son colocados en la superficie del suelo o a unos cuantos metros de la superficie del suelo; 2) cámaras sub-atmósfericas, que son transportadas por aviones de baja altura o vehículos aéreos; y 3) satélites (Figura 3.3).

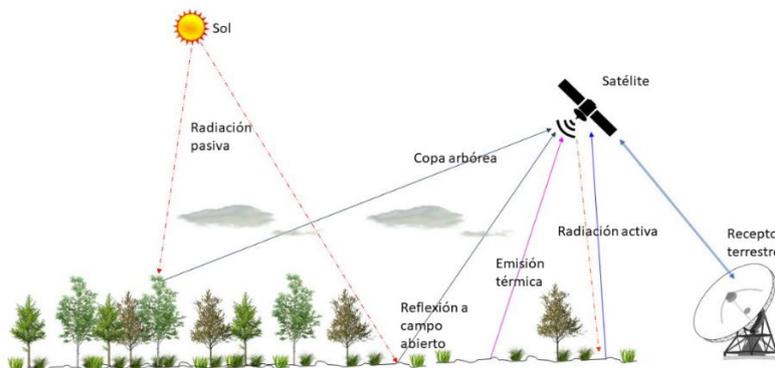


Figura 3.3: Esquema para detectar la superficie terrestre con sensores remotos

Las aplicaciones de sensores remotos en el mapeo de suelos afectados por salinidad apuntan a la evidencia de problemas de salinidad en la superficie terrestre. Entre los sensores proximales utilizados con frecuencia, están la Inducción Electromagnética (EMI por sus siglas en inglés), el sondeo geofísico y los reflectómetros. Estos sensores se usan mayormente para determinar una conductividad eléctrica masiva del suelo (Lesch *et al.*, 1992). Los sensores de baja altura como los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV por sus siglas en inglés) también están ganando fuerza en el mapeo de suelos afectados por salinidad (Hu *et al.*, 2019; Ivusking *et al.*, 2019). Hu *et al.* (2019) probaron una cámara hiperespectral montada en un UAV y EMI en el mapeo de salinidad y concluyeron que el UAV es el método más prometedor para la identificación con alta resolución de las características de salinidad de la superficie del suelo.

Los sensores remotos satelitales son los de uso más popular. Abarcan amplias superficies es una solaescena que resulta económica para el mapeo de grandes superficies. Además, la mayoría de las imágenes satelitales son cada vez más libres de descargables y ganan amplias aplicaciones debido a modelos globalmente probados y algoritmos de procesamiento libres. Sus aplicaciones van desde la interpretación de imágenes compuestas hasta la modelación de relaciones entre índices de reflectancia de imágenes e indicadores de problemas de salinidad en suelos (Matternicht and Zinc, 2003; Gorji *et al.*, 2019). Las imágenes de sensores remotos ampliamente usadas para cartografiar recursos del suelo son: Landsat, Sentinel y el Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) (Cuadro 3.1). Estas imágenes se encuentran disponibles globalmente y pueden ser descargadas en forma gratuita.

Cuadro 3.1: Características de las imágenes de sensores remotos usadas comúnmente para suelos afectados por salinidad

Categoría de la banda	Bandas	Landsat (OLI)	Sentinel-2	MODIS (MOD09A1)
Visible	Blue	B2*	B2	B3
	Green	B3	B3	B4
	Red	B4	B4	B1
Infrarrojo	IR	B5	B8	B2
Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	SWIR1	B6	B11	B6
Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	SWIR2	B7	B12	B7
Resolución espacial (tamaño de pixel)		30 m	10 m(B2-B8) and 20m (B11-B12)	500 m

* B es la notación para la banda de imagen satelital

Constituyen ejemplos de índices de imágenes usadas popularmente en el mapeo de suelos afectados por salinidad: el Índice de Salinidad Normalizado (NSI por sus siglas en inglés), el Índice de Salinidad (SI por sus siglas en inglés), el índice de vegetación ajustado del suelo (SAVI por sus siglas en inglés), el índice de salinidad del suelo-vegetal (VSSI por sus siglas en inglés), el índice de salinidad de diferencia normalizada (NDSI por sus siglas en inglés), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), la relación de salinidad (SR) el índice de respuesta de la copa arbórea (SCRI por sus siglas en inglés) y el índice de brillantez (BI por sus siglas en inglés) (Gorji *et al.*, 2019). Los ejemplos están resumidos en la Cuadro 3.2. del suelo. Estos índices han sido utilizados ampliamente de manera individual o combinadas, para modelar las características de salinidad de la superficie. La aplicación de sensores remotos para el mapeo de suelos afectados por salinidad es acelerada por la disponibilidad de imágenes y programas de procesamiento computacional. Consecuentemente, el método es el más rápido de todos los métodos para cartografiar suelo afectados por salinidad. Su aplicación en grandes superficies a menudo produce mapas consistentes entre los límites de los países que minimiza la necesidad de armonización.

Cuadro 3.2: Ejemplos de combinaciones bandas de imágenes para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Bandas de imágenes *	Relación de la banda		Observaciones
SWIR1(B6), NIR(B5), SWIR2(B7)	NSI	$NSI = \frac{B6 - B7}{B6 - B5}$	Salino: NSI > 1; No salino: NSI < 1
Verde(B3), Roja (B4)	SI1	$SI1 = \sqrt{(B4 * B3)}$	
Azul (B2), Roja (B4)	SI2	$SI2 = \sqrt{(B4 * B2)}$	
Verde (B3), Roja (B4)	SI3	$SI3 = \sqrt{(B4^2 * B3^2)}$	
SWIR1(B6), Infrarrojo Cercano (B5),	SI4	$SI4 = \frac{B5 * B6 - B6^2}{B5}$	
Azul (B2), Roja (B4)	SI5	SI5 = B2/B4	
Roja (B4), NIR(B5), Verde(B3)	SI6	SI6=B4*B5/B3	
Infrarrojo Cercano(B5), Roja(B4)	SAVI	$SAVI = \frac{B5 - B4}{(B5 + B4 + 0.5) * 1.5}$	Relación Exponencial con CE _{SE}
Verde(B3), Red(B4), NIR(B5)	VSSI	Indice de Vegetación Ajustado del Suelo) $VSSI = 2 * B3 - 5(B4 + B5)$	Relación Exponencial con CE _{SE}
Roja (B4), NIR(B5)	NDSI	Indice de Salinidad de Diferencia Normalizada $NDSI = \frac{B4 - B5}{B4 + B5}$	Relación Exponencial con CE _{SE}
NIR(B5), Roja (B4)	NDVI	Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada $NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$	Relación Exponencial con CE _{SE}
Azul(B2), Verde (B3), Roja (B4),	SR	$SR = \frac{B3 - B4}{B2 + B4}$	
Infrarrojo cercano (B5), Roja (B4), Verde (B3), Azul (B2)	SCRI	Indice de Respuesta de la Copa Arbórea $CRSI = \sqrt{\frac{B5 * B4 - B3 * B2}{B5 * B3 + B3 * B2}}$	Relación de Poder con CE _{SE}
Roja (B4), Verde (B3), Infrarrojo Cercano (B5)	BI	Indice de Brillantez $BI = \sqrt{B3^2 + B4^2 + B5^2}$	

* La notación para bandas usadas son las Landsat 8 OLI (Generador de Imágenes Terrestres en Operación)

Además, su aplicación de series de tiempo, es potencialmente útil en el monitoreo de los cambios en el estado de los suelos afectados por salinidad. Una aplicación eciente a un nivel global, fue demostrada por Ivushkin *et al.* (2019) (Figura 3.4).

A pesar del potencial de la aplicación de sensores remotos, en enfoque es limitado para detectar problemas de salinidad en el perfil del suelo. La mayoría de las imágenes de sensores remotos para el mapeo de grandes superficies, no penetran más allá de unas cuantas pulgadas en el perfil del suelo. Estos modelos de calibración pueden dar lugar a relaciones espurias sin importancia en la dinámica salina en el suelo (Matternicht and Zinc, 2003; Gorji *et al.*, 2019). Se han hecho algunos intentos por superar estas limitaciones. La modelación combinada con otros conjuntos de datos espaciales como el clima, los mapas de suelos y la cubierta vegetal, son ejemplos enfocados en mejoras en el desempeño del enfoque (Scudiero *et al.*, 2019).



Figura 3.4: Mapa global de salinidad del suelo usando aplicaciones de sensores remotos (fuente: Ivushkin *et al.*, 2019)

3.3 Métodos basados en indicadores de salinidad de suelos

Los indicadores del suelo proporcionan evidencia de la presencia de sales en el suelo y la incidencia de suelos afectados por salinidad. Se usan tradicionalmente, en la mayoría de los esquemas de clasificación del suelo, para identificar los perfiles y tipos de suelo pertenecientes al grupo de suelos afectados por salinidad (Soil Survey Staff, 1999; IUSS Working Group WRB, 2015; Craig and Hempel, 2017). Los indicadores de los suelos afectados por salinidad también se usan para cuantificar la intensidad de problemas de salinidad en el suelo (Cuadro 2.4). También se usan para calibrar otros métodos para el mapeo de los suelos afectados por salinidad. Por tanto, juegan un papel central en evaluar los suelos afectados por salinidad y consecuentemente deben sentar las bases para desarrollar información sobre la naturaleza de los suelos afectados por salinidad.

Existen tres tipos de aplicaciones en la literatura para el mapeo suelos afectados por salinidad usando los indicadores de suelos: 1) mapeo de los atributos del suelo y clasificación de los mapas de salida, 2) mapeo de las clases derivadas de los atributos del suelo y 3) clasificando mapas calibrados de inducción electromagnética o imágenes de sensores remotos (Figura 3.5) (Triantafilis *et al.*, 2001; Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2019).

Las aplicaciones que usan modelos calibrados con inducción electromagnética (EMI) se usan popularmente en el mapeo de la salinidad del suelo. En este caso, los datos de EMI son calibrados con electroconductividad (CE) en un conjunto selecto de muestras y los resultados utilizados para cartografiar la salinidad del suelo (Lesch *et al.*, 1992). Farzadian *et al.* (2019) probaron recientemente la eficacia de los modelos locales y regionales de este método para mejorar su amplia adopción. Los métodos de mapeo que involucran la extrapolación de clases pre-clasificadas de suelos afectados por salinidad también se encuentran disponibles en la literatura. Estos métodos se asemejan al método basado en mapas de suelos, con la excepción de que los datos de entrada son atributos del suelo georreferenciados. La clasificación de atributos del suelo interpolados espacialmente, es otra forma

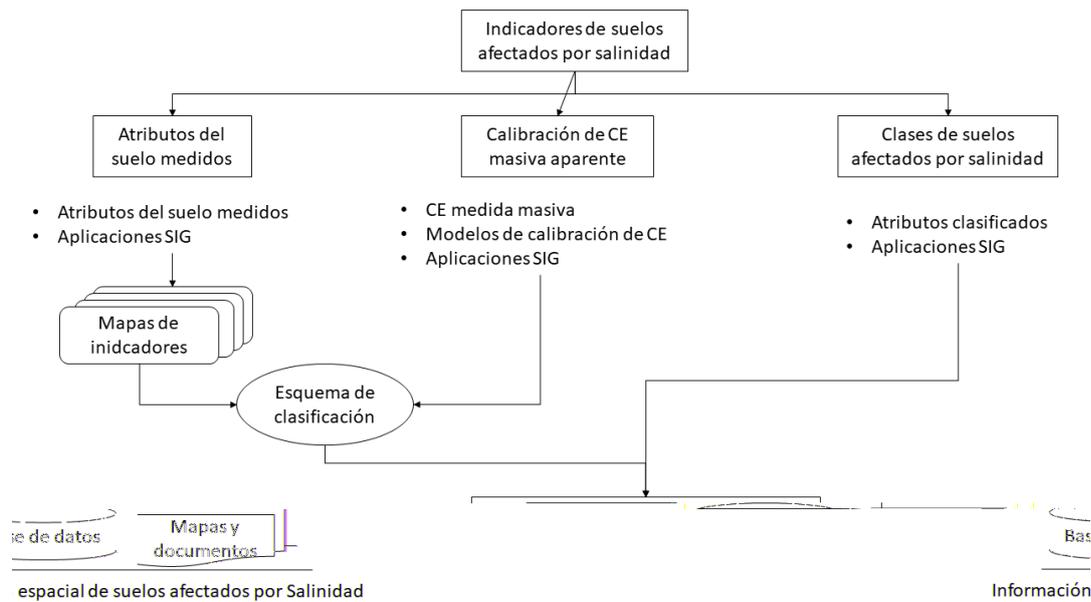


Figura 3.5: Enfoques para usar indicadores del suelo en el mapeo de suelos afectados por salinidad de mapeo de suelos afectados por salinidad. En este caso, los indicadores de suelo georreferenciados son interpolados primeramente y los mapas resultantes son clasificados posteriormente para producir mapas de suelos afectados por salinidad (Zurqani *et al.*, 2018). Este método fue probado por Wicke *et al.* (2011) para producir un mapa global de suelos afectados por salinidad. (Figura 3.6).

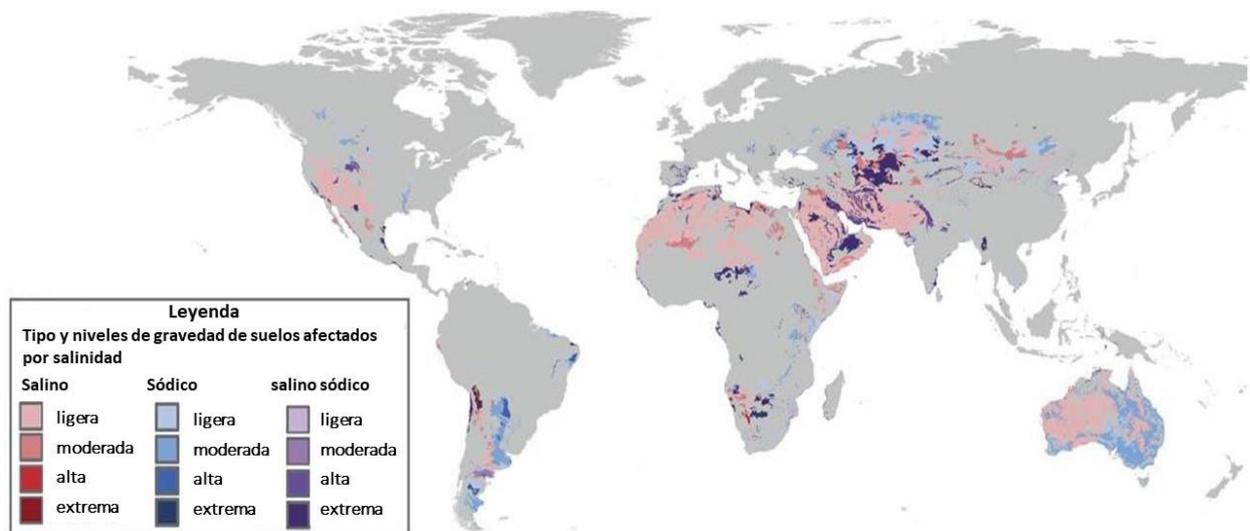


Figura 3.6: Distribución global de los suelos afectados por salinidad (Fuente: Wicke *et al.*, 2011)

3.4 Requisitos de datos para el mapeo de la salinidad del suelo

Los datos de entrada para cartografiar suelos afectados por salinidad dependen de los métodos de mapeo. Un resumen de los requisitos de datos por las principales categorías de los métodos de mapeo aparece en la Cuadro 3.3. Los métodos basados en indicadores del suelo son los más demandantes de datos. Por lo menos, requieren datos del suelo sobre conductividad eléctrica (CE), pH, y porcentaje de sodio (PSI) o relación de absorción de sodio (RAS), según recomendación de la FAO o los esquemas de clasificación del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) para los suelos afectados por salinidad.

Cuadro 3.3: Resumen de requisitos de datos para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Principales categorías de métodos de mapeo		
Basadas en mapas de tipo de suelo	Basadas en aplicaciones de sensores remotos	Basadas en indicadores del suelo
1. Mapa clasificado de suelos	1. Datos/imágenes de sensores remotos	1. Conductividad eléctrica
2. Datos de suelo confirmatorios	2. Datos de calibración del suelo	2. pH
	3. Puntos de control terrestre georreferenciados	3. PSI o RAS
		4. Iones solubles
<i>Datos auxiliares</i>		
Uso/cobertura de la tierra, hidrogeología, degradación del suelo, proximidad a los litorales		
Clima, parámetros de relieve		

3.4.1 Datos del suelo

3.4.1.1 Propiedades medidas del suelo

Las propiedades medidas del suelo para clasificar problemas en el suelo aparecen en la Cuadro 3.4. Los iones solubles en esta categoría incluyen Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Potasio (K^+), Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Carbonato (CO_3^{2-}), Bicarbonato (HCO_3^-) y Nitratos (NO_3^-). Son muy útiles en la identificación de las sales dominantes y tipos de suelos afectados por salinidad. La conductividad eléctrica (CE), el total de sales solubles (TSS), el total de cationes solubles (TCS) y el total de sólidos disueltos (TSD), son medidas integrales de concentración de sales en el suelo. Este libro recomienda un conjunto de datos mínimos para clasificar los suelos afectados por salinidad como CE, pH y PSI o RAS, por las recomendaciones hechas por los esquemas populares de clasificación de sales (CE).

Cuadro 3.4: Resumen de propiedades del suelo para cartografiar la salinidad

Propiedad	Notación	Unidades	Descripción	Método de medición
Conductividad eléctrica	CE_{SE}	dS/m	CE (SE^*)	Extracto de pasta saturada de suelo
	CE	dS/m	CE de la solución de suelo	Otros extractos de suelo (mezcla 1:n = mezcla suelo:agua)
	CE_a	dS/m	CE aparente	CE de suelo aparente in-situ (EMI, TDR, etc.)
Contenido de sal	TSS	mg/L	Total de sales solubles	Evaporación del extracto de pasta saturada de suelo
	Iones	mg/L	Iones solubles	Fotometría/ espectrometría
Reacción	pH	-	pH del suelo (agua)	Medidor de pH / electrodo de vidrio
Proporciones iónicas	RAS	-	Absorción de sodio	Proporción = iones de sodio (Na) / (iones de Mg y Ca)
	PSI	-	Sodio intercambiable	Proporción = Na intercambiable / ($100 \times \text{CEC}^{**}$)
	Sodio	-	Cloruro de sodio	Proporción = Iones de Na / (suma de iones de Cl y SO_4)
	carbonato	-	Cloruro de carbonato	Proporción = carbonato / (suma de iones de Cl y SO_4)

*SE- del extracto saturado; **CEC- capacidad de intercambio de cationes

3.4.1.2 Propiedades aparentes del suelo y mapas del suelo

Las propiedades aparentes son propiedades medidas en el campo usando sensores de suelo proximales. Se utilizan mayormente para la estimación del pH y la conductividad eléctrica. Los sensores para medir la conductividad eléctrica son: 1) resistividad eléctrica, 2) inducción electromagnética y 3) reflectometría de dominio de tiempo/dominio de amplitud/dominio de frecuencia (TDR, ADR, FDR). Dichos sensores miden la conductividad eléctrica aparentes que es también conocida como conductividad eléctrica aparente (CE_a) (Dalton and van Genuchten, 1986; Corwin and Lesch, 2005).

La medición del pH del suelo en el campo, a menudo se realiza utilizando medidores de pH (y algunas veces sensores de pH). Los medidores de pH se usan con muestras preparadas en el campo. Por tanto, no se trata realmente de pH de suelo aparente. Los sensores para pH de suelo aparente incluyen transistores eficientes de campo selectivos de iones (ISFET) y sensores conductímetros, sensores de electrodos (Schirrmann *et al.*, 2011).

Los mapas de suelos son conjuntos de información espacial de grupos (unidades) de suelo con ciertas características. Constituyen ejemplos típicos de mapas de suelo los mapas poligonales, que muestran tipos dominantes de suelo en cada polígono y mapas temáticos de coropletas de indicadores/clases de tipos de suelos afectados por salinidad.

3.4.2 Información sobre factores formadores de suelos

Los factores formadores de suelos son el material primario, el uso/cobertura de la tierra, el clima y el relieve. La información sobre el material primario se obtiene del mapa geológico. El mapa debe contener datos sobre la data y tipo de litología de las rocas dominantes que dieron origen al suelo (Figura 3.7). La mayoría de los mapas geológicos se encuentran disponibles como archivos vectoriales SIG tipo polígono.

La información sobre uso/cobertura terrestre representa las actividades de la biota y las actividades antropogénicas que influyen sobre la formación del suelo y las causas secundarios de los problemas de salinidad de éste. La cobertura terrestre/mapas de cobertura y las imágenes de sensores remotos son fuentes apropiadas de información de uso/cobertura de la tierra. Constituyen ejemplos de datos del clima, la precipitación anual media (lluvia, nieve, etc.), la temperatura mínima y máxima anual, la tasa de evapotranspiración media anual y la velocidad del viento. Los datos sobre clima descargables sin costo alguno a escala global de baja resolución se encuentran disponibles en <https://www.worldclim.org/> (Consultados el 31 de Enero de 2020). El modelo de elevación digital (MED) es el dato de entrada primario para derivar información sobre el relieve. El MED puede ser descargado en <https://earthexplorer.usgs.gov/> consultado el 14 de Enero de 2020).

3.4.3 Otros datos complementarios

Otros datos auxiliares para el mapeo de suelos afectados por salinidad son los límites administrativos y los datos espaciales de otras causasde problemas de salinidad en el suelo (Figura 3.7). Los datos espaciales de otras causasde problemas de salinidad son los mapas hidrogeologicos (calidad de las aguas subterráneas y profundidad hasta el nivel del agua subterránea), la degradación del suelo, la proximidad a los litorales y áreas propensas a inundaciones.

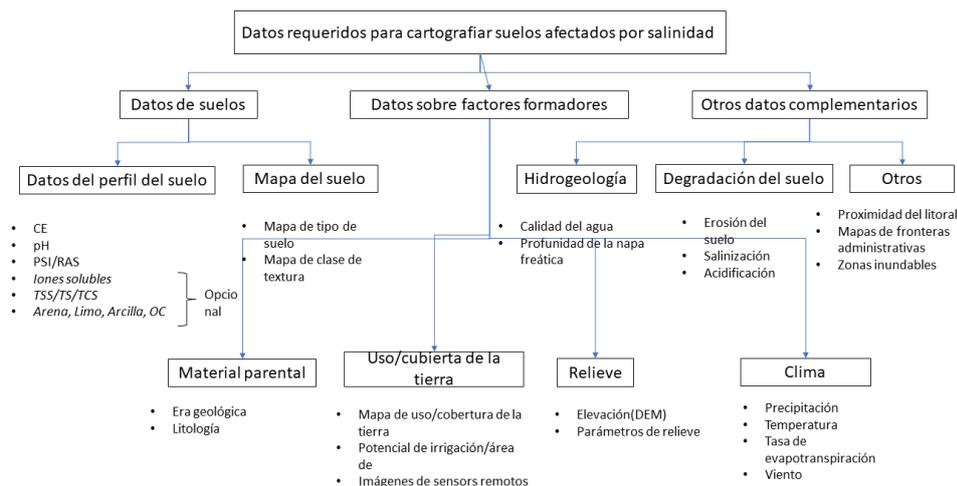


Figura 3.7: Requisitos de datos para el mapeo de suelos afectados por salinidad

3.4.4 Modelos de conversión

La conductividad eléctrica determinada en el extracto de pasta saturada de suelo (CE_{SE} in dS/m), es la CE preferida para clasificar suelos afectados por salinidad. Sin embargo, muchos laboratorios de suelos no analizan la CE_{SE} debido a los procedimientos complejos de laboratorio, involucrados en su determinación y al largo tiempo de respuesta para analizar muchas muestras. En su lugar, utilizan otros extractos, como la mezcla de 1:5 suelo:agua (1 parte de suelo en 5 partes de agua), soluciones 1:2.5, etc. (Landon, 1984). La literatura ha hecho propuestas de calibrar la CE determinada con base en otros extractos de suelo a la CE_{SE} equivalente (Hogg and Henry, 1984, Ozcan *et al.*, 2006; Sonmez *et al.*, 2008; Kargas *et al.*, 2018). Estas propuestas dependen de la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la temperatura y la CE_s medida. Un esquema genérico en estas propuestas para convertir CE a CE_{SE} , es el siguiente:

$$EC_{SE} = f(EC_s, \text{textura}, \text{carbono}, \text{temperatura}) + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde la CE_s es la CE medida por un método distinto al método del extracto de pasta saturada de suelo (CE_{SE}). La literatura proporciona ejemplos de modelos para la Ecuación 3.1 en la Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5: Modelos existentes de conversión de CE

Nombre del modelo	Descripción	Clase de textura	Mezcla de suelo:agua	Referencia
USDA	$CE_{SE} = CE * 3$	Todas	1:1	Richards (1954)
	$CE_{SE} = CE * 5$	Todas	1:2	
Landon	$CE_{SE} = CE * 2.2$	Todas	1:1	Landon (1984)
	$CE_{SE} = CE * 6.4$	Todas	1:5	
	$CE_{SE} = CE * 3.81$	Todas	1:3	
Hogg	$CE_{SE} = CE * 1.75 - 0.37$	Todas	1:1	Hogg and Henry (1984)
	$CE_{SE} = CE * 1.38 - 0.14$	Todas	1:2	
Zhang	$CE_{SE} = CE * 1.79 + 1.46$	Todas	1:1	Zhang <i>et al.</i> (2005)
Chi	$CE_{SE} = CE * 11.68 - 5.77$	Todas	1:5	Chi and Wand (2010)
Ozcan	$CE_{SE} = CE * 1.93 - 0.57$	Todas	1:1	Ozkan <i>et al.</i> (2006)
	$CE_{SE} = CE * 3.3 - 0.2$	Todas	1:2.5	
	$CE_{SE} = CE * 5.97 - 1.17$	Todas	1:5	
Sonmez	$CE_{SE} = CE * 2.72 - 1.27$	Textura gruesa	1:1	Sonmez <i>et al.</i> (2008)
	$CE_{SE} = CE * 4.33 + 0.17$		1:2.5	
	$CE_{SE} = CE * 8.22 - 0.33$		1:5	
	$CE_{SE} = CE * 2.15 - 0.44$	Textura media	1:1	
	$CE_{SE} = CE * 3.84 + 0.35$		1:2.5	
	$CE_{SE} = CE * 7.58 + 0.06$		1:5	
	$CE_{SE} = CE * 2.03 - 0.41$	Textura fina	1:1	
	$CE_{SE} = CE * 3.68 + 0.22$		1:2.5	
	$CE_{SE} = CE * 7.58 + 0.24$		1:5	
FAO	$CE_{SE} = f(\text{textura, arcilla, carbono, CE})$		Varia-da	FAO (2006)

SECCIÓN 2: DESAROLLO DE INFORMACION SOBRE SUELOS AFECTADOS POR SALINIDAD

Esta sección describe los pasos procedimentales para desarrollar información espacial a escalas múltiples. Demuestra la forma de integrar los recursos (equipo y programas de computación, datos y experiencia) con métodos para desarrollar información espacial sobre suelos afectados por salinidad.



© 2013 Christian Thine Omuto

4 Preparación para el mapeo a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad

4.1 Requisitos

El mapeo a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad requiere la adecuada coordinación y movilización de datos de entrada, equipo y programas computacionales para aplicar los métodos de mapeo y un enfoque armonizado que permita la comparación de información en el tiempo y en el espacio. Los requisitos de datos de entrada fueron expuestos en la Sección 1, que habla de la relación entre los datos de entrada y las características de los suelos afectados por salinidad. La movilización de los recursos de capital y la coordinación de actividades están descritos en la Sección 3. La interacción entre diferentes aspectos sobre los requisitos de entrada, están ilustrados en la Figura 4.1.

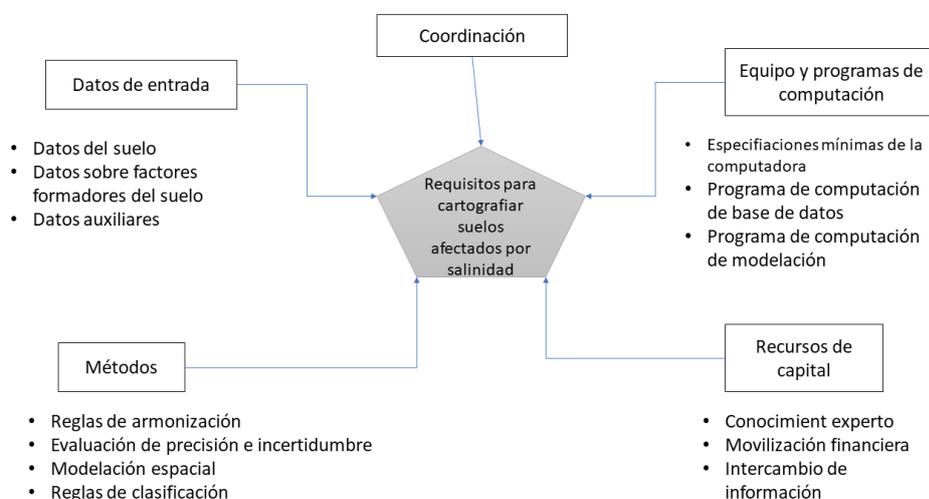


Figura 4.1: Requisitos para el mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad

4.1.1 Datos de entrada

Los datos de entrada proveen evidencia de la existencia de suelos afectados por salinidad. Sus características influyen y son influenciadas por las especificaciones del producto final del ejercicio de mapeo, como profundidades de suelo apropiadas, resolución espacial de los mapas finales, incorporación de la evaluación de incertidumbre y precisión y clasificación de la intensidad de los problemas de salinidad en el suelo. La Cuadro 4.1 es un resumen que ejemplifica los requisitos de datos de entrada para el mapeo nacional, regional y global de suelos afectados por salinidad.

Cuadro 4.1: Requisitos de datos de entrada mínimos para el mapeo de una zona extensa de suelos afectados por salinidad

Tipo de datos	Variables	Unidades	Fuente de los datos principales	Otras fuentes	
				Nombre	Formato
Datos georreferenciados del perfil del suelo	CE	dS/m	Datos nacionales	WOSIS ¹ , HWSD ²	Datos de puntos vectoriales
	pH	-			
	PSI	%			
	iones solubles*	cmol/kg			
Clima (Media anual)	Precipitación	mm	Datos nacionales	Worldclim ³	Datos de puntos vectoriales
	Temperatura	°C			
Uso/coertura terrestre	Tipos de cobertura/uso	-	Datos nacionales	ESA ⁴	Imagen de datos (aster (300 m))
Mapa del suelo	Tipos de suelo	-		WOSIS, HWSD	Vectores poligonales
Modelo de elevación digital (DEM)	Elevación	m	Mapa de contorno	USGS ⁵	Imágenes (15, 30, etc.)
Reflectancia de la superficie terrestre obtenida por sensores remotos	Reflectancia visible	-	Datos nacionales	USGS	Imágenes de MODIS, Landsat, OLI, Sentinel, ASTER
	Reflectancia infrarroja Roja	-			
	Reflectancia infrarroja de onda corta	-			
Geología	Tipos de litología	-	Datos nacionales		
Hidrogeología*	Nivel de agua subterránea	m	Datos nacionales		
	Calidad del agua subterránea	-			
Degradación del suelo	Impulsores y clases de degradación		Datos nacionales		

* Datos opcionales

4.1.2 Equipo y programas de computación

Es necesario contar con equipo y programas de computación para procesar los datos de entrada, implementar métodos de evaluación y almacenar y compartir la información espacial final. Incluyen procesamientos, almacenamiento y facilidades de instalación en red, para desarrollar la información espacial de suelos afectados por salinidad. La capacidad de procesamiento constituye el componente básico responsable de implementar los métodos de evaluación y consta del procesador de la computadora y los programas de computación. Es importante considerar las facilidades de procesamiento, puesto que las complejidades del procesamiento tienden a aumentar con el aumento en la extensión y la resolución espaciales de los productos finales. El almacenamiento de los datos de entrada y los datos procesados es manejado por la función de memoria de la computadora (hardware). Al igual que la función de procesamiento, la demanda de una función de almacenamiento también aumenta con el incremento en la extensión espacial de las áreas de enfoque. Los tamaños de las imágenes de entrada y los mapas procesados pueden aumentar desde la evaluación de nivel nacional al nivel global. Todas estas consideraciones influyen sobre los requisitos mínimos de equipo y programas de computación para implementar el mapeo a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad. Se sugieren las siguientes especificaciones de la computadora para el mapeo nacional de los suelos afectados por salinidad:

- Suficiente memoria de procesamiento (por lo menos 8GB en RAM)
- Capacidad de procesamiento rápido (por lo menos Core i5 o su equivalente)
- Suficiente capacidad de almacenamiento (por lo menos 100 GB)

¹ WOSIS: <https://www.isric.org/explore/wosis>

² HWSD: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>

³ WorldClim: <https://www.worldclim.org/>

⁴ ESA: <https://www.esa-landcover-cci.org/>

⁵ USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

La conectividad con Internet es también un aspecto importante dentro los requisitos de equipo y programas de computación. Permite el acceso a depósitos de datos en línea durante la adquisición de datos y durante el intercambio de información.

4.1.3 Ejemplo de datos de entrada para demostrar el mapeo espacial de suelos afectados por salinidad

El estudio de caso para demostrar el mapeo espacial basada en indicadores de suelo afectado por salinidad, fue obtenido en el norte de Sudán. La zona se extiende desde la Latitud 22o 13' 30.3" hasta 16o 30' 28.59" Norte y desde la Longitud 32o 41' 3.55" hasta 25o 0' 0" Este (Figura 4.2). Los datos de entrada de suelos de esta zona constan de 379 perfiles de ubicaciones que fueron estudiadas en 2018 a diferentes profundidades de suelo entre 0 a 200 cm. Los datos incluyen CESE (dS/m), pH, PSI, iones solubles (Na⁺, SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, and Cl⁻ solubles) en cmol⁺/kg y fueron determinados usando el método del extracto de pasta saturada de suelo. Estos datos se encuentran disponibles en <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.920201>.

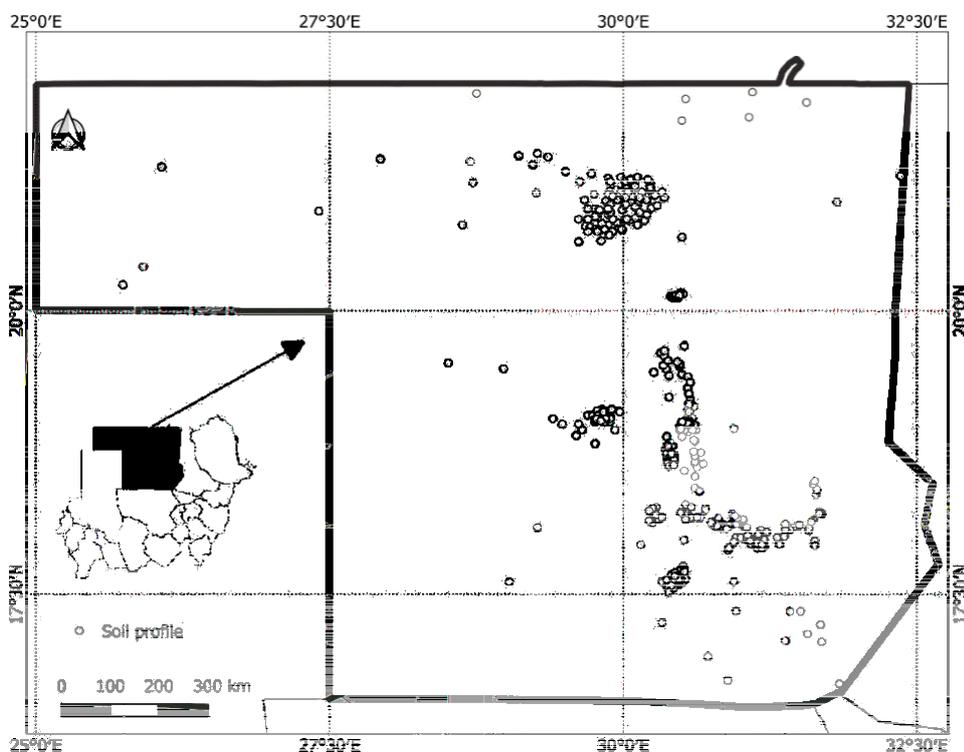


Figura 4.2: Ubicación de la información de los perfiles del suelo en el norte de Sudán

Los datos sobre los factores formadores del suelo incluyen imágenes multispectrales, imágenes del modelo de elevación digital (MED) y mapas de tipos de cobertura de la tierra, geología y cantidad media de precipitaciones pluviales (Cuadro 4.2). Los datos de entrada también incluyen archivos shapefile de los límites administrativos y las poblaciones más grandes del estudio de caso, así mismo el mapa raster de los tipos de acuíferos.

Cuadro 4.2: Datos de entrada del estudio de caso del norte de Sudán (fuente: Gobierno de Sudán, <http://susis.sd/>)

Categoría de los datos de entrada	Datos	Descripción
Datos del perfil del suelo (0-200 cm de profundidad del suelo)	CESE, pH, PSI and RAS	Determinados en el laboratorio usando el método de extracto de pasta saturada de suelo
	(Na ⁺ , SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , y Cl ⁻) Solubles	
Factores formadores del suelo	Cobertura terrestre	Mapa de polígonos de las principales clases de cobertura
	Imágenes de sensores remotos	500-m MODIS (MOD9A V6)
	Elevación (DEM) [Modelo de elevación digital]	90-m SRTM DEM
	Geología	Mapa de polígonos de litología
	Cantidades de precipitaciones anuales medias	Mapa de datos raster de 200-m de precipitaciones anuales
Datos complementarios	Mapas de límites y las mayores poblaciones	Shapefile
	Mapa de hidrogeología	Tipos de acuíferos

4.2 Requisitos de los programas de computación para un mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad

4.2.1 Requisitos de la aplicación del Sistema de Información Geográfica SIG

Las aplicaciones del Sistema de Información Geográfica SIG son de utilidad en la preparación de datos espaciales y la presentación de los productos finales para enriquecer el contenido de la información. Las aplicaciones SIG comúnmente usadas para la preparación de datos son:

- a) Reproyección: Esta aplicación es necesaria para alinear los sistemas de coordenadas del SIG en una proyección uniforme. Las proyecciones que dan dimensiones espaciales en metros son preferibles mientras que la proyección geográfica (en grados decimales) WGS84 es preferible para el intercambio de datos.
- b) Recorte de capas: Esta aplicación ayuda a reducir el volumen de datos mediante el recorte de la extensión dentro de la frontera del área de interés.
- c) Conversión de formatos: Esta aplicación se usa para permitir el intercambio de datos entre diferentes programas de computación. La conversión de datos se hace para cambiar datos vectoriales SIG en datos raster (y viceversa) o para cambiar entre distintos tipos de archivos de datos raster (por ejemplo, de geoTiff a ASCII).
- d) Remuestreo: La aplicación de remuestreo es necesaria para armonizar la resolución de las capas de entrada para la modelación espacial de indicadores y el mapa clasificado de suelos afectados por salinidad.
- e) Corrección de imágenes: La corrección de imágenes se aplica principalmente a las imágenes de los sensores remotos. Existen dos tipos de corrección de imágenes: la radiométrica y la geométrica. La corrección radiométrica apunta a la conversión de los números digitales de la imagen (DN por sus siglas en inglés) en reflectancia. Los algoritmos para las correcciones son dados usualmente para cada tipo de misión de los sensores remotos. La aplicación de corrección geométrica re proyecta las imágenes en un sistema de coordenadas de referencia (SCR por sus siglas en inglés) preferente a las imágenes.
- f) Desarrollo de las bases de datos SIG: Esta función es necesaria para agrupar un conjunto de datos completo armonizado para reducir al mínimo los errores de la modelación espacial y para garantizar un almacenamiento compatible para referencias futura o aplicaciones.

g) Disposición de los mapas: Esta es la adición de valor final a las capas del SIG para mejorar la comunicación con los usuarios de los productos finales de información espacial para suelos afectados por salinidad.

La mayoría de los programas computacionales SIG pueden implementar las aplicaciones anteriores. Pueden utilizarse las siguientes guías para seleccionar un programa computacional SIG adecuado para su uso:

- Un programa de computación que se adapte a una amplia variedad de formatos de archivos SIG.
- Un programa de computación con muchas alternativas para paletas de colores y simbología, para la disposición de los mapas.
- Programas de computación con visualizaciones de capas fácilmente accesibles y funcionalidades de interfaz gráfica del usuario.
- Programas de computación que sean estrictas con la sobreposición en pantalla con pixeles efectivamente armonizadas y capas georreferenciadas.
- Programas de computación con algoritmos de conversión de vectores en datos raster versátiles, pero de fácil implementación.
- Programas de computación con módulos robustos para aplicaciones de sensores remotos y descarga directa de imágenes.
- Programas de computación con respaldo en línea vibrante y de fácil acceso.
- Programas de computación de fácil acceso (preferiblemente de bajo costo o fuente abierta).

Algunos de los programas computacionales SIG que satisfacen los criterios anteriores son QGIS (<https://download.qgis.org/>), ILWIS (<https://52north.org/software/software-projects/ilwis/>), gvSIG (<http://www.gvsig.com/en>), and SAGA (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>). Otros programas computacionales SIG como ArcGIS, ERDAS, IDRISI, ENVI, etc. también constituyen alternativas adecuadas.

4.2.2 Requisitos de la armonización de datos

Los datos para el mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad, pueden tener variaciones y normas a causa de sus fuentes y métodos de generación de datos, resolución espacial y temporal, formato de archivos y unidades de medición. La armonización de los datos de entrada es necesaria para producir conjuntos de datos compatibles para reducir los errores en el manejo de datos y la incertidumbre en la modelación espacial. Las aplicaciones de armonización de datos incluyen:

- a) La estandarización de las unidades de medición
- b) La conversión de los valores de las propiedades del suelo en equivalentes a un método de medición preferido.
- c) La armonización de los valores de las propiedades del suelo en intervalos uniformes de profundidad de suelo.
- d) La transformación de la distribución estadística en una función de distribución de probabilidades preferida.
- e) La armonización de la resolución espacial, la proyección y extensión de las capas de entrada SIG para la modelación espacial.

En el mapeo a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad, la armonización de los datos de entrada se centra en los indicadores del suelo y en las capas espaciales SIG (Figura 4.3). El requisito del programa de computación para la armonización de datos incluye requisitos para implementar modelos de conversión de datos, corrección de imágenes y desarrollo de índices y armonización de capas SIG. Las necesidades de armonización estadística son implementadas usando programas de computación estadísticos, mientras que las necesidades de armonización del SIG son implementadas usando programas de computación SIG. Un programa de computación idóneo como el R y sus paquetes aportados (R (<https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>) puede ser apropiado para combinar las necesidades de armonización estadísticas y SIG. Las contribuciones de paquetes R incluyen *soilassessment* (Omuto, 2020), datos *raster* (Hijmans, 2020), *rgdal* (Bivand et al., 2019) y *GSIF* (Hengl, 2019).

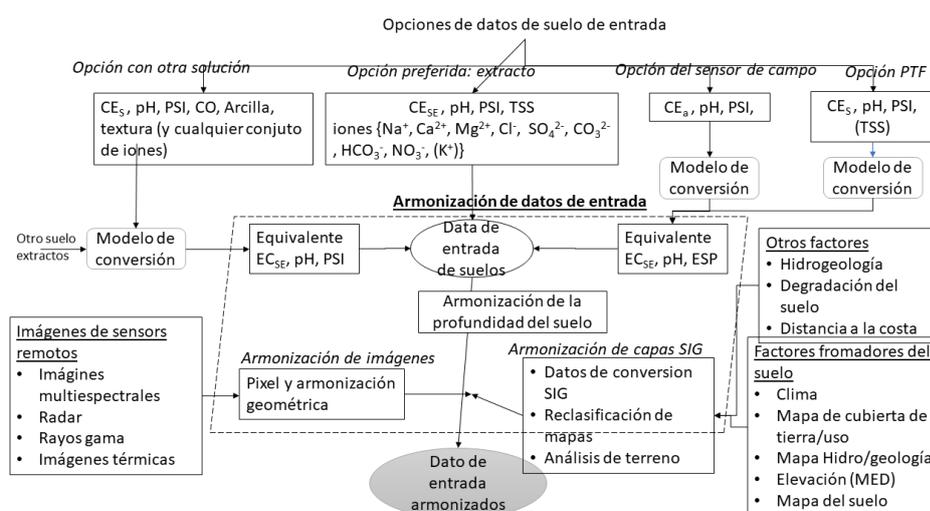


Figura 4.3: Armonización de los datos de entrada para el mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad

4.2.3 Requisitos de la modelación espacial

El mapeo a escala múltiple de los suelos afectados por salinidad requiere de datos de entrada espaciales que se combinan mediante ciertos procedimientos para producir información espacial del estado de los problemas de salinidad de los suelos. La modelación espacial apunta al desarrollo de capas espaciales de datos de entrada (indicadores) de los problemas de salinidad y para desarrollar mapas clasificados de suelos afectados por salinidad. Los requisitos de los programas de computación para la modelación espacial son:

- Funcionalidad para la predicción espacial de variables numéricas y categóricas.
- Funcionalidad para estimar la precisión y las incertidumbres cartográficas.
- Funcionalidad para clasificar los suelos afectados por salinidad.

Los programas R, que se descargan en forma gratuita, satisfacen adecuadamente estos requisitos. Algunos de sus paquetes son especialmente útiles para implementar algunos de los requisitos mencionados. Por ejemplo, el paquete *soilassessment* cuenta con funciones para clasificar los suelos afectados por salinidad y estimar precisión e incertidumbres, mientras que el paquete *caret* tiene funciones para la predicción espacial de variables numéricas y categóricas (Khun, 2020; Omuto, 2020).

4.3 Preparación de los datos de entrada para el mapeo de los suelos afectados por salinidad

La preparación de datos de entrada es un paso necesario en el mapeo de suelos afectados por salinidad. Implica la creación de una base de datos completa y totalmente armonizada de los datos del perfil del suelo, las capas SIG y la documentación de referencia.

- i. La base de datos del perfil del suelo, es aquella que contiene una hoja de cálculo del perfil de suelo georreferenciado. La base de datos contiene información sobre la profundidad del suelo y las propiedades medidas del suelo para cada profundidad muestreada, unidades de medición, métodos usados en las mediciones, laboratorio de referencia, fecha de adquisición de datos, publicación de referencia (en su caso), persona de contacto y resumen del metarchivo (archivo de texto).
- ii. La base de datos SIG, es la base de datos que contiene capas espaciales SIG que son capas de factores formadores del suelo y causas de problemas de salinidad en los suelos.
- iii. La base de datos de documentos, contiene literatura de información existente sobre las zonas afectadas por salinidad, problemas, legislación e intentos previos de resolver el problema, etc.

Es importante considerar las prácticas SIG estándar para la preparación y el manejo de datos SIG. Las prácticas incluyen:

- I. Regla sobre la ruta del archivo: Es preferible un nombre de ruta corto.

El nombre de la ruta contiene ubicaciones de archivos separados por una barra oblicua o diagonal inversa "/". El número de elementos de un nombre de ruta, separados por la diagonal inversa "/" debe ser el menor posible y no contener espacios. Por ejemplo: "C:/Salinity/Input" tiene dos símbolos de diagonales inversas que implican dos carpetas en el nombre de la ruta mientras que "C:/Salinity/Sudan/Input" tiene tres símbolos de diagonal inversa para tres carpetas en el nombre de la ruta. El nombre de ruta de 3 carpetas es más largo que el nombre de ruta de 2 carpetas.

- II. Regla sobre el nombre del archivo.

NO cree nombres de archivos o nombres de carpetas con espacios (por ejemplo, no se recomienda "salt_affected.shp"). En lugar de ello, use el subrayado u omita el espacio (por ejemplo, se recomiendan "salt_affected.shp" o "saltaffected.shp")

NO inicie nombres de archivos con números, símbolos, operadores matemáticos, punto final y coma (por ejemplo, no se recomiendan ".CEtp.xls" ni "+PSI.tif" ni "0_30topPSI.mpr"). Es mejor no usar operadores matemáticos en los archivos de nombres.

NO cree nombres de archivos con nombres largos (por ejemplo, no se recomienda "salt_affected_soluble_ions_sodium.csv")

Use un estilo informativo para crear nombres que incorpore el tipo de archivo o proyección para las capas SIG (por ej.: "solidata_dg.shp" o "CEtop0_30cm.tif" o "DEM90_UTM37N")

- III. Regla sobre los archivos de datos.

Separe y proteja los datos de entrada colocándolos en la carpeta de entrada y protéjala contra la sobreescritura involuntaria. Los pasos que aparecen en la Figura 4.4 son de utilidad en la creación de carpetas de trabajo y archivo y en la protección de carpetas de archivo. Es posible que la característica de protección contra la escritura deba ser eliminada cuando sea agregado un nuevo dato original al archivo y la protección sea habilitado posteriormente.

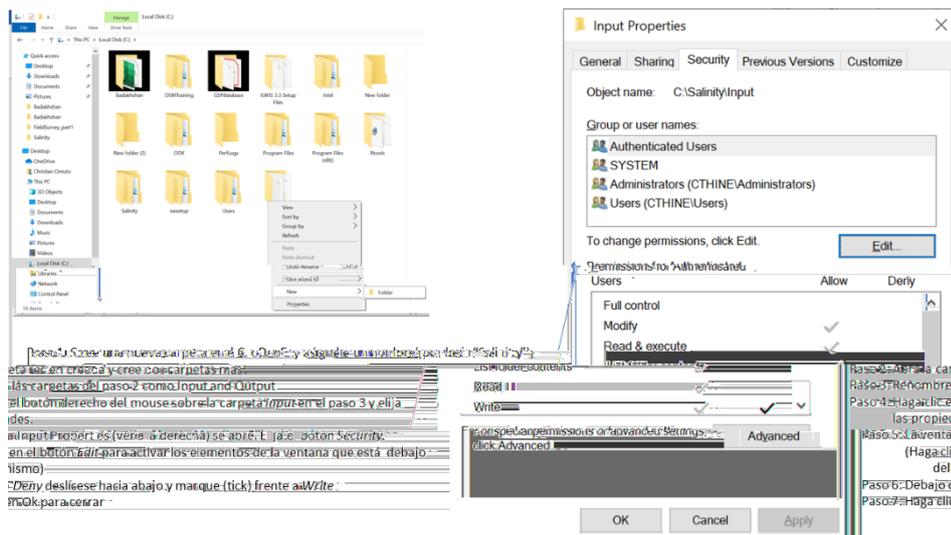


Figura 4.4: Pasos para proteger una carpeta con datos originales

4.3.1 Organización de los datos de la hoja de cálculo

Se describe un enfoque de tres pasos para organizar y documentar los datos de la hoja de cálculo.

Paso 1: Alineación de los datos de la hoja de cálculo

En este paso, los datos de la hoja de cálculo se disponen en orden para que las hileras de datos representen a las muestras y las columnas representen a las variables. Las muestras se distinguen por números de serie consecutivos. Una buena práctica es usar la primera columna como la variable indexando el orden serial de las muestras. Las otras variables en la base de datos se alinean en forma consecutiva en las columnas que empiezan con la ID del perfil, la descripción de la ubicación (en su caso), la Latitud y la Longitud y el rango de profundidad del muestreo (Figura 4.5). El rango de profundidad se divide posteriormente en dos variables: *Upper* (Superior) y *Lower* (Inferior). *Superior* denota la primera parte del rango de profundidad mientras que *Inferior* denota la última parte del rango de profundidad. El valor para *Superior* en una muestra debe ser el mismo que el valor para *Inferior* en la muestra precedente para el mismo ID del perfil (Figura 4.5). Otras variables como Código de Profundidad (o Número de Horizonte), componentes de la textura del suelo, carbono orgánico, pH, CE, PSI y otras propiedades del suelo (por ej.: iones solubles, iones de sodio intercambiables y CIC) también se incluyen en ese orden (Figura 4.5). El Código de Profundidad (u Horizonte) deben tener números consecutivos empezando con 1 desde la primera hasta la última profundidad/el último horizonte muestreados de cada perfil. Esta configuración crea números/códigos repetidos para la ID del perfil y los valores de Longitud y Latitud (Figura 4.5).

Sample	Pits	Longitude	Latitude	Depth	Upper	Lower	Horizon	Clay	pH	EC	SAR	ESP	SolCa	SolMg	SolNa	SO4	SolCl
1	1	45.13	31.93	0-10	0	10	1	9	7.7	0.6	3	3	3.1	1.5	2.5	0	2.8
2	1	45.13	31.93	10-30	10	30	2	12	7.6	4	11	12	28	8.5	12	1.9	5.8
3	1	45.13	31.93	30-60	30	60	3	22	7.5	0.5	3	4	2.8	1.5	2		
4	1	45.13	31.93	60-100	60	100	4										
5	2	56.65	28.89	0-10	0	10	1	27	8.6	1.9	9	10	14.1	3	4.5		
6	2	56.65	28.89	10-30	10	30	2	31	7.8	-0.7	4	5	4.5	1.5	2.5		
7	2	56.65	28.89	30-100	30	100	3										
8	3	55.74	39.45	0-35	0	35	1	22	7.6	0.9	5	5	6.2	2	3		
9	3	55.74	39.45	35-60	35	60	2	25	7.8	0.4	2	2	2.2	1.5	2		
10	3	55.74	39.45	60-100	60	100	3	32	7.9	0.4	2	2	2.1	1.5	2		
11	4	62.56	34.15	0-20	0	20	1	7	7.5	0.3	2	2	1.3	1	1.5		
12	4	62.56	34.15	20-60	20	60	2	10	7.7	0.2	1	1	0.7	1	1.5		
13	4	62.56	34.15	60-100	60	100	3	23	7.9	0.3	2	3	1.7	1	1.5		
14	5	70.62	71.15	0-20	0	20	1	10	7.8	2.2	9	9	15.8	4	6		
15	5	70.62	71.15	20-50	20	50	2	12	7.7	1.6	7	6	11.4	3	5		
16	5	70.62	71.15	50-100	50	100	3										
17	6	64.56	28.92	0-15	0	15	1	22	7.4	-2.7	10	10	16.3	3.5	5.5		
18	6	64.56	28.92	15-30	15	30	2	25	7.5	1.2	6	7	8.3	2.5	4		
19	7	34.47	52.44	0-20	0	20	1	21	7.8	10.7	14	14	63.1	30.5	44		
20	7	34.47	52.44	20-50	20	50	2	23	7.5	2.2	9	9	14.8	4	6		
21	8	69.98	42.14	0-30	0	30	1	22	7.9	0.4	2	3	2.3	1.5	2		
22	8	69.98	42.14	30-70	30	70	2	25	7.7	0.9	6	7	6.4	1.5	2.5		
23	8	69.98	42.14	70-100	70	100	3	24	7.5	3.9	10	10	26.1	7.5	13		

Figura 4.5: Formato de entrada de datos de la hoja de cálculo

Es importante cerciorarse de que:

- Los datos *Superior*, *Inferior* y *Horizonte* para cada ID del perfil aumentará en dirección descendente del perfil del suelo
- Los datos *Latitud*, *Longitud* e *ID del Perfil* deben permanecer constantes para cada ID del Perfil
- *Superior* equivale a la primera parte del rango de *Profundidad* e *Inferior* es la segunda parte.

Paso 2: Guardando y exportando los datos de la hoja de cálculo

Después de la organización de los datos, es necesario guardar los datos de la hoja de cálculo (preferiblemente como valores separados por comas, CSV) para su posterior alineamiento con otros conjuntos de datos (Figura 4.6).

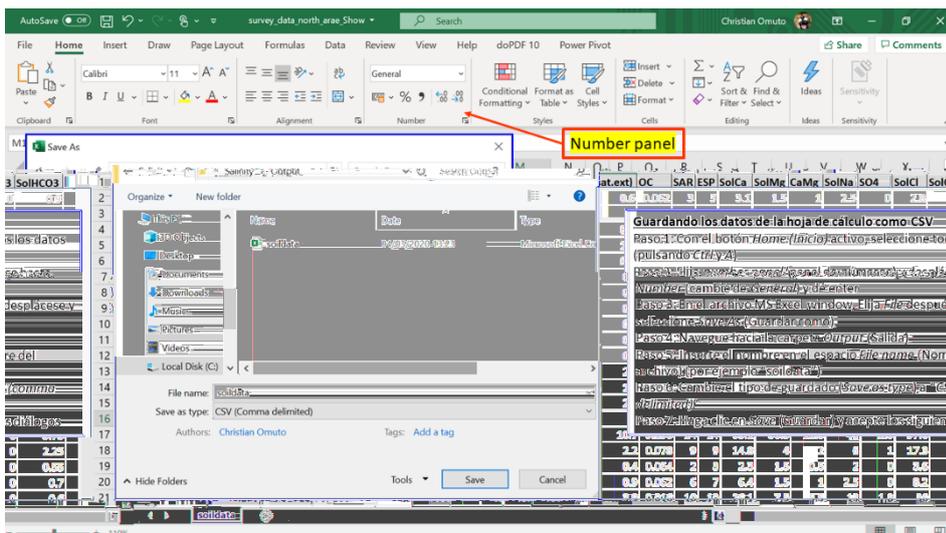


Figura 4.6: Guardado de los datos de la hoja de cálculo en MS Excel como archivo de texto CSV

Algunas veces puede ser necesario cerciorarse que el separador del sistema informático es *coma* (,) o *punto y coma* (;) ya que esto influirá sobre el acceso al archivo CSV guardado. El siguiente procedimiento puede ser de utilidad para establecer el tipo de separador del sistema.

1. Haga clic en el menú Start (inicio).
2. Escriba *control panel* (panel de control).
3. Haga clic en *Desktop app* (Aplicación de escritorio).
4. Seleccione *Clock, Language, and Region* (Reloj, Idioma y Región)
5. Haga clic en *Region* (Región).
6. Seleccione *Additional settings* (Configuraciones adicionales) en la ventana emergente
7. Verifique el separador que aparece frente a *List separator* (Separador de la lista)

Cuando sea necesario cambie el separador del sistema a *coma* (siguiendo los pasos anteriores y cambiando a *coma* en el paso 7 y guardando el cambio). Si el separador del sistema es cambiado después de concluir los pasos de la Figura 4.6, los pasos deben ser repetidos.

Paso 3: Documentación de los datos de la hoja de cálculo

Este último paso concierne a la documentación de los datos. Los conceptos que se documentarán son:

- Título (breve descripción del tipo de datos – punto o capa espacial SIG)
- Tipo de dato, fecha de la generación de datos, número de perfiles/taladros
- Indicador de salinidad/sodicidad
- Tipo de medición (en el campo o el laboratorio) y unidades de medición
- Tipo de solución suelo-agua (extracto de solución de suelo usada)
- Sistema de referencia de coordenadas (SCR)
- Publicación de referencia/dirección de contacto

El siguiente es un ejemplo de archivo de texto/bloc de notas de dos columnas para la documentación. Debe ser guardado como metarchivo de datos junto con el archivo de valores separados por coma (CSV) en la Figura 4.6.

Título:	Mediciones de salinidad del suelo del Norte de Sudán en 2018
Tipo de datos:	Datos puntuales de perfiles del suelo
Fecha de los datos:	De enero a junio de 2018
Perfiles:	1065 hoyos con barrenadas (0-35 cm) y 897 calicatas (0-200 cm)
Atributos:	CE (dS/m), pH(H ₂ O), PSI
Medidas de tipo:	Laboratorio (todas las mediciones fueron efectuadas en extracto de pasta saturada)
Coordenadas GPS:	WGS84 (Geográficas)
Referencia:	Mohamed Nuha (nuha75n@gmail.com; Ministerio de Agricultura, Centro de Investigación Agrícola, P.O. Box 126 Wad Medani, Sudán

4.3.2 Organización de las capas SIG

La organización de las capas SIG empieza a partir de la adquisición de las capas. Los repositorios se encuentran disponibles para descarga en línea de algunos conjuntos de datos del SIG, como las imágenes de sensores remotos, la elevación, los tipos de cobertura/uso de la tierra, el suelo y el clima. El vínculo de algunos de estos conjuntos de datos aparecen en la Cuadro 4.1. Un ejemplo de los pasos para descargar los datos SIG está disponible en el Apéndice A1. Los datos descargados son armonizados y archivados en la base de datos de entrada SIG.

4.3.3 Armonización de las capas de entrada SIG

4.3.3.1 Armonización del sistema de referencia de coordenadas

El sistema de referencia de coordenadas (SCR) define la proyección de una capa SIG. El SCR modela la superficie de la Tierra convirtiéndola en una representación 2D. Como la Tierra no es una esfera perfecta, sus superficies requieren modelos de conversión únicas para transformar un paisaje de 3D en una representación de 2D. Consecuentemente, existen diferentes modelos del SCR entre conjuntos de Latitudes y Longitudes. La organización de datos SIG procede a identificar los SCR de las capas y a armonizarlos en un modelo de proyección uniforme. Un SCR armonizado es un núcleo básico de bases de datos SIG puesto que permite la disposición de capas espaciales de diferentes conjuntos de datos para visualización (en pantalla) o para la modelación espacial subsecuente de los suelos afectados por salinidad. La *reproyección* es la terminología usada frecuentemente en el SCR para convertir un SCR en otro SCR. Se dan los siguientes pasos para reproyectar las capas del SIG:

1. Paso 1: Identificar el SCR final para usar todas las capas del SCR (conocido aquí el SCR armonizado). Es importante usar el sistema WGS 84 (grados decimales) como el SCR armonizado para todas las capas, ya que tiene parámetros uniformes en todo el mundo. Durante la reproyección, este SCR es conocido como SCR objetivo
2. Paso 2: Anotea el SCR para cada capa SIG y la necesidad individual de reproyección. Este SCR es conocido como el SCR de origen durante la reproyección
3. Paso 3: *Reproyecte* las capas como se muestra en la Figura 4.7

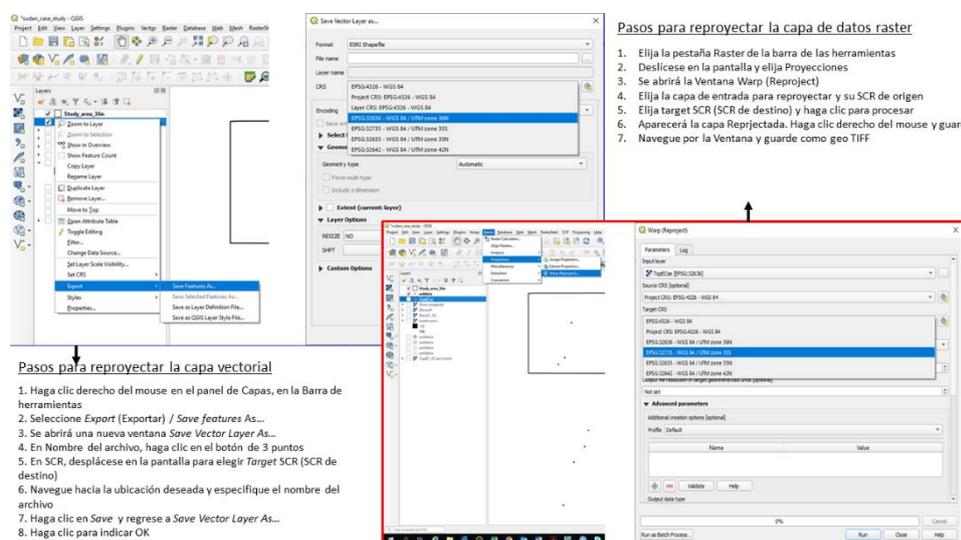


Figura 4.7: Reproyección de las capas SIG en QGIS

4.3.3.2 Armonización del formato de capas

Observe que todas las capas SIG se encuentran disponibles en el formato de archivo preferido. La mayoría de los factores formadores del suelo, como mapas de suelo, geología y tipos de cobertura de la tierra frecuentemente están disponibles como archivos vectoriales tipo polígono. Requieren la conversión del formato de archivo en datos raster, dado que la modelación espacial normalmente se realiza en formatos de archivo raster. El proceso de armonizar los formatos de las capas SIG intenta convertir los archivos vectoriales en formatos de datos raster. También busca convertir todos los archivos de la base de datos en tipos de archivos uniformes. La conversión de archivos vectoriales en datos raster es la función SIG para armonizar los polígonos vectoriales en tipos de datos raster.

La conversión de archivos vectoriales en datos raster en QGIS puede implementarse usando los módulos en las herramientas GRASS, SAGA, GDAL, QGIS Raster. Con excepción de SAGA, todos los demás módulos requieren de un atributo entero único que designan los elementos poligonales para la conversión de vectores en datos raster. Sin embargo, todos ellos producen resultados comparables para mapear los suelos afectados por salinidad. La creación de un atributo de enteros únicos puede requerir de pasos adicionales accesibles en https://docs.qgis.org/testing/en/docs/user_manual/index.html.

Algunos de las operaciones de requisitos previos antes de la armonización de datos vectoriales en datos raster incluyen la armonización de la proyección, la identificación del atributo del polígono objeto que se usará en la conversión, la decisión sobre la resolución de pixeles del objeto del mapa de datos raster final y la limpieza de las entradas faltantes, los errores de topología y los errores asociados en la entrada de datos. La Figura 4.8 ilustra los pasos para la conversión de datos vectoriales en datos raster en QGIS.

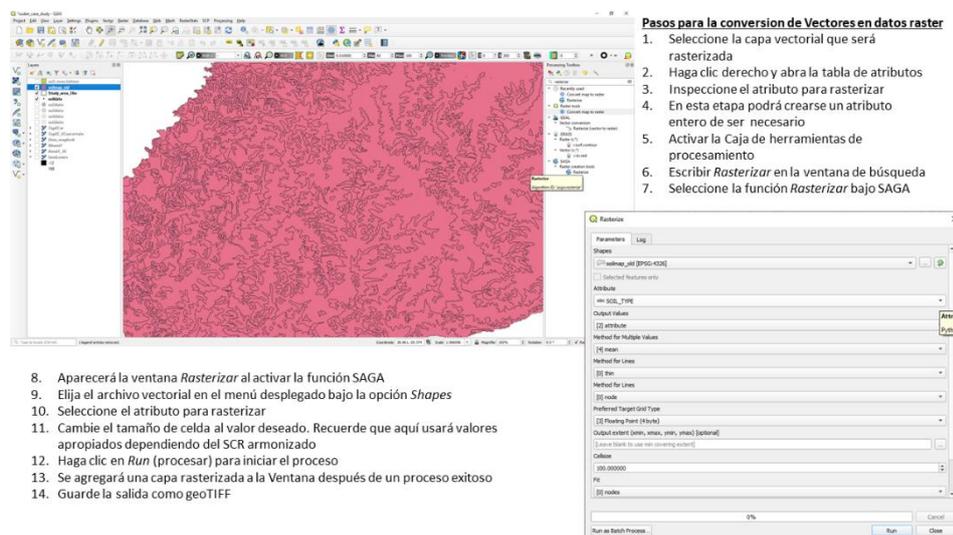


Figura 4.8: Pasos para la conversión de datos vectoriales a datos raster en QGIS

4.3.3.3 Armonización de las imágenes de sensores remotos

(1) Corrección de imágenes

Las imágenes de sensores remotos de entrada para la modelación espacial de suelos afectados por salinidad, proceden de diversas fuentes con características diferentes como la extensión espacial, los números digitales de imágenes, los Sistemas de Coordenadas de Referencia (SCR) y el formato del archivo. Los anteriores requieren de armonización antes de su integración en el proceso de modelación. La corrección de imágenes es el proceso de armonización para alinear las características de las imágenes descargadas para que coincidan con las de la base de datos SIG para mapear los suelos afectados por salinidad.

a. Paso 1: Descompresión de las imágenes descargadas

La mayoría de las imágenes descargadas están envueltas en archivos comprimidos como .zip, .rar or .gz. Es necesario desempacarlas en formatos de archivo SIG usados comúnmente como sucede con los archivos geoTIFF, ASCII, HDF, etc. Los programas computacionales como WinZip o WinRar o 7-Zip descomprimen los archivos en una carpeta de destino preferente (como C:/Salinidad/Salida). Algunas veces el archivo descomprimido aún puede contener archivos comprimidos y es necesario contar con otro tipo de extractor para abrir estos archivos SIG. Es importante que los diferentes archivos comprimidos sean descomprimidos en diferentes carpetas para evitar sobrescribir en los metarchivos y para procesar cada archivo independientemente.

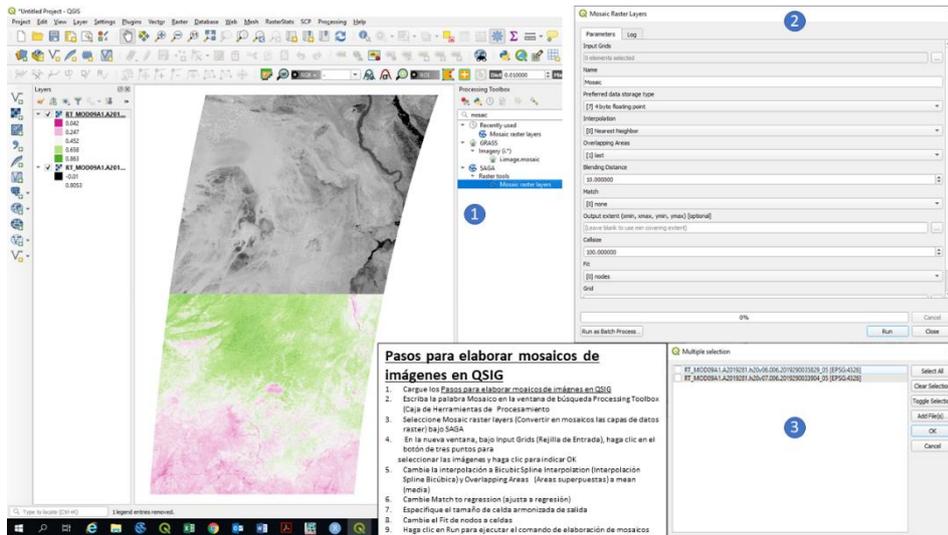


Figura 4.10: Conversión de las imágenes de los sensores remotos en mosaicos

(2) Recorte de imágenes

El recorte/corte/enmascarado de imágenes, produce un tamaño reducido de datos y adapta los productos para que se ajusten al área de interés. Los pasos para el corte de imágenes aparecen en la Figura 4.11.

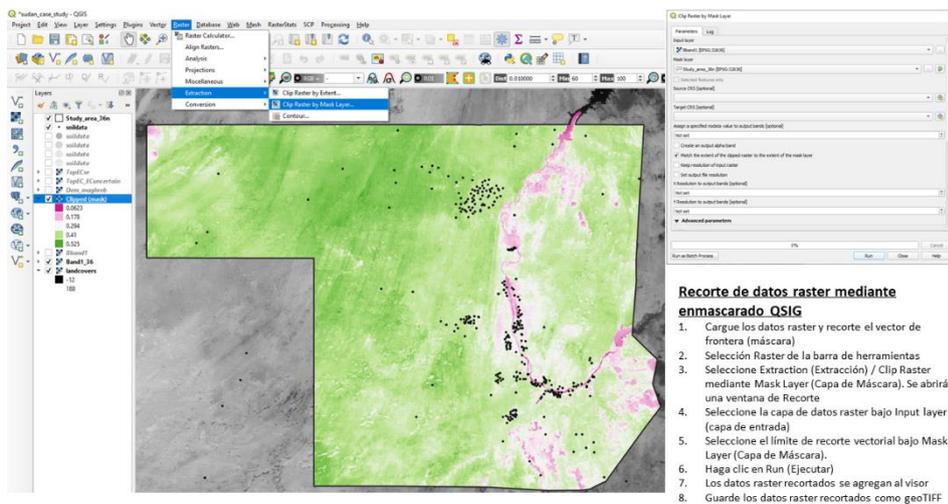


Figura 4.11: Recorte de imágenes usando QGIS

4.3.3.4 Armonización de los datos de relieve

Los datos de relieve son procesados para producir un conjunto de parámetros de terreno que influyen sobre la distribución de suelos afectados por salinidad. La literatura categoriza los parámetros como primarios o secundarios. (Wilson and Gallant, 2000). Los atributos primarios se derivan de la altitud y la ubicación direccional de la superficie topográfica. Estos incluyen pendiente, aspecto, curvatura, acumulación de flujos y áreas tributarias de flujo ascendente. Los atributos secundarios son obtenidos de la altitud y los derivados de los atributos primarios. Describen las características de la superficie relativas a la distribución del agua y la reflexión lumínica e incluyen índices como el índice de humedad topográfica, el índice topográfico compuesto, el índice de potencia de flujos, etc. (Li *et al.*, 2005). De ser necesario, se desarrolla primero una elevación sin depresión para mejorar la calidad de los parámetros derivados (Weibel and Heller, 1991).

El programa SAGA cuenta con un módulo para la derivación simultánea de 14 parámetros de terreno de entrada del modelo de elevación digital (DEM). Sus pasos de implementación aparecen en la Figura 4.12.

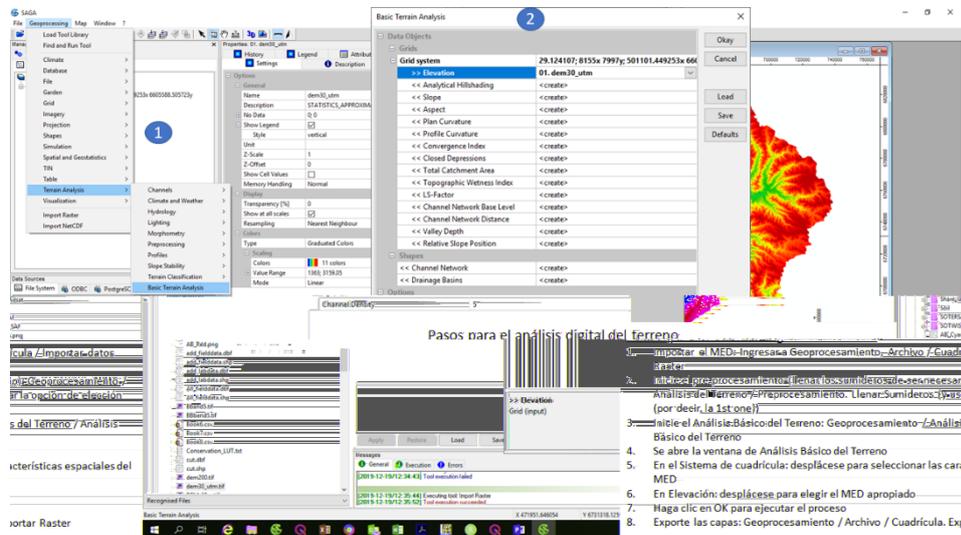


Figura 4.12: Pasos para el análisis digital del terreno en SAGA

Al lo menos dos parámetros de terreno primarios y dos secundarios son adecuados para modelar los suelos afectados por salinidad. Este libro propone la pendiente, la curvatura longitudinal, el factor LS, Nivel de Base de la Red de Canales y Profundidad del Valle, como los parámetros del terreno para mapear los suelos afectados por salinidad.

4.3.4 Base de datos SIG de entrada

La base de datos SIG de entrada, adecuadamente establecida y completa, tiene muchas ventajas en el manejo de datos, la modelación espacial y como base organizada para futuras actividades de monitoreo. La base de datos SIG para el mapeo a escala múltiple de suelos afectados por salinidad, comprende datos de entrada armonizados, documentación (metadatos) de los datos de entrada y métodos y programas de computación para acceder a los datos y para prepararlos (4.13). La base de datos es la espina dorsal para la información espacial de los suelos afectados por salinidad y por tanto debe quedar debidamente establecida y uniformada para mejorar la eficiencia en la actualización de la información, el acceso y el intercambio de datos.

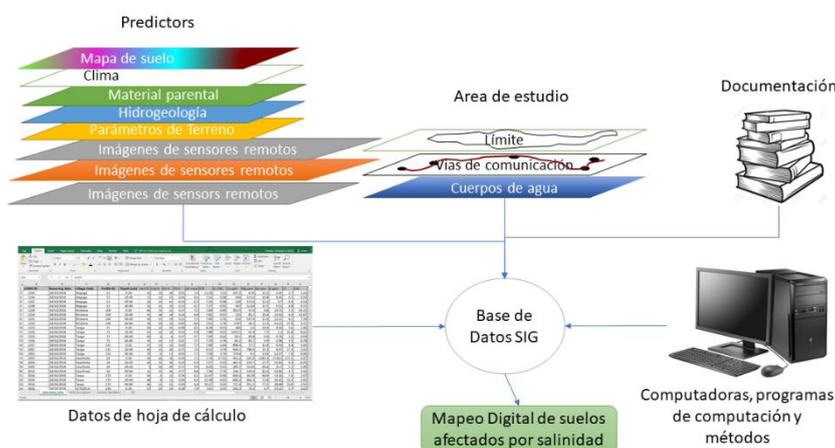


Figura 4.13: Desarrollo de la base de datos SIG para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Algunas de las características deseadas de la base de datos SIG para el mapeo de los suelos afectados por salinidad son:

- La base de datos debe tener datos representativos (capas de datos raster) de los factores formadores del suelo, información complementaria sobre otras causas de los problemas de salinidad en el suelo (como las aguas subterráneas y las áreas riego) y los indicadores de los suelos afectados por salinidad.
- Todos los métodos para la transformación de datos y metadatos deben ser documentados
- Todos los datos de entrada (no procesados) deben ser archivados en carpetas de entrada (*Input folder*) seguras y protegidas de modificaciones inadvertidas de datos. Los datos procesados deben ser guardados en la Carpeta de salidas (*Output folder*) que también será el *directorio de trabajo*.
- Todos los archivos de datos raster SIG deben ser armonizados para integrar un SCR y una resolución de pixeles comunes.

La lista de mapas ILWIS es una herramienta apropiada para garantizar que todas las capas de datos raster armonizadas tengan un SCR y una resolución de pixeles uniformes. A diferencia de otros programas de computación SIG que pueden permitir (forzar) sobreposiciones en pantalla aún para características de capas diferentes, ILWIS nunca sobrepondrá capas no armonizadas. Además, también puede facilitar estadísticas multivariantes y la armonización de la distribución estadística de las capas. La Figura 4.15 contiene los pasos para crear una lista de mapas de capas de datos raster armonizadas.

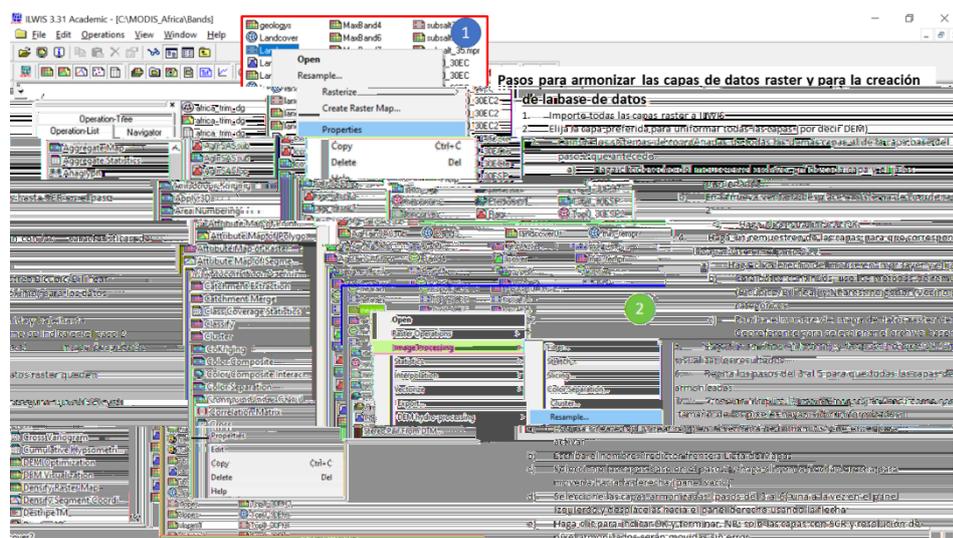


Figura 4.14: Creación de una base de datos armonizada SIG en ILWIS

La base de datos SIG final deberá contener:

1. Datos del suelo en una hoja de cálculo. Contendrá por lo menos las siguientes variables: Muestra, Calicatas, Longitud, Latitud, Profundidad, Superior, Inferior, Horizonte, CE, pH, PSI
2. Capas SIG. Estos datos deben tener como mínimo las siguientes capas
 - a. Parámetros de relieve: Elevación (MED), pendiente (slope), factor de longitud de la pendiente (ls) red de canales, red de canales a nivel de cuenca (cnbl), curvatura longitudinal (loncurve), y profundidad del valle (valley)
 - b. Bandas de imágenes de los sensores remotos: Banda azul (BBlue), Banda verde (BGreen), Banda roja (Bred), Banda infrarroja (BIRed), banda de onda corta 1 (swir1) y banda de onda corta 2 (swir2)

- c. Cobertura (lcover)
- d. Climate: precipitaciones (rain), temperatura máxima (maxtemp), y temperatura mínima (mintemp)
- e. Geología (geology)
- f. Hidrogeología (pgeology)
- g. Mapa de suelos (soilmap)
- h. Erosión (erosion)

5 Enfoque de mapeo global impulsado por los países

5.1 Antecedentes

El enfoque impulsado por los países para mapear los suelos afectados por salinidad se basa en el mapeo de indicadores respaldada por las causas de suelos afectados por salinidad y modelos para su clasificación. El enfoque integra y aprovecha el potencial de otros métodos de mapeo. También ofrece la cuantificación de la precisión y la incertidumbre de mapeo, que son cada vez más aceptadas como una práctica estándar por la comunidad de las ciencias del suelo. Además, facilita la construcción de la información espacial sobre indicadores y causas, así como de la información sobre el estado de los suelos afectados por salinidad a múltiples escalas. Sin embargo, estas ventajas vienen a costa de la demanda de datos. Es posible que algunos de los datos de entrada requeridos como son indicadores de suelos (PSI e iones solubles) no puedan obtenerse con facilidad en muchos territorios.

El mapeo global impulsado por los países es un enfoque de tres pasos basado en la armonización de los datos de entrada, el modelado espacial de los indicadores de suelo de entrada, utilizando predictores espaciales y la clasificación de los suelos afectados por salinidad (Figura 5.1).

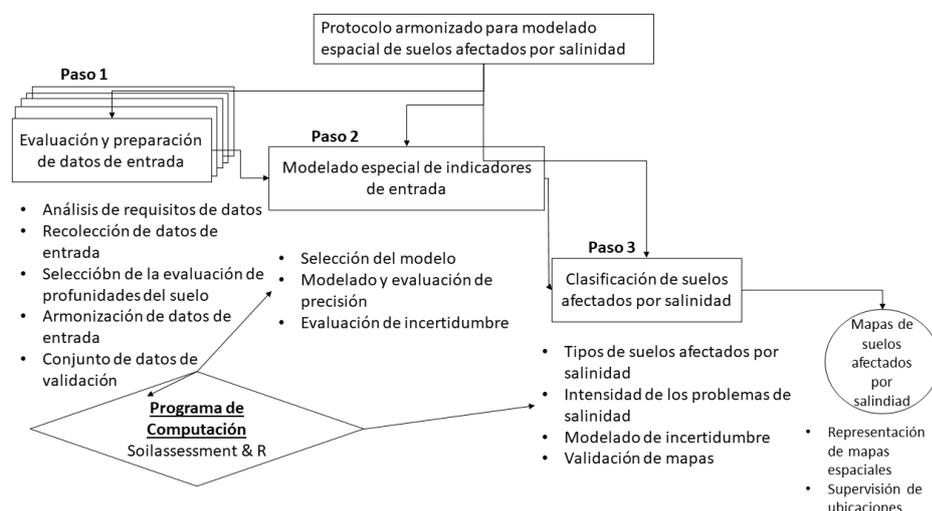


Figura 5.1: Enfoque multiescala para el mapeo nacional de suelos afectados por salinidad basado en mapas de indicadores

El enfoque hace hincapié en los datos medidos del suelo (CE, pH, y PSI) como los principales indicadores del suelo para la clasificación de los suelos afectados por salinidad. Estos datos de suelo de entrada son modelados espacialmente para producir mapas de indicadores de suelos afectados por salinidad. Se seleccionan los esquemas de clasificación adecuada para clasificar los mapas de indicadores en mapas de suelos afectados por salinidad (Figura 5.1).

El programa de computación R, y sus paquetes distribuidos, es el principal programa de computación para implementar el protocolo del mapeo global impulsado por los países. En la Cuadro 5.1 se incluye un resumen de los paquetes clave para implementar los diversos pasos del protocolo. El programa de computación RStudio (<https://rstudio.com/products/rstudio/download/>) se utiliza como un ambiente de desarrollo integrado para apoyar la implementación de los paquetes en R.

Cuadro 5.1: Paquetes R y su aplicación en el mapeo multiescala de suelos afectados por salinidad

Área de aplicación del protocolo cartográfico	Paquete	Referencia del paquete
Editor de texto (para <i>scripting</i> y documentación)	RStudio (como ambiente de desarrollo integrado y no como un paquete)	RStudio Team (2015)
Importación y exportación de datos de entrada (incluyendo análisis de datos SIG)	<i>rgdal</i>	Bivand <i>et al.</i> (2019)
	<i>raster</i>	Hijman (2020)
	<i>sp</i>	Pebesma y Bivand (2020)
Armonización	<i>soilassessment</i>	Omuto (2020)
	<i>GSIF</i>	Hengl (2019)
	<i>Car</i>	Fox <i>et al.</i> (2020)
Modelado espacial (incluyendo evaluación de precisión e incertidumbre)	<i>Caret</i>	Khun (2020)
	<i>soilassessment</i>	Omuto (2020)
	<i>sp</i>	Pebesma y Bivand (2020)
Clasificación de los problemas de salinidad	<i>soilassessment</i>	Omuto (2020)

Estos paquetes y sus dependencias se instalan utilizando los siguientes comandos en R:

```
>install.packages(c("raster", "sp", "rgdal", "car", "carData", "dplyr", "spacetime", "gstat", "automap", "randomForest", "fitdistrplus", "e1071", "caret", "soilassessment", "soiltexture", "GSIF", "aqp", "plyr", "Hmisc", "corrplot", "factoextra", "spup", "purrr", "lattice", "ncf", "npsurv", "lsei", "qrrn", "nnet", "mda", "RColorBrewer", "vcd", "readxls", "maptools", "neuralnet", "psych"))
```

```
>library(sp); library(foreign); library(rgdal); library(car);library(carData); library(maptools)
library(spacetime);library(gstat);
library(automap);library(randomForest);library(fitdistrplus);
library(e1071); library(caret); library(raster);library(soilassessment); ibrary(soiltexture);
library(GSIF); library(aqp); library(plyr); library(Hmisc); library(corrplot); library(factoextra)
library(spup); library(purrr); library(lattice);library(ncf);library(npsurv); library(lsei); library(nnet);
library(class); library(mda);library(RColorBrewer);library(vcd); library(grid);
library(neuralnet);library(readxsl); library(psych);library(qrrn); library(dplyr)
```

Es importante considerar los siguientes puntos al implementar el protocolo cartográfico en la Figura 5.1 en R.

- R es un programa de computación basado en *scripting* que distingue entre mayúsculas y minúsculas. Más del 90% de sus comandos son scripts en un editor de textos y ejecutados al correr la línea/script.
- Hash (#) denota el inicio de un comentario y el programa de computación no lo ejecuta. Por lo tanto, puede utilizarse para insertar comentarios en una línea. Todos los comentarios posteriores a hash (#) se colorean en verde (como la luz verde del semáforo) que implica “pasar” sin ejecución.
- Los errores y advertencias se dan en rojo, mientras que las funciones y número se proporcionan en azul, y los comandos y variables se dan en negro.
- Al utilizar el editor de textos RStudio, están disponibles cuatro paneles: el panel superior izquierdo es la ventana de edición de texto; el panel superior derecho es para el ambiente de datos e historial; el panel inferior derecho es para vista y ayuda/ficheros/paquetes, y el panel inferior

izquierdo es la consola para ejecutar los scripts.

- Los scripts implementados y los reportes (advertencias o errores) se muestran en el panel de consola.
- Algunos comandos pueden correr por algún tiempo y se recomienda paciencia para permitirle al programa de computación continuar hasta que termine. Durante este tiempo, se mostrará un icono rojo en la esquina superior izquierda del panel de consola.

5.2 Paso 1: Armonización de los datos de entrada

En este punto se realiza la armonización de datos de entrada para: 1) armonizar los indicadores de suelo con aquellos del extracto de pasta saturada del suelo, 2) armonizar la distribución estadística con la distribución normal, y 3) armonizar las profundidades del suelo en el intervalo de 0-30 cm, 30-100 cm, y 100-200 cm (y más dependiendo de las profundidades del suelo). Estos pasos de armonización complementan aquellos realizados durante la preparación de los datos de entrada.

5.2.1 Armonización de las capas SIG

Paso 1-1: Importe los datos

Comience por configurar el directorio de trabajo. Esta es una recomendación que se basa en el anterior desarrollo de la base de datos, en la que los datos procesados de entrada se guardaban en la carpeta de salida (*C:/salinity/output*) en la Sección 4.3.4.

```
> setwd("C:/Salinity/Output") # Configurando el directorio de trabajo
> soil=readOGR(".", "soildata") # Importando soildata.shp como shapefile
```

Los datos de la hoja de cálculo también pueden importarse directamente como datos excel o CSV utilizando comandos adecuados como `soil = read_xlsx ("soildata.xlsx")` para importar MS Excel, o `soil=read.csv("soildata.csv",header=T)` para importar el tipo de archivo CSV. Los archivos raster en SIG son importados utilizando ya sea la función `readGDAL` o la función `raster`. Ambas funciones aceptan muchos formatos de archivo raster en SIG como son geotif, ILWIS, ASCII, etc. Cuando se utiliza la función `readGDAL`, en primera instancia es utilizada para crear un espacio de apilamiento para capas subsecuentes. Por lo tanto, no tiene el signo "\$" al final de los *predictores* y no tiene "\$band1" al final de la línea de importación. La función es única si (1) no acepta la importación de la pila de capas de distintas dimensiones en términos de extensión espacial y tamaños de píxeles y (2) automáticamente crea un apilamiento (aquí conocido como *predictores*) para las capas de entrada de SIG. Posteriormente, es una función preferida para garantizar la conformidad de datos de entrada. Si se utiliza la función `raster`, puede ser necesario volver a muestrear las capas, en caso de posibles diferencias en dimensiones que puedan posteriormente introducir errores de modelado. Todas las capas SIG de entrada importadas deben ser llamadas como corresponde (dem, slope, ls, loncurve, cnbl, valley, rain, lcover, geology, pgeology, BBlue, BGreen, BRed, BIRed, swir1, swir2, etc.)

```
> predictors=readGDAL("dem.tif")
> predictors$slope=readGDAL("SLOPE.mpr")$band1
> predictors$ls=readGDAL("ls.asc")$band1
> predictors$valley=readGDAL("valley.mpr")$band1
> predictors$geology=readGDAL("geology.mpr")$band1
....
> predictors$BBlue=readGDAL("BBlue.mpr")$band1
> predictors$swir1=readGDAL("swir1.asc")$band1
> predictors$swir2=readGDAL("swir2.tif")$band1
```

```
> predictors$dem=predictors$band1 # para reemplazar la primer capa
> predictors$band1=NULL # para eliminar la capa reemplazada
```

Paso 1-2: Verifique los datos buscando valores únicos, y elimínelos en caso de ser posible

```
> summary(predictors)
# Objeto de clase MarcoDatosCuadrículaEspacial
# Coordenadas:
#      min      máx
# x      -75674.99  417325
# y 1883692.112443692
# Is projected: TRUE
# proj4string :
# [+proj=utm +zone=36 +datum=WGS84 +units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0]
# Grid attributes:
#      cellcentre.offset cellsize cells.dim
# x      -75176 997.9757          494
# y      1884191 998.2175          561
# Data attributes: #      dem
# Min.      :176.0      loncurve      Min.      :-1.000e-07      Min.      Is      :0.000002      Min.      cnbl      :1
78.6
# Q1      292.5      Q1:-1.000e-07      Q1.:0.011727      Q1.:27
9.4
# Mediana :      342.9      Mediana :-1.000e-07      Median :0.033486      Mediana :32
6.9
# Media   :      349.7      Media    :1.170e-06      Media    :0.053562      Media    :33
2.3
# Q3:      399.1      Q3: 1.149e-06      Q3: 0.062155      Q3 :38
0.0
# Máx.    :1064.6      Máx.     :      3.295e-04      Máx.     :7.043770      Máx.     :
1.0
# .....
#      swir1  swir2
# Min.    :0.008162      Min.     :0.002062 Q1      BBlue   :0.009072      BGreen  :0.
01625
# Q1 :0.554471 11551      :0.533823      Q1 :0.426480      Q1 :0. Mediana :0.
# Mediana :0.625109
13294
# Media   :0.604679      Media    :0.582251      Media    :0.462953      Media    :
13189
# Q3 :0.676205 15002      Q3 :0.650973      Q3 :0.516825      Q3 :0.
# Máx.    :0.868268      Máx.     :0.838160      Máx.     :0.679898      Máx.     :
22036
```

Elimine los NAs (No Asignados, en adelante NAs) en caso de que ocurran debido al clipping de datos

```
> predictors$slope=ifelse(is.na(predictors$slope),mean(!is.na(predictors$slope)),predictors$slope)
```

También puede ser necesario comprobar la distribución estadística de las capas SIG si es necesario armonizarla. La función *hist* (histograma) se utiliza para facilitar la evaluación visual del sesgo y la necesidad de normalización.

En el conjunto de datos de la muestra del estudio de caso, las capas de la pendiente y de la precipitación mostraron una distribución sesgada y están normalizadas con la raíz cuadrada y la transformación logarítmica, respectivamente. Otros modelos de transformación pueden probarse para otros conjuntos de datos.

Verifique la distribución de la frecuencia de las capas SIG

```
> hist(predictors@data[,c("dem","slope","loncurve","cnbl","valley","lcover","rain","geology","pgeology")])
```

Paso 1-3: Derive los índices de los sensores remotos

Paso 1-3: Derive los índices de los sensores remotos

Los índices de las imágenes de los sensores remotos de la [Cuadro 3.1](#), relacionados con las características de la superficie/evidencias de problemas de salinidad, se determinan utilizando la función de índices de imágenes con el paquete *soilassessment*. Utiliza siete bandas de entrada de los datos de sensores remotos, que ahora deberían estar en la pila de capas de *predictores*. Se especifican en el script utilizando el símbolo "\$" con los predictores.

```
> predictors$SI1=imagenIndices(predictors$BBlue,predictors$BGreen,predictors$BRed,predictors$BIRed,predictors$swir1,predictors$swir2,"SI1")
```

```
#      Min. Q1      Mediana      Media Q3      Máx. # 0.03426 0.16152 0.18227 0.17972 0.20203  
0.28645
```

```
> predictors$SI2=imagenIndices(predictors$BBlue,predictors$BGreen,predictors$BRed,predictors$BIRed,predictors$swir1,predictors$swir2,"SI2")  
;summary(predictors$SI2)
```

```
#      Min. Q1      Mediana      Media Q3      Máx. # 0.02974 0.31104 0.34469 0.33663 0.37158  
0.50973
```

Continue para completar los 13 índices de imágenes (véase el apéndice A y [Cuadro 3.1](#)).

```
> predictors$BI=imagenIndices(predictors$BBlue,predictors$BGreen,predictors$BRed,predictors$BIRed,predictors$swir1,predictors$swir2,"BI");summary(predictors$BI)
```

```
# Min. Q1      Mediana Media Q3 Máx.  
# 0.1113 0.5757 0.6454 0.6302 0.7039 0.9405
```

Cualquiera de los NAs producido durante el cálculo de los índices de la imagen, también puede ser eliminado usando el comando en el *Paso 1-2*. En total, se producen al menos 13 capas de índices de imágenes. Este número puede reducirse utilizando el análisis multivariado de los componentes principales (PCA por sus siglas en inglés). En el siguiente paso se evalúa la distribución estadística de los índices de imagen y se armonizan con la distribución normal, lo cual es un requisito previo para la reducción de datos de PCA.

Paso 1-4: evalúe la distribución estadística y armonice cuando sea necesario

```
> hist(predictors@data[,24:29]) # Figura 5.2
```

```
> summary(predictors$SI6)
```

```
#      Min. Q1 Mediana      Media Q3      Máx. # 0.003647 0.940943 1.129692 1.068303 1.2321061.663694
```

```
> predictors$BI=sqrt(predictors$BI)
```

```
> hist(predictors$BI)
```

Los índices VSSI y BI de la imagen, muestran un sesgo ligero. Se encontró que la prueba con la transformación de raíz cuadrada normalizó adecuadamente los datos. Aunque el modelo de transformación se prueba arbitrariamente en esta etapa, es mejor utilizar modelos robustos como la transformación Box-Cox (Box y Cox, 1964).

Paso 1-5: Realice PCA y seleccione los primeros PCs que representan más del 95% de la variación de los índices de la imagen

Después de normalizar los índices de la imagen, se seleccionan y se convierten en un marco de datos para permitir la determinación de la correlación y el análisis de los componentes principales. Posteriormente, los PCs (Componentes Principales por sus siglas en inglés) seleccionados se convierten de nuevo a la pila raster.

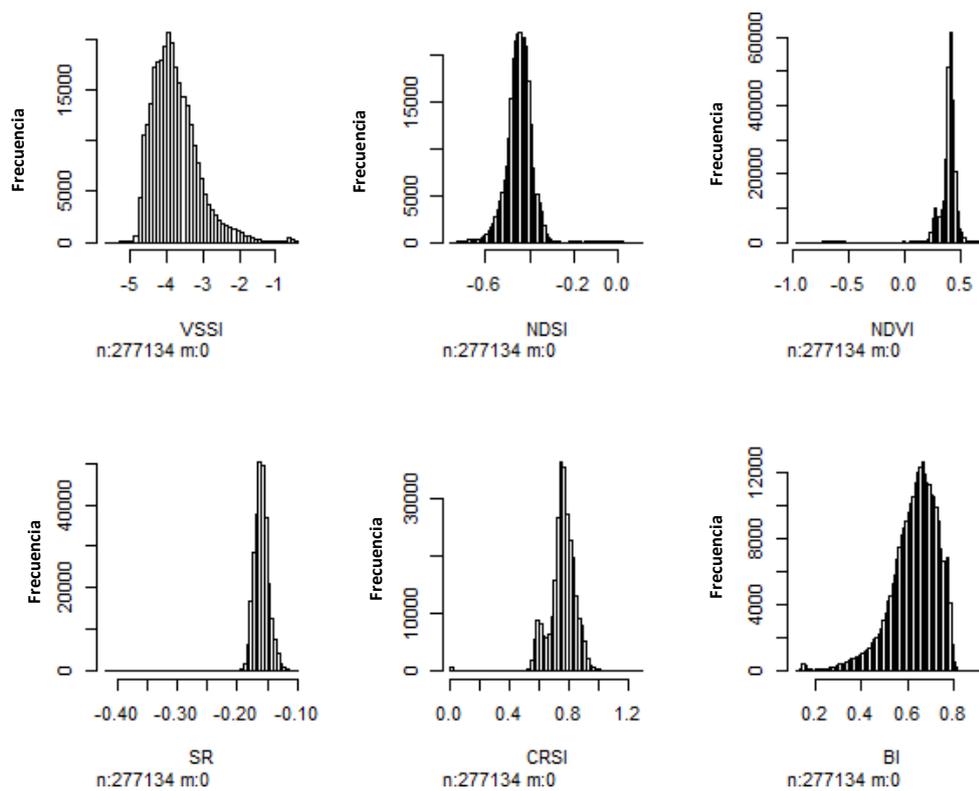


Figura 5.2: Distribución estadística empírica de los índices de la imagen a partir del conjunto de datos del estudio de caso de Sudan

Extraiga las capas de imagen

```

> predictors=predictors@data[,c("SI1","SI2","SI3","SI4","SI5","SI6","
SAVI","VSSI","NDSI","NDVI","SR","SCRI","BI")]
> soil.cor=cor(predictors)
> corrplot(soil.cor,method="number",number.cex = 0.8) # Figura5.3a
> pca<-prcomp(predictors[,], scale=TRUE)
> fviz_eig(pca) # Figura 5.3b

```

El gráfico de correlación (Figura 5.3b) muestra la correlación entre los índices de la imagen. Por ejemplo, SI1 y SI2 tienen un índice de correlación Pearson igual a 86%. El PCA examina estas correlaciones y determina los ejes principales en donde los datos están altamente correlacionados. Estos ejes también se conocen como componente principal (o dimensiones en la Figura 5.3b). La Figura 5.3 es importante para orientar la elección de PCs para representar la totalidad de las (13) capas de índices de imagen.

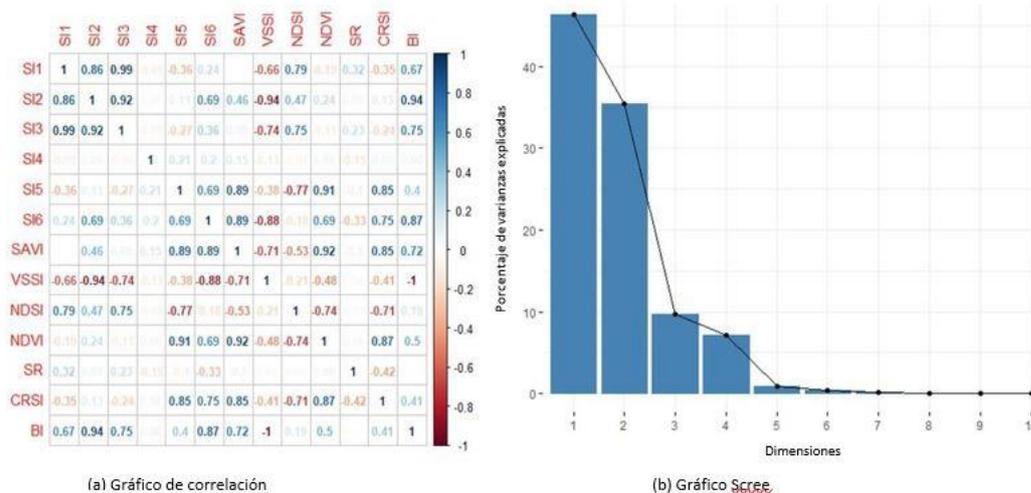


Figura 5.3: Correlación de los índices de la imagen y gráfico scree de sus componentes principales

En la Figura 5.3b, la suma acumulada de los primeros 4 PCs (Dimensiones) suman más del 95% de la variación explicada en las 13 capas totales de los índices de a imagen. Por lo tanto, este enfoque puede utilizarse en cualquier conjunto de índices de las imágenes, para seleccionar el número apropiado de PCs para reducir el volumen de datos.

Regrese los PCs seleccionados a la pila raster para completar el proceso de armonización

```
> Pred.pcs<-predict(pca,predictors[])
> predictors@data$PCA1=Pred.pcs[,1]
> predictors@data$PCA2=Pred.pcs[,2]
> predictors@data$PCA3=Pred.pcs[,3]
> predictors@data$PCA4=Pred.pcs[,4]
```

5.2.2 Armonización de los datos de entrada de suelo

Paso 1-6a: Armonice las mediciones del indicador de entrada con aquellas para el extracto de pasta saturada del suelo

Se pueden utilizar muchos métodos para determinar la CE. Entre los que se incluyen: (1) el uso de extracto de pasta saturada del suelo; (2) usando otros extractos; (3) uso de modelos de pedotransferencia de otras propiedades del suelo, o (4) inducción electromagnética. La armonización busca estandarizar los métodos 2, 3 y 4 con valores equivalentes al método 1 pues los esquemas de clasificación popular utilizan valores obtenidos por el método 1.

(1) Ejemplo de armonización utilizando modelos conocidos en la Cuadro 3.5 (en el Capítulo 3)

#Paso 1-6b: Cargue la librería e importe los datos del suelo

Nota: Esta parte tiene la finalidad de ilustrar los pasos para armonizar la CE. Los datos del estudio de caso de hecho contienen CE tal como se obtiene mediante el método de extracto de pasta saturada del suelo y no requieren armonización. Es necesario dar una rápida vista a la estructura de datos para establecer la disponibilidad y formato para las variables objetivo (CE, componentes de textura y carbón orgánico). La función *str* extrae la estructura de datos.

```
> str(soil)
'data.frame':192 obs. of      14 variables:
 $ Sample      : int      1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ...
 $ Pits        : int      1 1 2 3 4 5 6 6 7 8 ...
 $ Longitude: num      62.2 62.2 62.2 62.2 62.2 ...
 $ Latitude : num      30.2 30.2 30.2 30.2 30.2 ...
 $ Upper      : int      0 20 0 0 0 0 0 40 0 0 ...
 $ Lower      : int      20 100 30 30 30 30 40 100 30 40 ...
 $ Horizon    : Factor w/ 2 levels "A","B": 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 ...
 $ CE        : num      1.16 1.63 0.499 0.295 0.161 0.8 1.85 0.938 0.167
 0.141 ...
 $ PH        : num      8.3 8.71 8.64 8.72 9.14 8.6 8.86 8.95      8.83 9.45 ...
 $ PSI       : num      3.61 7.16 2.76 2.26 1.56 ...
 $ Sand      : num      51 45.2 45.2 55.2 67.2 43.2 45.2 49.2      49.2 85.2 ...
 $ Silt      : num      38 44 39 32 20 44 39 36 31 2 ...
 $ Clay      : num      11 10.8 15.8 12.8 12.8 12.8 15.8 14.8      19.8 12.8 ...
 $ OC        : num      0.21 0.32 0.24 0.66 0.23 0.36 0.17 0.05 1.37 0.12
 ...
```

Los datos parecen tener las variables requeridas para armonizar los valores de CE. El primer paso en la armonización es derivar las clases de textura del suelo. Las funciones para derivar las clases de textura del suelo no aceptan NAs en los datos. Por lo tanto, se deben comprobar y eliminar de la lista de variables que contengan los componentes de la textura. Esto se hace creando primero una columna ficticia [dummy column] para sumar los componentes de la textura y utilizando este dummy para elegir sólo las entradas de datos, sin que falten entradas (es decir, NA). En el conjunto de datos del estudio de caso, los componentes de la textura aparecen en las variables número 11 (Arena), 12 (Limo) y 13 (Arcilla) (Tenga en cuenta que hay 14 variables en total).

#Paso 1-6c: Compruebe si faltan datos y seleccione sólo el conjunto de datos completo

```
> variable.names(soil[11]);variable.names(soil[12]); variable.names(soil[13]);
> soil$dummy= rowSums(soil[, 11:13])
> soil1=subset(soil,!is.na(soil$dummy))
> soil1$dummy=NULL # elimine el dummy
> soil0=data.frame(soil1)
```

#Paso 1-6c: Cree y codifique las clases de textura

```
> SSCP=soil0[,c("Clay","Silt","Sand")]
> names(SSCP) = c('CLAY', 'SILT', 'SAND')
> SSCP = round(SSCP, 2)
> SSCP_norm = TT.normalise.sum(tri.data = SSCP[,1:3], residuals = T)
> colnames(SSCP_norm)[1:3] = paste0(colnames(SSCP_norm)[1:3],"_nm")
> SSCP = cbind(SSCP, round(SSCP_norm, 2))
> SSCP$CLAY=SSCP$CLAY_nm;SSCP$SILT=SSCP$SILT_nm;SSCP$SAND=SSCP$SAND_nm
> rm(SSCP_norm)
> soil0=cbind(soil0,"TEXCLASS" =TT.points.in.classes(tri.data =SSCP[, c('CLAY', 'SILT', 'SAND')],class.sys
= "USDA.TT",
PiC.type
="t",collapse
= ', '))
> soil0$TEXCLASS=as.factor(soil0$TEXCLASS)
> soil0$TEXCLASS1=as.numeric(soil0$TEXCLASS)
> summary(soil0$TEXCLASS)
> rm(SSCP)
> soil0$TEXCLASS=car::recode(soil0$TEXCLASS,"Lo, iLo='SiLo'") # Aquí, las clases dobles se cambian una a la vez
> summary(soil0$TEXCLASS)
  Cl      Lo Lo, SiLo      LoSa      SaClLo      SaLo      SiLo
  2      51      2      9      1      104      22

> soil0$TEXCLASS1=dplyr::recode(soil0$TEXCLASS,Cl=1, ClLo =7, Lo=11, LoSa=10, Sa=12, SaCl=8,
SaClLo=9,SaLo=5, SiCl=2,SiClLo=3,SiLo=4,Si=6,CS=13,MS=14,HCL=16,FS=15)
> summary(soil0$TEXCLASS1)
Min.      Q1.      Mediana      Media Q3      Máx. 1.000      5.000 5.000      6.691      11.000
      11.000

> soil1=soil0
```

#Paso 1-6d: Armonización de la CE

Es importante señalar nuevamente que las variables de las muestras del estudio de caso se determinaron con base al extracto de pasta saturada del suelo. Por lo tanto, los ejemplos de armonización que se dan aquí tienen por objeto demostrar la aplicación del script. Supongamos que el CE se determinó a partir de un extracto de suelo 1:1, entonces el siguiente script se utiliza para armonizar los valores de CE:

```
>
soil1$CEse1=CEconversion1(soil1$CE,soil1$OC,soil1$Clay,soil1$texture1,"1:1","FAO")
> summary(soil1$CEse1)
```

Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Máx.	NA's
0.4912	2.0461	4.0769	10.5302	9.8501	108.8235	1

(2) Ejemplo de armonización utilizando la función de pedotransferencia

#Paso 1-6e: Armonización de la CE

La función de pedotransferencia (PTF) es una función para estimar la propiedad del suelo utilizando la relación funcional entre esta propiedad (conocida como una variable objetivo, como la CE_{SE}) y otras variables del suelo fáciles de medir como la textura, el carbono, etc. Supongamos que unas pocas muestras tienen mediciones de CE_{SE} , entonces se construye una PTF entre CE_{SE} y las otras propiedades del suelo. La función PTF se almacena y se utiliza posteriormente para estimar la CE_{SE} de todas (o de futuras) muestras del área de estudio. El paquete *soilassessment* tiene la función de pedotransferencia para construir PTF. Esta función proporciona modelos alternativos como lineal, randomforest, máquina de vectores de apoyo, redes neuronales, etc. para modelar la relación entre la variable del suelo objetivo y sus predictores. El primer término en la función de *pedoTransfer* especifica el modelo preferido, tal como *randomforest*, *svm*, *neuralnetwork*, *linear*, etc. El segundo término especifica el marco de datos que contiene el conjunto de datos de calibración. Este marco de datos no debe tener NAs en ninguna de las variables para desarrollar el modelo de pedotransferencia. Los últimos términos son una lista ilimitada de variables de predicción, que están separadas por una coma. Sus connotaciones deberían ser como los nombres de las variables en el marco de datos.

```
> soil2=soil1[sample(nrow(soil1)), ][1:(floor((nrow(soil1)/4)*1)), ]
> soil2=subset(soil2,lis.na(soil2$CEse))
> CE.ptf=pedoTransfer("randomforest",soil2,CEse,Sand,OC,Clay)
> soil1$CEpf=predict(CE.ptf,newdata=soil1)#agregue CEse armonizada equivalente
> plot(soil1$CEse,soil1$CEpf)
> abline(a=0,b=1,lty=20,col="black")
```

(3) Ejemplo de armonización de la conductividad eléctrica aparente del suelo

#Paso 1-6f: Armonización de la CE

La conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) se mide en campo utilizando sensores proximales como EMI. Es posible obtener muchos puntos de datos muestreados con este enfoque de medición de la CE debido a su rápida naturaleza. Sin embargo, los valores de la CEa medidos necesitan ser calibrados con CE_{SE} medidos para armonizarlos. La armonización es un proceso de dos pasos en el que el modelo de calibración se construye primero entre muestras seleccionadas con CEa y CE_{SE} , y luego el modelo se aplica al resto de la CEa para estimar la CE_{SE} equivalente. En el paquete *soilassessment*, la función *CEconversión3* facilita este tipo de armonización. Los siguientes scripts demuestran cómo usar la *CEconversión3* para armonizar la CEa con la CE_{SE} . Un diagrama de dispersión de CEa con CE_{SE} es importante para orientar la elección del modelo de enlace. En el ejemplo proporcionado, se asume una

relación fuerte como el modelo de enlace entre el CEa y CE_{SE} (Figura 5.4). Otras opciones de enlace como lineal, exponencial, logarítmica, etc. también se proporcionan en el *CEconversion3* (Omuto, 2020).

```
> plot(CEse~CEa,soil2)#Tochooseasuitablepredictivemodel#(Figura 5.4)
> CE3.ml=nls(CE~CEconversion3(CEa,A,B,"power"),start=c(A=0.1, B=0.8), data=soil2)
> soil$CEse3=CEconversion3(soil$CE,coef(CE3.ml)[1], coef(CE3.ml)[2],"power")
```

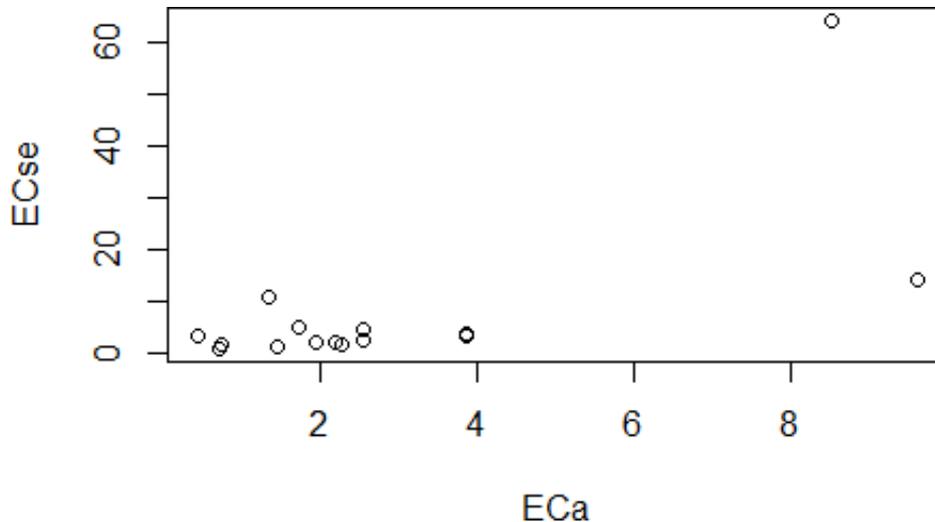


Figura 5.4: Ilustración gráfica de la relación entre CE aparente y medida

#Paso 1-7: Armonice las profundidades del suelo

La armonización de la profundidad del suelo tiene por objeto desarrollar la información sobre el suelo para lograr una profundidad uniforme en todos los datos del suelo. La profundidad uniforme facilita la comparación de los problemas de salinidad a lo largo del perfil y horizontalmente en todo el paisaje. Esta armonización se logra con el enfoque de *spline* integrador de profundidad (Bishop *et al.*, 1999). La herramienta para implementar el enfoque se encuentra en el paquete *GSIF* (Hengl, 2019).

```
> lon=soil1$Longitude
> lat=soil1$Latitude
> id=soil1$Pits
> top=soil1$Upper
> bottom=soil1$Lower
> horizon=soil1$Horizon
> CEdp=soil1$CE
> prof1=join(data.frame(id,top,bottom, CEdp, horizon),data.frame(id,lon,lat),type="inner")
Se une mediante: id
> depths(prof1)=id~top+bottom Mensaje de
advertencia:
convertir IDs de factor a caracter
> site(prof1)=~lon+lat
> coordinates(prof1) = ~lon+lat
> proj4string(prof1)=SCR("+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs")
> depth.s = mpspline(prof1, var.name= "CEdp", lam=0.8,d = t(c(0,30,10 0,150)))
Ajustar los splines de preservación de masa por perfil...

|=====| 100%
> plot(prof1, color= "CEdp", name="horizon",color.palette = rev(brewer.pal(8,
'Accent')),par=c(cex.lab=2.0)) #Figura 5.5
```

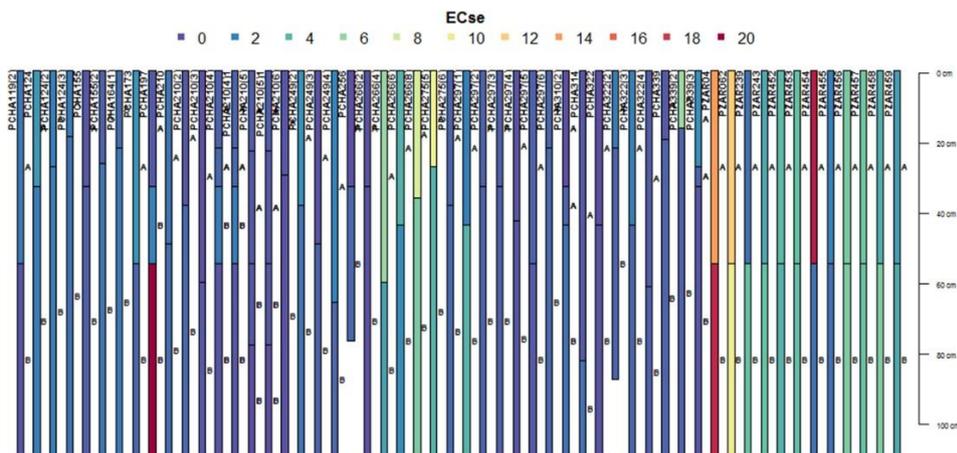


Figura 5.5: Ejemplo de armonización de la profundidad para CE_{sep}

#Paso 1-8: Extraiga los datos del suelo armonizados en profundidad y vuelva a proyectar

- > soilhrmdepths=data.frame(depth.s\$idcol,depth.s\$var.std,check.names = TRUE)
- > soil2=merge(soil1,soilhrmdepths,by=intersect(names(soil1),names(soilhrmdepths)),by.x="Pits",by.y="depth.s.idcol",all=TRUE)
- > coordinates(soil2)=~Longitude+Latitude
- > proj4string(soil2)=SCR("+proj=longlat+datum=WGS84")*#Conecte SCR a los datos*

Armonice el SCR y asegúrese del utilizar +proj +zone correctos para el área de estudio

- > soil1=spTransform(soil2,SCR("+proj=utm +zone=36 +ellps=WGS84 +units=m +no_defs"))
- > soil1=soil2
- > hist(soil1\$CE)
- > soil1=subset(soil1,lis.na(soil1\$CE))
- > bubble(soil1,"X0.30.cm", main="Harmonized CE (0-30 cm)") *#Figura5. 6*

H_i EC armonizada (0-30 cm)

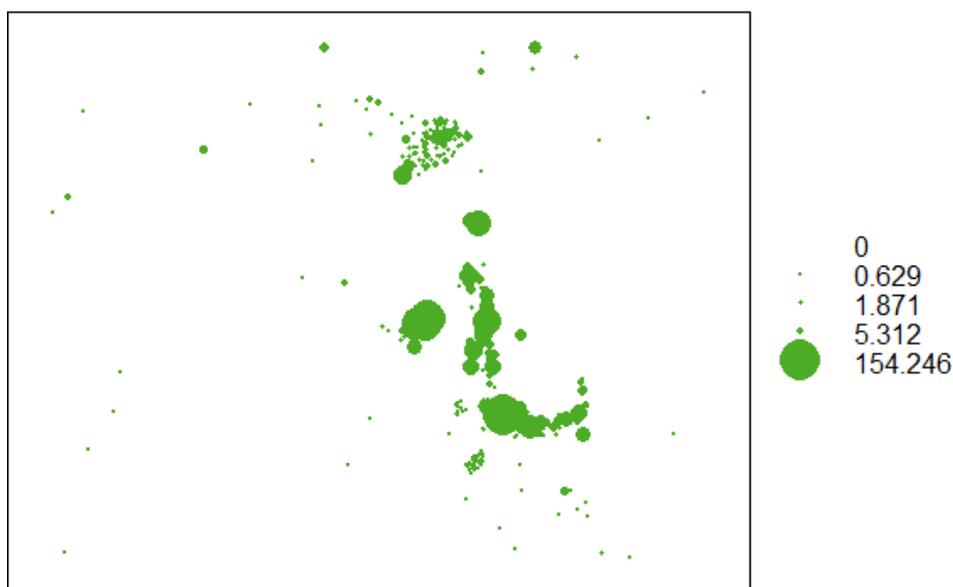


Figura 5.6: Gráfica de burbujas para CE armonizada superficial 0-30cm

#Paso 1-9: Armonización de la distribución estadística

Esta armonización se hace para transformar la distribución de la frecuencia a una distribución normal. La transformación de la frecuencia a la distribución normal es opcional para los algoritmos del modelado espacial. En caso de elegir su realización, entonces la distribución empírica se establece primero a través del análisis del histograma y se implementa la transformación si se encuentra que la distribución está sesgada. La función *hist* se utiliza para extraer y trazar el histograma. Se prefiere la transformación de Box-Cox (1964). Los siguientes scripts ilustran los pasos para transformar la distribución estadística. La distribución resumida se obtiene primero para establecer si existen ceros, NAs o valores negativos. Es conveniente eliminarlos antes de aplicar la transformación de Box-Cox.

```
> summary(soil1$X0.30.cm)
  Min.      Q1      Mediana      Media      Q3      Máx.  0.0000      0.6291      1.8709
      6.6812
> soil1$dumy=(soil1$CE)+0.001#suma "+0.001" al mínimo X0.30.cm es cero
> hist(soil1$dumy, main="Frequency distribution (before transformation)", xlab="Harmonized CE (dS/m)")
> soil1$Tran=(soil1$dumy^(as.numeric(car::powerTransform(soil1$dumy, family="bcPower")["lambda"]))-1)/(as.numeric(car::powerTransform(soil1$dumy, family="bcPower")["lambda"]))
> hist(soil1$Tran, main="Frequency distribution (after transformation)", xlab="Harmonized CE (dS/m)")
```

La gráfica del histograma de las distribuciones empíricas antes y después de la transformación se proporciona en la [Figura 5.7](#).

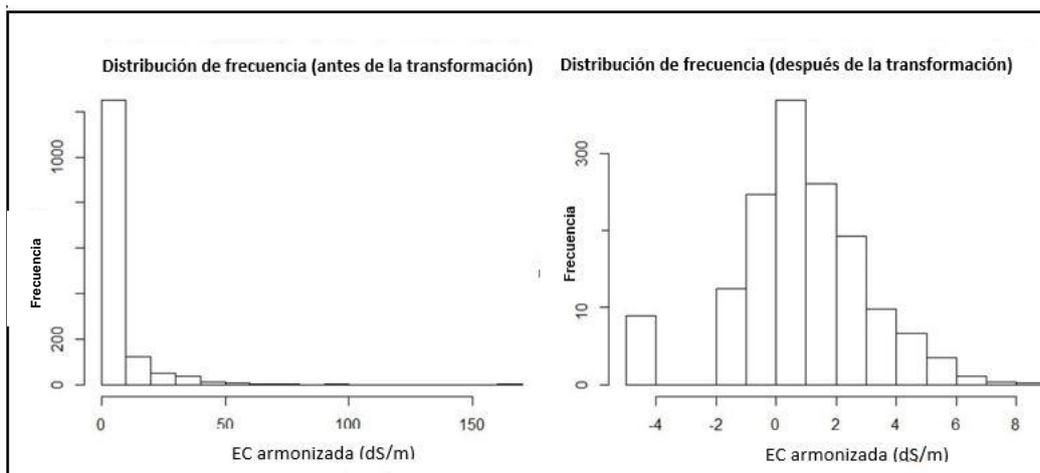


Figura 5.7: Distribución de la frecuencia antes y después de la transformación de la CE

5.3 Paso 2: Indicadores de modelado espacial

El modelado espacial de indicadores de suelos afectados por salinidad, se basa en el concepto del mapeo digital de suelos (MDS). En este concepto se establece una relación entre los indicadores de problemas de salinidad del suelo y los predictores espaciales (capas SIG de causas e indicadores de problemas de salinidad y factores de formación del suelo). Este enfoque permite la cuantificación de:

1. Información espacial de los indicadores de suelos afectados por salinidad (CE, pH, PSI) a distintas profundidades de suelos.
2. Incertidumbres y precisión de mapeo.
3. Información espacial de clases e intensidad de problemas de salinidad.

5.3.1 Elección del modelado adecuado

El enfoque del MDS propone una relación matemática entre la variable objeto del suelo y sus predictores (o la representación de los factores de formación del suelo). Esta relación se conoce popularmente como el modelo SCORPAN (McBratney *et al.*, 2003):

$$\text{Variable objetivo del suelo} = (S, C, O, R, P, A, N) + \text{error} \quad (5.1)$$

donde *S* es el componente del suelo (como el mapa del suelo), *C* es el clima, *O* son los organismos, *R* es el relieve, *P* es el material parental, *A* es la edad (tiempo), *N* es las coordenadas espaciales, *error* es el término de error, y *f* es la función de enlace de la relación entre los predictores y la variable objeto del suelo. Los modelos populares utilizados con frecuencia para representar *f* son: lineales, random-forest, máquina de soporte vectorial, efectos mixtos, kriging de regresión, etc. El paquete *soilassessment* proporciona la función *regmodelSuit* para orientar la elección del modelo adecuado para cartografiar las variables del suelo. Se prueban diferentes modelos y regresa a los nueve primeros modelos usando RMSE, ME, NSE y r^2 . El error cuadrático medio (RMSE) más bajo, r^2 más alto, error medio (ME) más bajo, coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) más alto, son entonces utilizados como los criterios orientadores para elegir el modelo apropiado (Holst y Thyregod, 1999; Gupta y Kling, 2011).

$$RMSE = \sqrt{1/n * (y_o - y_m)^2} \quad (5.2)$$

$$ME = \sum(y_o - y_m) / n \quad (5.3)$$

$$NSE = 1 - \sum((y_o - y_m)^2) / ((y_o - \bar{y})^2) \quad (5.4)$$

$$R^2 = (n(\sum y_o y_m) - (\sum y_o)(\sum y_m))^2 / [(n\sum y_o^2 - (\sum y_o)^2)(n\sum y_m^2 - (\sum y_m)^2)] \quad (5.5)$$

en donde el valor armonizado es y_o , y_m es el valor modelado, y el valor medio es \bar{y} .

Un paso inicial para el modelado espacial es construir el modelo en un conjunto de datos de calibración y luego probarlo usando un conjunto de datos independiente. Esto requiere el establecimiento de conjuntos de datos de calibración y validación. Estos conjuntos de datos deben tener bien alineadas las propiedades del suelo (indicadores) y los predictores espaciales en cada punto de muestreo georreferenciado.

La extracción del valor del pixel de las capas SIG (predictores) utilizando los datos puntuales (soil1) es un método adecuado para desarrollar los conjuntos de datos de calibración o validación.

#Paso 2-1: Extraiga los valores de los pixeles de los predictores y adjúntelos a los puntos de muestreo del suelo

Primero compruebe la similitud en el sistema de referencia de coordenadas - crs y luego extraiga los predictores.

```
> crs(predictors); crs(soil1) SCR arguments:
+proj=utm +zone=36 +datum=WGS84 +units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towg s84=0,0,0
SCR arguments:
+proj=utm +zone=36 +datum=WGS84 +units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towg s84=0,0,0
```

Es importante asegurarse de que los SCR para los predictores y la base de datos del suelo sean los mismos antes de comenzar la extracción de los píxeles.

Después extraiga los valores de los píxeles de todos los predictores en el marco de datos del suelo

```
> {predictors.ov=over(soil1, predictors)
+   soil1$dem=predictors.ov$dem
+   soil1$slope=predictors.ov$slope
+   soil1$cnbl=predictors.ov$cnbl
+   soil1$ls=predictors.ov$ls
+   soil1$valley=predictors.ov$valley
+   soil1$loncurve=predictors.ov$loncurve
+   soil1$lcover=predictors.ov$lcover
+   soil1$rain=predictors.ov$rain
+   soil1$pgeology=predictors.ov$pgeology
+   soil1$geology=predictors.ov$geology
+   soil1$PCA1=predictors.ov$PCA1
+   soil1$PCA2=predictors.ov$PCA2
+   soil1$PCA3=predictors.ov$PCA3
+   soil1$PCA4=predictors.ov$PCA4
+ }
```

#Paso 2-2: Establezca el modelo DSM adecuado

```
> summary(soil1)
```

Object of class SpatialPointsDataFrame

Coordinates:

min max

Longitude -261790.8 497928

Latitude 1841020.7 2430061

Is projected: TRUE

proj4string :

[+proj=utm +zone=36 +datum=WGS84 +units=m +no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0]

Number of points: 1498

Data attributes:

	Pits	Sample	Upper	Lower	Horizon	
292	: 8	1	: 1	Min. : 0.00	Min. : 2.00	Min. :1.000
280	: 7	10	: 1	1st Qu.: 0.00	1st Qu.: 30.00	1st Qu.:1.000
293	: 7	100	: 1	Median : 30.00	Median : 64.00	Median :2.500
327	: 7	1000	: 1	Mean : 42.56	Mean : 75.37	Mean :2.692
372	: 7	1001	: 1	3rd Qu.: 70.00	3rd Qu.:110.00	3rd Qu.:4.000
378	: 7	1002	: 1	Max. :210.00	Max. :300.00	Max. :8.000

.....

	ls	valley	loncurve	lcover
Min.	:0.00051	Min. : 0.7306	Min. :0e+00	Min. : 2.0
1st Qu.:	0.00129	1st Qu.: 30.1037	1st Qu.:0e+00	1st Qu.:178.0
Median :	0.00219	Median : 43.0999	Median :0e+00	Median :178.0
Mean :	0.02028	Mean : 44.6613	Mean :0e+00	Mean :155.5
3rd Qu.:	0.02821	3rd Qu.: 62.2221	3rd Qu.:0e+00	3rd Qu.:178.0
Max. :	0.44952	Max. :105.7522	Max. :1e-05	Max. :188.0
NA's :	4	NA's :4	NA's :4	NA's :4

Se requiere eliminar (o investigar) los NAs que aparecen en los datos.

```
> soil1=subset(soil1,!is.na(soil1$dem))
> soil11a=soil1@data[,c("Tran","dem","slope","ls","cnbl","loncurve","
valley","rain","lcover","pgeology","geology","PCA1","PCA2","PCA3","PC A4")]
> regmodelSuit(soil11a,Tran,dem,geology,pgeology,slope,rain,loncurve,
cnbl,valley,lcover,ls,PCA1,PCA2,PCA3, PCA4)
|=====
=====| 100%
ME RMSE R2 NSE
```

Lineal	1.37034834	1.8129133	0.1320264	-4.45424486
RandomForest	0.24614749	0.4291176	0.9623631	0.99707891
SVM	1.34745209	1.8212570	0.1357457	-4.44014767
BayesianGLM	1.36669809	1.8051662	0.1399516	-4.55079779
BaggedCART	0.88676091	1.1705841	0.7018074	0.44302759
Cubist	0.07851255	0.2744213	0.9753726	1.00000000
CART	1.40147986	1.8274332	0.1320797	-4.56273851
Ranger	0.26852953	0.4205875	0.9655103	0.99702690
QuantRandForest	0.04923343	0.2855093	0.9761419	1.00000000
QuantNeuralNT	1.16162791	1.7075411	0.2582558	0.07778314

Los resultados anteriores muestran que los modelos *quantum regression random forest* y *cubist* como adecuados para el modelado de CE_{se} de 0-30 cm utilizando los predictores espaciales proporcionados en los datos de prueba del estudio de caso.

5.3.2 Construcción y prueba de modelos

Las estrategias de construcción y prueba de los modelos estadísticos, recomiendan conjuntos de datos independientes para la construcción y prueba de modelos. Lo ideal es que estos conjuntos de datos sean muestreados con el objetivo de construir y probar modelos. En ausencia de un conjunto de datos muestreados de forma independiente, ya sea para la construcción de modelos (calibración) o para su comprobación (validación), se suele utilizar una estrategia de división de datos. La estrategia de división de datos aleatoriamente divide (o aleatoriamente estratifica) los datos en dos partes. Una parte se mantiene como calibración y la otra como validación. El conjunto de datos de validación se utiliza para evaluar la precisión. Los índices para reportar la precisión del modelado incluyen RMSE, ME, r^2 , NSE, y una representación gráfica de los valores modelados contra los armonizados. La división de datos puede elegirse de forma arbitraria de acuerdo con, o dependiendo del tamaño de los datos.

#Paso 2-3: Construya y pruebe modelos

```
> {soil4=as.data.frame(soil1)
+   bound <- floor((nrow(soil4)/4)*3)
+   soil3 <- soil4[sample(nrow(soil4)), ]
+   df.traina <- soil3[1:bound, ]
+   df.testa <- soil3[(bound+1):nrow(soil3), ]}

> rf.ec=train(Tran~(slope+rain+lcurve+ls+cnbl+valley+lcover+dem+PCA 1+PCA2+PCA3+PCA4+PCA5), data =
df.traina, method = "grf", trControl
=trainControl( method = "cv",number=5,returnResamp = "all",savePredictions = TRUE, search = "random",verboseIter =
FALSE))
```

Muestre el intervalo de predicción

```
> df.testa$Strain=predict(rf.ec,newdata=df.testa)
> hist(df.testa$Strain,xlab="Box-Cox Transformed CEse (0-30cm)", main
=NULL)
> abline(v = quantile(df.testa$Strain, probs = c(0.05, 0.95)),lty = 5
,col = "red")
```

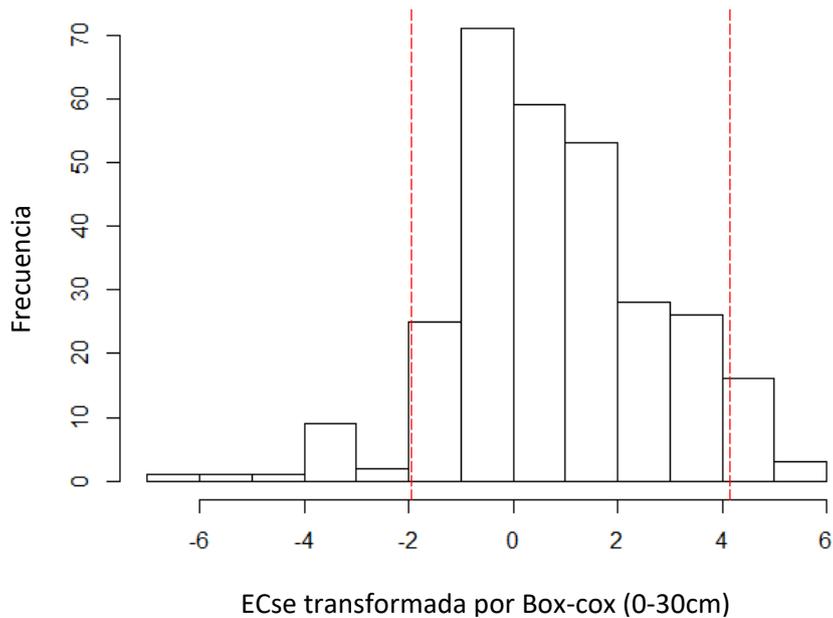


Figura 5.8: Representación gráfica de la distribución de frecuencia con límites de predicción en el intervalo de confianza del 95%

Los límites de predicción sobre los valores transformados Box-Cox en el intervalo de confianza del 95% aparecen en la Figura 5.8, la cual muestra el intervalo alrededor de la media de 0.77 como [-2, 4.1].

#Paso 2-4: Evaluación de la precisión

```
> cor(df.testa$Strain,df.testa$dummy)^2 [1] 0.9950319
> {plot(df.testa$Strain~df.testa$dummy, xlab="Measured ECse",ylab="Mo delled ECse", main="Accuracy assessment on hold-out samples")
+ abline(a=0,b=1,lty=20, col="blue")} # Figura 5.9
```

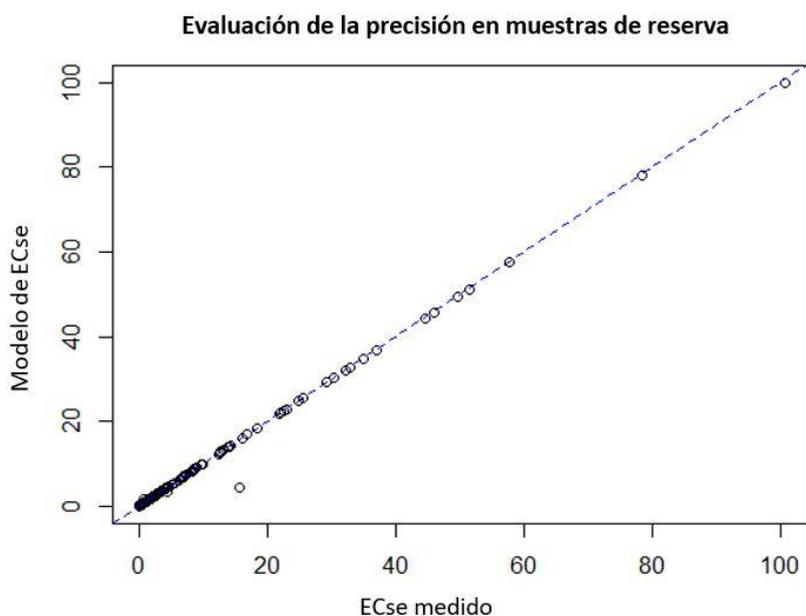


Figura 5.9: Representación gráfica de la CE prevista versus CE medidos

```

> Bias=mean(df.testa$Strain-df.testa$dummy,na.rm=TRUE)
> RMSE=sqrt(sum(df.testa$Strain-df.testa$dummy,na.rm=TRUE)^2/length(( df.testa$Strain-df.testa$dummy)))
> Rsquared=cor(df.testa$Strain,df.testa$dummy)^2
> NSE=1-sum(df.testa$Strain-df.testa$dummy,na.rm=TRUE)^2/sum((df.test a$Strain-
mean(df.testa$dummy,na.rm=TRUE))^2,na.rm=TRUE)
> statia=data.frame(Bias,RMSE,Rsquared,NSE);View(statia)
> write.csv(statia,file = "CEO_30_validmodel_stats.csv")

> statia
      Bias      RMSE  Rsquared      NSE 1 -
0.1019564 1.751158 0.9950319 0.982046

```

5.3.3 Predicción espacial y evaluación de la precisión

El modelo puede utilizarse ahora para producir una predicción espacial de la variable objeto (CE, en este caso) en toda la zona de estudio. También se puede comparar un resumen de los datos pronosticados y de validación para dar una indicación de los rangos de predicción.

#Paso 2-3: Utilice el modelo desarrollado para predecir el mapa de CE

```

> lmbda1=(as.numeric(powerTransform(soil1$dummy, family="bcPower")[" lambda"]))
> predictors$CEte=predicta(rf.ec,predictors)
> coordinates(df.testa)=~Longitude+Latitude
> proj4string(df.testa)=SCR("+proj=utm +zone=36 +datum=WGS84 +units=m
+no_defs +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0")# Asegúrese de utilizar el SCR correcto
> predicters.ov1=over(df.testa, predictors)
> df.testa$Predre=predicters.ov1$CEse
> cor(df.testa$dummy,df.testa$Predre)^2 [1] 0.9978655

```

#Compare la predicción espacial y validación del conjunto de datos

```

> featureRep(predictors["CEse"],df.testa) #Figura 5.10

```

Prueba de dos muestras Kolmogorov-Smirnov

data: dist.histbb\$left and dist.histbb\$right D = 0.52174, p-value = 0.003819

hipótesis alternativa: dos colas

```

> summary(predictors$CEse);summary(df.testa$dummy)
  Min.   Q1   Mediana   Media   Q3   Máx.
0.00007 0.48810 1.17487 1.51685 1.61781 112.74435
  Min.   Q1   Mediana   Media   Q3   Máx.
0.00048 0.59755 1.71126 6.60388 5.05220 113.50941

```

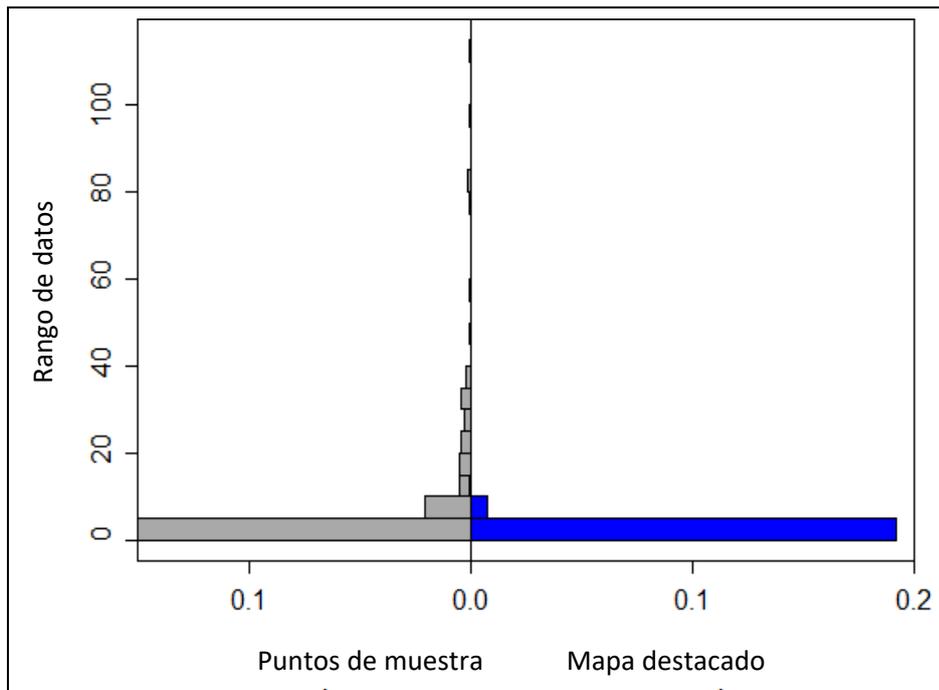


Figura 5:10: Representatividad de los rangos de la CE de validación (puntos de muestreo) en el mapa de predicción (características del mapa)

La representación de las características en la Figura 5.10 muestra lo bien que el rango de la CE medida (CE de validación) está contenido en el mapa de predicción. En la muestra del estudio de caso, las CE altas (>40 dS/m) parecen haber sido capturadas deficientemente en el mapa de predicción. El eje de las x muestra la frecuencia (densidad de probabilidad) de los valores de ocurrencia de datos (CE) en el eje de las y. La representación deficiente de valores altos (CE > 40) implica la incertidumbre del modelo para valores altos de CE. Esto se investigará con mayor detalle cuando se produzcan las incertidumbres.

#Paso 2-4: Exporte los resultados

```
writeGDAL(predictors["CEse"], drivername = "GTiff", "Top0_30CEse.tif")
```

#Paso 2-5: Evaluación de la incertidumbre

El modelo espacial general para el mapeo digital de suelos, por lo regular se da como:

$$y = f(X) + \varepsilon \quad (5.5)$$

donde y es la variable objetivo del suelo a ser mapeada, X es un vector de predictores espaciales (factores de control de causas de problemas de salinidad), ε es el término de error, y f es la función de enlace entre la variable del suelo objeto y sus causas/factores de formación. Se desconoce la naturaleza de f y se aproxima mediante modelos matemáticos. Estas aproximaciones de los modelos, denotadas como \hat{f} , dan estimaciones de y que también se denotan como \hat{y} . La diferencia entre y y \hat{y} es la cantidad incierta.

$$\hat{y} = \hat{f}(X) \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} y - \hat{y} &= [f(X) + \varepsilon] - \hat{f}(X) \\ &= [f(x) - \hat{f}(X)] + \varepsilon \end{aligned} \quad (5.7)$$

En este libro, la cantidad incierta se estima utilizando un ancho de predicción con un intervalo de confianza del 95%. La función *predUncertain*, en el paquete *soilassessment*, se utiliza para extraer la incertidumbre mediante el enfoque *bootstrap* (Efron, 1992). Las entradas para la función son una lista de predictores, un indicador de entrada del suelo y el modelo de enlace elegido (que se toma del modelo adecuado para el desarrollo del mapa en la Sección 5.3.1).

#Paso 2-6: Evaluación de incertidumbre

```
> soil6a=soil1[,c("Tran")]
> predictors6a=predictors[c("dem","slope","cnbl","lcover","loncurve","rain","pgeology","geology","ls","valley","PCA1","PCA2","PCA3","PCA4","PCA5")]

> pred_uncerta=predUncertain(soil6a,predictors6a,3,95,"qrandomforest")
|=====| 100%

> splot(pred_uncerta, "pred_width", scales = list(draw = TRUE),col.regions=heat.colors(20,rev = TRUE)) + splot(df.testa,"dummy",pch=3,cex=0.4) #Figura 6.11
```

#Paso 2-7: Exporte los mapas de incertidumbre

```
> CEO_30_uncertain=(pred_uncerta$pred_width*lmbda1+1)^(1/lmbda1)
> writeRaster(CEO_30_uncertain, filename="CEO_30_uncertain.tif",forma t="GTiff")
```

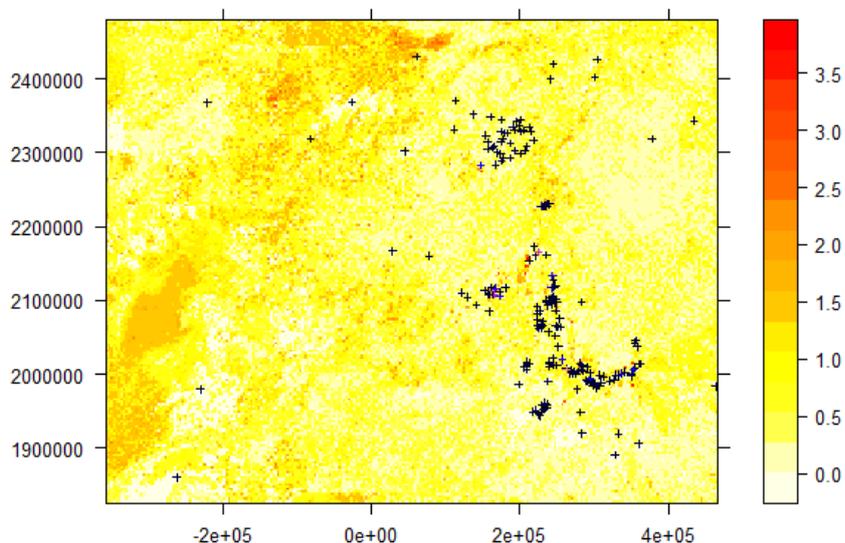


Figura 5.11: Ancho de la predicción espacial al 95% del intervalo de confianza y sobreposición de puntos de validación

Los pasos para el modelado espacial de CE deben repetirse para el pH, PSI y los iones solubles para profundidades de suelo de 30-100 cm. En conjunto, los productos finales conforman la información espacial de los indicadores de los suelos afectados por salinidad, a 0-30 cm y 30-100 cm de profundidad.

5.4 Parte 3: Modelado espacial de suelos afectados por salinidad

5.4.1 Modelado espacial de suelos afectados por salinidad

Esta sección describe el enfoque para el modelado espacial de los suelos afectados por salinidad con base en mapas de entrada de los indicadores de problemas de salinidad en suelos. Es el paso final del enfoque multiescala en la Figura 5.1. El enfoque de modelado espacial para suelos afectados por salinidad, se enfoca en:

- 1) Clasificación de áreas afectadas por salinidad;

- 2) Identificación de intensidad de problemas por salinidad;
- 3) Evaluación de la incertidumbre en el desarrollo de mapas de suelos afectados por salinidad.

El modelo matemático para la clasificación de los suelos afectados por la salinidad, es el siguiente:

$$salt = g(EC, pH, ESP) + error \quad (5.8)$$

donde *salt* es la clase de tipo o intensidad de los problemas de salinidad y *error* es la diferencia entre las clases de valores reales y modelados. Las estimaciones propuestas para el modelo *g* en la literatura se dan en la Cuadro 2.4 y Cuadro 2.5. El paquete *soilassessment* contiene las funciones *saltClass*, *saltSeverity* y *saltRating* para implementar estos modelos. Los datos de entrada para las funciones *saltClass* y *saltSeverity* son los tres indicadores del suelo, CE, pH, y PSI. Las funciones *saltRating* proporcionan las principales clases de suelos afectados por salinidad utilizando sólo la CE y el pH. Es una aproximación para las clases indicativas que necesitan mejorar con los datos de las sales de sodio. Los datos de entrada para clasificar los suelos afectados por salinidad pueden ser datos puntuales en un marco de datos de hoja de cálculo o en mapas rasterizados.

#Paso 3-1: Clasifique los suelos afectados por salinidad

```
> predictors$salty=saltClass(predictors$CEse,predictors$PH,predictors
  $PSI,"FAO")
> summary(predictors$salty)
```

Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Máx.
1.000	1.000	1.000	1.151	1.000	5.000

```
> predictors$saltiness=classCode(predictors$salty,"saltclass")
> spplot(predictors["salty"])
> spplot(predictors["saltiness"]) # Figura 5.12a

> predictors$Salt_affected=saltSeverity(predictors$CEse,predictors$PH
  ,predictors$PSI,"FAO")
> predictors$saltaffectedness=classCode(predictors$Salt_affected,"sal
  tseverity")
> spplot(predictors["saltaffectedness"]) # Figura 5.12b
```

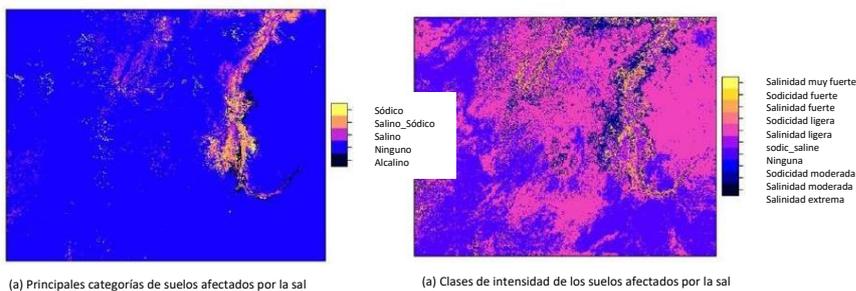


Figura 5.12: Mapas de suelos afectados por salinidad (0-30 cm)

Los mapas finales en la Figura 5.12 se exportan como formato de archivo SIG para usarse con otros programas de computación SIG (como es QSIG) o para compartir datos. Debido a que la función de exportar no trabaja con factores/valores de carácter, las clases de salinidad en los mapas se convierten primero en valores numéricos de mapa y después se exportan. Se requiere una Cuadro de consulta (LUT por sus siglas en inglés) para ayudar a identificar las clases y los códigos numéricos únicos generados para cada valor de mapa. La LUT se exporta como archivo de texto.

Paso 3-2: Exporte los mapas

```
> predictors$Saltclass=as.numeric(predictors$saltaffectedness)
> salinity_LUT30=classLUT(predictors["saltaffectedness"],"saltseverity")

|=====| 100%
> writeGDAL(predictors["Saltclass"], drivename = "GTiff", "Top0_30saltaffected.tif")
> write.table(salinity_LUT30,file = "saltaffected_LUT30.txt",row.names = FALSE)
```

5.4.2 Evaluación de la precisión

La precisión del mapa clasificado de suelos afectados por salinidad se evalúa utilizando la matriz de confusión. En esta estrategia, las muestras de reserva se clasifican independientemente en términos de tipos y severidad de los problemas de salinidad en el suelo. La clasificación de las muestras de reserva debe seguir el mismo procedimiento de armonización como otros datos de entrada (es decir, armonización de indicadores de entrada y profundidades 0-30 y 30-100 cm). Estas clases son comparadas después con las clases de pixel extraído a partir de los mapas clasificados. El índice *Kappa* es un indicador adecuado para reportar la precisión.

#Paso 3-2: Importe y clasifique el conjunto de datos de validación

```
> soilv=readOGR(".", "validation_harmonized")
> soilv=subset(soilv,soilv$Horizon==1)
> soilv$salt_affected1=saltSeverity(soilv$SCE,soilv$pH,soilv$PSI,"FAO")
> summary(soilv$salt_affected1)
  Min. Q1   Mediana  Media Q3Máx. 3.0   6.0       8.0
      8.5 11.5   15.0

> soilv$saltaffectedness1=classCode(soilv$salt_affected1,"saltseverity")
> summary(soilv$saltaffectedness1)
Salinidad Extrema Salinidad Moderada Sodicidad Moderada Ninguna

      3          10          1          18
salino_sodico   SalinidadLigera   SodicidadLigera   SalinidadFuerte

      12          13          16          5
```

Después de clasificar el conjunto de datos de validación, se utiliza el conjunto de datos para extraer los valores de píxeles del mapa clasificado y comparados con la validación clasificada.

#Paso 3-3: Extraiga las clases de salinidad a partir de las muestras de validación

```
> soilv=subset(soilv,is.na(soilv$saltaffectedness1))
> predictors.ovv=over(soilv, predictors)
> soilv$salt_affected=predictors.ovv$Salt_affected
> soilv$saltaffectedness=predictors.ovv$saltaffectedness
```

Verifique el resumen de los píxeles clasificados y extraídos

```
> summary(soilv$salt_affected)
  Min. Q1   Mediana  Media Q3   Máx. 3.000   6.000
      8.000  7.808   10.000 14.000

> summary(soilv$saltaffectedness)
Salinidad Extrema Salinidad Moderada Sodicidad Moderada Ninguna
      1          7          0          14

      salino_sodico   SalinidadLigera   SodicidadLigera SalinidadFuerte
      18          15          11          10

      SodicidadFuerte   SalinidadMuyFuerte
      0          2
```

Una comparación visual muestra que los conjuntos de datos de validación tenían puntos clasificados como suelo extremadamente salino; sin embargo, el mapa reportaba sólo un pixel. De forma similar, tres puntos en los conjuntos de datos de validación tenían clase de salinidad fuerte mientras que el mapa tenía 10 pixeles con clases de salinidad fuerte. Una representación gráfica de la comparación (matriz de confusión) proporciona una clara imagen de la precisión (Figura 5.13).

Grafique la matriz de confusión y determine el índice Kappa

```
> agreementplot(confusion(soilv$salt_affected, soilv$salt_affected1), main = "Accuracy assessment", xlab = "Class codes
in holdout samples", ylab = "Class codes in map")
> Kappa(confusion(soilv$salt_affected, soilv$salt_affected1)) valor      ASE      z      Pr(>|z|)
No ponderado 0.4211 0.06384 6.597 4.208e-11
Ponderado    0.4780 0.07792 6.135 8.525e-10
```

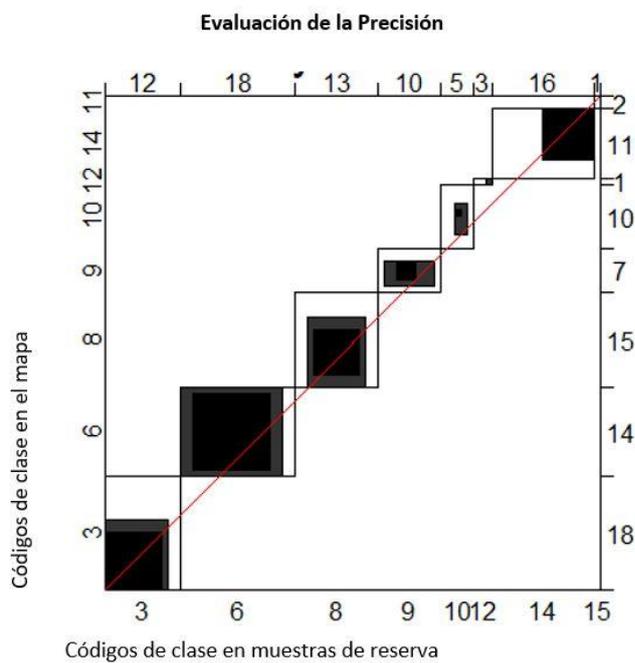


Figura 5.13: Ilustración gráfica de la precisión de la clasificación para suelos afectados por salinidad

5.4.3 Evaluación de la incertidumbre

La evaluación de la incertidumbre en el modelado del suelo afectado por salinidad, se concibe como la estimación de las incertidumbres contribuidas por el modelado de datos de entrada e incertidumbres del modelo de clasificación de la salinidad. El enfoque de propagación de incertidumbre Monte Carlo, se utiliza para modelar tanto la incertidumbre de los datos de entrada como la incertidumbre del modelo de clasificación. Es un enfoque que consta de tres pasos, que implica la especificación del parámetro de entrada, el desarrollo de las distribuciones marginal y conjunta, y simulaciones para la propagación de incertidumbre. (Figura 5.14). Las especificaciones del parámetro de entrada comprenden la definición del modelo de clasificación de la salinidad y la distribución espacial de la media y la varianza de las variables de entrada. La distribución espacial de la media y la varianza se utiliza para entrenar las simulaciones MC en un número establecido de simulaciones/ realizaciones. Por lo general, las simulaciones MC son más precisas con un mayor número de realizaciones. Sin embargo, este análisis puede tomar un tiempo de cálculo para grandes conjuntos de datos. Es necesario hacer un balance para salvaguardar una precisión adecuada y al mismo tiempo incurrir en un tiempo de cálculo moderado. Se sugiere un valor de 100 para modelar suelos afectados por salinidad.



Figura 5.14: Proceso de estimación de incertidumbre Monte Carlo

El desarrollo de funciones de densidad marginal utiliza parámetros de distribución estadística y modelos de correlación (crm). Ejemplos de parámetros de distribución estadística, que dependen del tipo de distribución, son la media (\bar{x}) y la variación estándar (s) para la distribución normal o la escala (λ) y tasa (α) para la distribución gama.

Los siguientes pasos describen el proceso para preparar los mapas del indicador de entrada en el formato de archivo raster debido a que los módulos para evaluación de incertidumbre fueron desarrollados para el formato de archivo raster. Los mapas de entrada son además convertidos en *spatialPixelsDataFrame* para facilitar operaciones matemáticas en marcos de datos. Es importante verificar las distribuciones de probabilidad de los datos de entrada utilizando la función histograma. Aunque las simulaciones MC en la Figura 5.14 no son estrictas en cuanto al tipo de distribución, la distribución normal es fácil de muestrear. Por lo tanto, se recomienda establecer las distribuciones normalizadas a partir de los mapas de entrada.

#Paso 3-4: Convierta las capas de entrada en archivos raster

```
> CE=raster(predictors["CEse"]);names(CE)=c("CE");CE1=as(CE,"SpatialPixelsDataFrame")
> PH=raster(predictors["PH"]);names(PH)=c("PH");PH1=as(PH,"SpatialPixelsDataFrame")
```

```

> PSI=raster(predictors["PSI"]);names(CE)=c("PSI");PSI1=as(PSI,"SpatialPixelsDataFrame")
>
> CEte=raster(predictors["CEte"]);CEsd=pred_uncerta$pred_sd; names(CEsd)=c("CEsd")
> PHde=raster(predictors["PHt"]);PHsd=pred_uncertb$pred_sd; names(PHsd)=c("PHsd")
> PSIt=raster(predictors["PSIt"]);PSIsd=pred_uncertc$pred_sd; names(ESPsd)=c("PSIsd")

```

Obtenga la autocorrelación espacial de la muestra (Figura 5.15)

```

> b=nrow(CE1)
> c=trunc(0.01*b)
> jj=CE1[sample(b,c),]
> vrm=autofitVariogram(CE~1,jj)

> plot(vrm)#Note the spatial correlation model and the value of Range parameter
> acf((CE1$CE)) ##Also not the acf0 (at lag 0)
> CE_crm <- makeCRM(acf0 = 0.85, range = 20000, model = "Sph")
> plot(CE_crm, main = "CE correlogram")

```

Las funciones de correlación anteriores se repiten para todos los indicadores de entrada del suelo, para 0-30 cm y 30-100 cm.

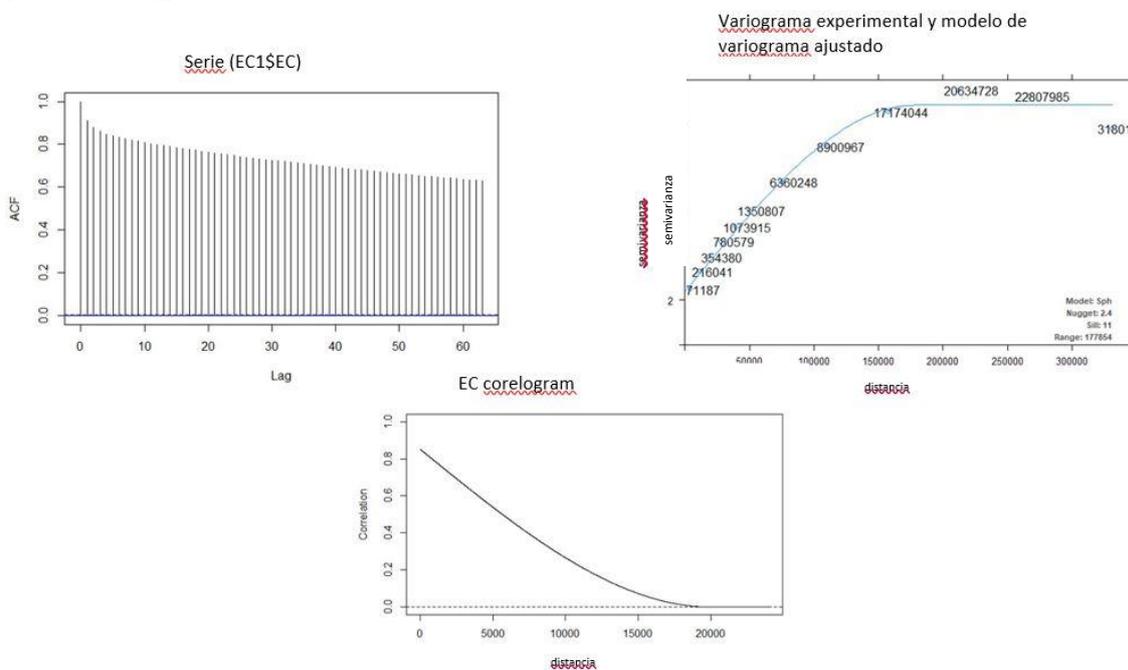


Figura 5.15: Funciones de correlación para CE (0-30 cm)

#Paso 3-5: Desarrolle los modelos de incertidumbre de variables múltiples de entrada marginal y conjunta para definir los modelos MC

```

> CE_UM=defineUM(distribution="norm",distr_param = c(CEte,CEsd),crm = CE_crm,id = "CE")
> PH_UM=defineUM(distribution = "norm",distr_param = c(PHde,PHsd),crm = PH_crm,id = "PH")
> PSI_UM=defineUM(distribution="norm",distr_param=c(PSIt,PSIsd),crm=E SP_crm,id = "PSI")
> class(CE_UM);class(PH_UM);class(PSI_UM)
[1] "MarginalNumericSpatial"
[1] "MarginalNumericSpatial"
[1] "MarginalNumericSpatial"

```

Obtenga los valores de correlación y utilícelos para definir el Modelo de Incertidumbre Monte Carlo (MUM)

```

> cor(values(CEte),values(PHde)
> ); cor(values(CEte),values(PSIt)); cor (values(PHde),values(PSIt))

```

```
[1] 0.5511048
[1] 0.3204495
[1] 0.2859129
```

```
> salinityMUM = defineMUM(UMlist = list(CE_UM, PH_UM, PSI_UM), cormatrix = matrix(c(1,
cor(values(CEte),values(PHde)), cor(values(CEte),values(PSIt)), cor(values(CEte), values(PHde)), 1,
cor(values(PHde), values(PSIt)), cor(values(CEte), values(PSIt)), cor(values(PHde), values(PSIt)),1), nrow = 3,
ncol = 3))

> class(salinityMUM)
[1] "JointNumericSpatial"
```

Ahora se desarrollan las posibles realizaciones después de establecer los modelos de Incertidumbre Monte Carlo (MUM). El nivel 100 se establece para simular las simulaciones MC.

#Paso 3-6: Cree las realizaciones MC a partir de las distribuciones

```
> MC <- 100
> input_sample = genSample(UMobject = salinityMUM, n = MC, samplmeth od = "ugs", nmax = 20, asList = FALSE)
```

Se encontró el Modelo Lineal de Coregionalización. Bien. [usando la cosimulación gaussiana incondicional]

#Calcule la estadística de la muestra de entrada

```
> CE_sample = input_sample[[1:MC]]
> PH_sample = input_sample[[(MC+1):(2*MC)]]
> PSI_sample = input_sample[[(2*MC+1):(3*MC)]]
> CE_sample_mean <- mean(CE_sample)
> PH_sample_mean <- mean(PH_sample)
> PSI_sample_mean <- mean(PSI_sample)

> CE_sample_sd <- calc(CE_sample, fun = sd)
> PH_sample_sd <- calc(PH_sample, fun = sd)
> PSI_sample_sd <- calc(PSI_sample, fun = sd)
```

#Grafique las realizaciones

```
par(mfrow=c(2,2),mar = c(1, 1, 2, 2), mgp = c(1.7, 0.5, 0), oma = c
(0, 0, 0, 1),
+ las = 1, cex.main = 1, tcl = -0.2, cex.axis = 0.8, cex.lab = 0.
8)
> plot(CE_sample_mean, main = "Mean of CEt realizations", xaxt = "n", yaxt = "n")
> plot(PH_sample_mean, main = "Mean of PHt realizations", xaxt = "n", yaxt = "n")
> plot(PSI_sample_mean, main = "Mean of PSIt realizations", xaxt = "n", yaxt = "n")
```

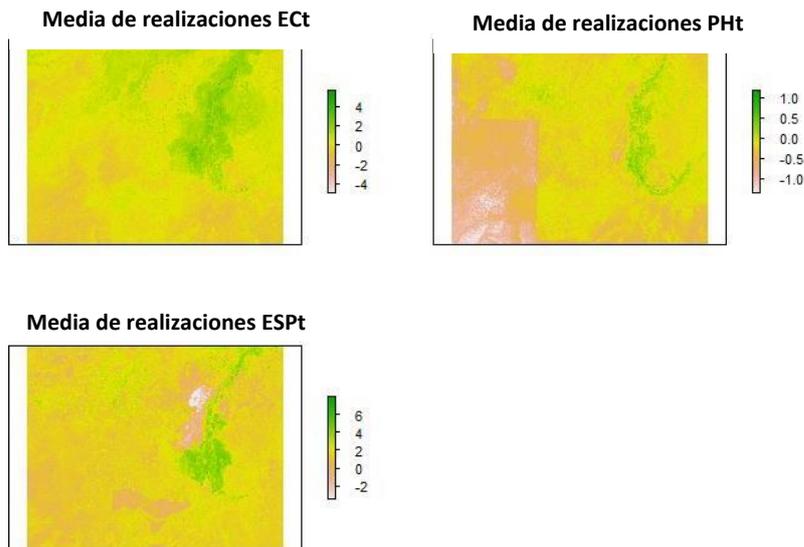


Figura 5.16: Realizaciones simuladas de indicadores de entrada de suelos normalizados

Tome en cuenta que las simulaciones MC se realizaron con los indicadores de entrada normalizados del suelo. Es posible tomar muestras a partir de datos no normalizados. Sin embargo, en este libro se utiliza una distribución estadística armonizada.

#Paso 3-7: Propagación de incertidumbre a través del modelo de clasificación

El modelo de propagación de incertidumbre se utiliza para determinar cómo se propagan las incertidumbres en los indicadores de entrada del suelo a través del modelo de clasificación en el mapa clasificado final.

```
> Salinity_model_raster <- function (CE1,PH1,PSI1){
+   ww=CE1
+   ww=raster(ww)
+   ww$salt=saltSeverity(values(CE1),values(PH1),values(PSI1),"FAO")
+   ww=ww$salt; names(ww)=c("salt")
+   ww
+ }

> v <- list()
> v[[1]] = map(1:100, function(x){input_sample[[x]]})
> v[[2]] = map(101:200, function(x){input_sample[[x]]})
> v[[3]] = map(201:300, function(x){input_sample[[x]]})
> input_sample=v
> salinity_sample=propagate(realizations=input_sample,model=Salinity_model_raster,n=MC)

# Determine la incertidumbre en el mapa clasificado final
samplelist <- list()
> samplelist [[1]] = map(1:100, function(x){input_sample[[x]]})
> samplelist [[2]] = map(101:200, function(x){input_sample[[x]]})
> samplelist [[3]] = map(201:300, function(x){input_sample[[x]]})
> input_sample= samplelist
> salinity_sample = propagate(realizations = input_sample, model = Salinity_model_raster, n = MC)

> salinity_sample <- raster::stack(salinity_sample)
>   names(salinity_sample) <- paste("salt.",
c(1:nlayers(salinity_sample)), sep = "")
> salinity_freq = modal(salinity_sample, freq=TRUE)
> salinity_prop = salinity_freq/100
> salinity_SErr = sqrt(salinity_prop*(1-salinity_prop)/100)
```

- > CL=0.95
- > z_star=round(qnorm((1-CL)/2,lower.tail=F),digits = 2)
- > salinity_MEerr=z_star*salinity_SErr

El resultado final se exporta al formato de archivo SIG para el desarrollo del diseño del mapa (Figura 5.17).

- >
- writeRaster(salinity_MEerr,filename="Salinity_ME.tif",format="GTiff")

La precisión de la clasificación general de los suelos superficiales afectados por salinidad (0-30 cm) fue del 65%. Estos suelos cubrieron más del 82% de las capas de los suelos superficiales en el área del estudio de caso (Figura 5.17). El noroeste de la zona tenía un suelo salino de ligero a moderado con bolsas de suelos superficiales salino-sódicos y ligeramente sódicos. La salinidad del suelo superficial parece ser predominante en el lado este hacia el Mar Rojo. La sodicidad del suelo superficial parece concentrarse a lo largo del río Nilo (Figura 5.17).

Los pasos anteriores para desarrollar mapas de suelos afectados por salinidad y mapas de incertidumbre asociada deben repetirse para profundidades de suelo de 30-100 cm.

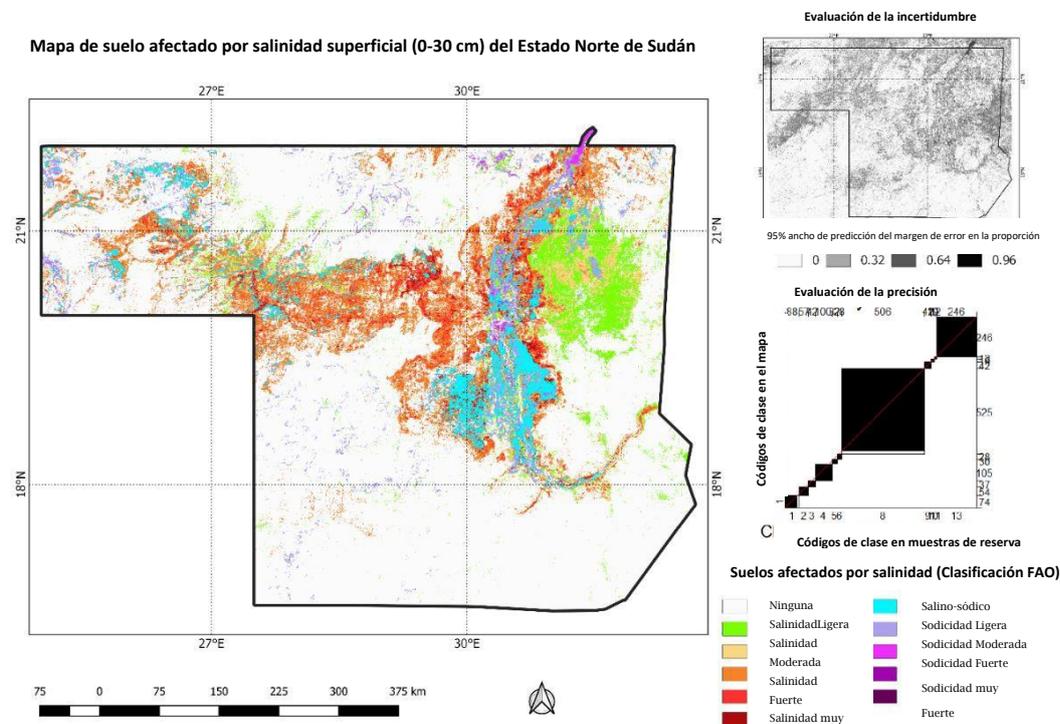


Figura 5.17: Mapa de suelo superficial (0-30 cm) afectado por salinidad en el área de estudio

5.5 Actualización del mapa

5.5.1 Actualización de la evaluación de las necesidades

El problema de salinidad en el suelo es un fenómeno dinámico debido a las características cambiantes de sus causas. Por consiguiente, se prevé que los mapas de los suelos afectados por salinidad también cambien con el tiempo. Además, la cobertura espacial de los indicadores medidos del suelo, no siempre es exhaustiva debido a las limitaciones de muestreo. En conjunto, estos factores ponen de manifiesto la necesidad de planificar las actualizaciones. Al planificar la actualización de los mapas de suelos afectados por salinidad se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) Necesidad de actualizar la data de los datos de entrada utilizados en la elaboración del mapa actual.
- b) Necesidad de reunir más datos para abarcar las zonas con incertidumbres altas en el mapa actual.
- c) Necesidad de realizar estudios de campo para vigilar las zonas conflictivas en lo que respecta a los problemas de salinidad.
- d) Presupuesto para cubrir el costo de la actualización.
- e) Enfoque de la actualización (por ejemplo, para la prevención o el control de los problemas de salinidad, la gestión de bases de datos, etc.)

5.5.2 Muestreo para el monitoreo y relleno de vacíos

Uno de los puntos que deben considerarse al planificar la actualización de la información es el número de lugares que hay que visitar y las zonas geográficas que hay que priorizar. El número de lugares se determina utilizando una expresión simple como:

$$muestras = Area * \left(\frac{1}{4 * w * pixel} \right)^2 \quad (5.9)$$

en donde *pixel* es el tamaño del pixel del mapa, *Area* es el área del sitio objetivo a muestrear en m², y *w* es el número de datos de los factores formadores del suelo para el mapeo, que se obtiene del modelo de factores de formación del suelo de Jenny (*Cl*, *O*, *R*, *P*). El número máximo posible de factores de formación del suelo (*w*) es 5 (factores de Jenny y Suelo), independientemente del número de capas en cada factor, mientras que el número mínimo es 1. La ecuación (5.9) se basa en el concepto de distancia mínima legible (MLD por sus siglas en inglés) en el mapeo del suelo (USDA-NRCS, 1999).

El número de muestras de la ecuación (5.9) puede asignarse a la zona objetivo utilizando los protocolos de muestreo disponibles, como el muestreo por hipercubo latino, el muestreo aleatorio, el muestreo aleatorio estratificado (Sheikholeslami y Razavi, 2017). Para llevar a cabo la asignación de la muestra se utiliza la función *surveyPoints* del paquete *soilassessment*, que utiliza el muestreo aleatorio estratificado. Los insumos para esta función son:

- el mapa a muestrear;
- el número de capas CLORP utilizadas para desarrollar el mapa;
- la clase en el mapa a muestrear, y la proporción de todos los tamaños de muestra estadísticamente posibles con respecto al objetivo.

#Paso 4-1: Identifique las áreas que se actualizarán

Obtenga el resumen de las clases del objetivo

```
> predictors$saltaffectedness=classCode(predictors$Salt_affected,"saltseverity")
> hist(predictors$Salt_affected, main = "Topsoil salt-affected classes", xlab="Codes for salt-affected classes")
```

Convierta el resumen en un marco de datos para determinar las proporciones de cada clase

```
salts=predictors["saltaffectedness"];salts=as(salts,"SpatialPixels DataFrame")
> salts=predictors["saltaffectedness"];salts=as(salts,"SpatialPixels DataFrame")
> salty=as.data.frame(salts)
> salty1=data.frame(count(salty$saltaffectedness))
> colnames(salty1)=c("Saltclass","Cases")
> salty1$Props=round(salty1$Cases/sum(salty1$Cases)*100,1)
> barchart(Saltclass~Props, data=salty1, xlab="Proportion (%)")
```

El gráfico de barras muestra las proporciones de las áreas de estudio dominadas por las clases de intensidad salina. Después de elegir la clase preferida para actualizar, se seleccionan los puntos de muestreo y se distribuyen en la clase identificada.

#Paso 4-2: Cree el número de lugares de actualización y muéstrelos en el mapa

```
> predictors$Saltclass=as.numeric(predictors$saltaffectedness)
> salinity_LUT30=classLUT(predictors["saltaffectedness"],"saltseverity")
|=====|
=====| 100%
> salt_affected_class=5
> clorp_factors=5
> survey=surveyPoints(soilssample,clorp_factors,salt_affected_class,10
)
> length(survey$new)
```

[1] 33

```
> spplot(soilssample,scales=list(draw=TRUE),sp.layout=list("sp.points",survey,pch=8,col="cyan")) # Figura 5.18
> writeOGR(survey,"","SurveyPointsClass5",driver = "ESRI Shapefile")
```

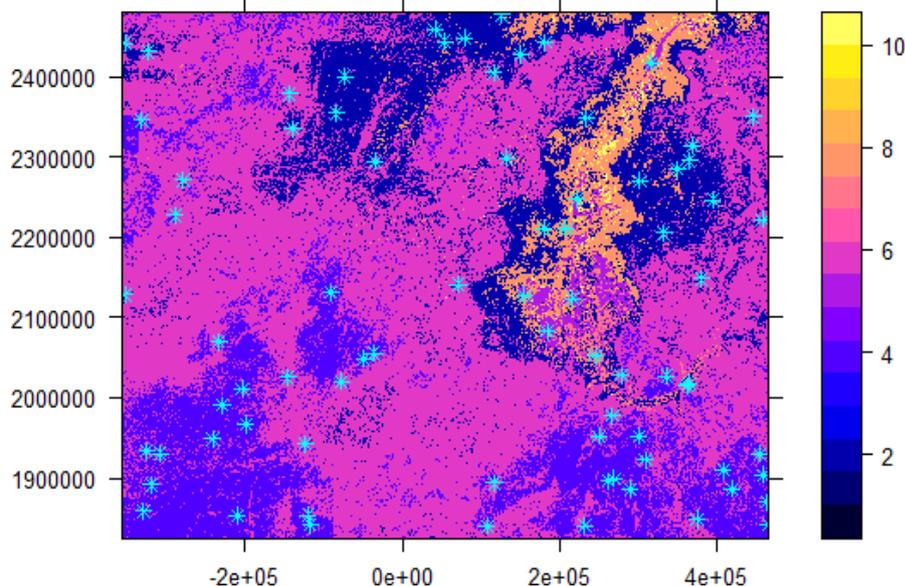


Figura 5.18: Número y lugar de muestras para actualización

SECCIÓN 3: INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN Y MOVILIZACIÓN DE RECURSOS

En esta sección se describen los requisitos y procedimientos para el intercambio de información y movilización de los recursos para el desarrollo o supervisión de los suelos afectados por salinidad.



6 Documentación de los productos e intercambio de información

6.1 Documentación de los productos

Los mapas de los suelos afectados por salinidad constituyen información espacial útil que describe el estado de los problemas de salinidad en la zona mapeada. Son mucho más útiles cuando se comparten con los interesados en la gestión o el uso alternativo de esos suelos. La documentación de los mapas añade valor a la información espacial. La documentación de mapeo se realiza mediante: 1) mapeo de los elementos del mapa durante su elaboración; 2) metadatos del mapa que acompañan a los mapas, y 3) publicación del mapa en plataformas, como son el sistema de información sobre los suelos de los países, revistas, etc.

6.1.1 Mapeo de los elementos del mapa

Los elementos en un diseño de mapa son objetos que ayudan a los usuarios del mapa a conectar visualmente la relación espacial en el producto del mapa. A diferencia de otros documentos que están separados del mapa, los elementos del mapa son integrales con el mapa. Los elementos clave de un mapa son los datos, la leyenda, el título, la brújula, la escala, la citación, las grillas de longitud y latitud, los reconocimientos, el año de publicación y la *data* de los datos. Estos elementos deben incluirse durante la elaboración del diseño del mapa.

Los datos del mapa se derivan de las capas SIG que produjeron el mapa. Los niveles de CE o PSI son ejemplos de datos de mapas en el mapa de los tipos de suelos afectados por salinidad. Los datos del mapa son la información central que lleva el mapa. Su representación clara es el primer paso para transmitir la información espacial prevista de los mapas. Buckley (2012) esbozó los siguientes cinco principios que generalmente se consideran importantes al hacer un buen mapa: buen contraste visual, legibilidad, orientación figurativa del terreno, organización jerárquica y equilibrio.

Un buen contraste visual mejora el atractivo estético del mapa y ayuda a los lectores a identificar la distinción entre los diferentes niveles de los datos del mapa. En el mapeo de los suelos afectados por salinidad, el buen contraste visual se logra mediante el uso de una simbología de colores distintos para los diferentes tipos e intensidad de los problemas de salinidad en el suelo. La Figura 6.1 es un ejemplo de la simbología del color para las diferentes clases de problemas de salinidad en el suelo.

La legibilidad se refiere a la presentación del mapa para permitir la fácil lectura y comprensión de su mensaje por parte de los usuarios. La legibilidad se centra en los elementos del mapa y el etiquetado. Es necesario que los elementos del mapa sean claramente visibles y que transmitan fácilmente el mensaje que se pretende transmitir con el mapa. El etiquetado y los textos del mapa desempeñan un papel crucial en la legibilidad del mapa. Se utilizan para transmitir la jerarquía intelectual; es decir, la clasificación de la importancia de lo que se etiqueta. Un ejemplo de jerarquía intelectual es el caso de los límites de la etiqueta en que se prefiere el uso de mayúsculas para los nombres de los países internacionales, las letras minúsculas en negrita para las unidades administrativas superiores dentro de un país, y así sucesivamente. En general, el principio de legibilidad hace hincapié en el uso de estilos de etiquetado grandes y en negrilla para la jerarquía alta, y en la disminución de la fuente y el estilo del texto para la jerarquía más baja. El principio de legibilidad también hace hincapié en lo siguiente al etiquetar:

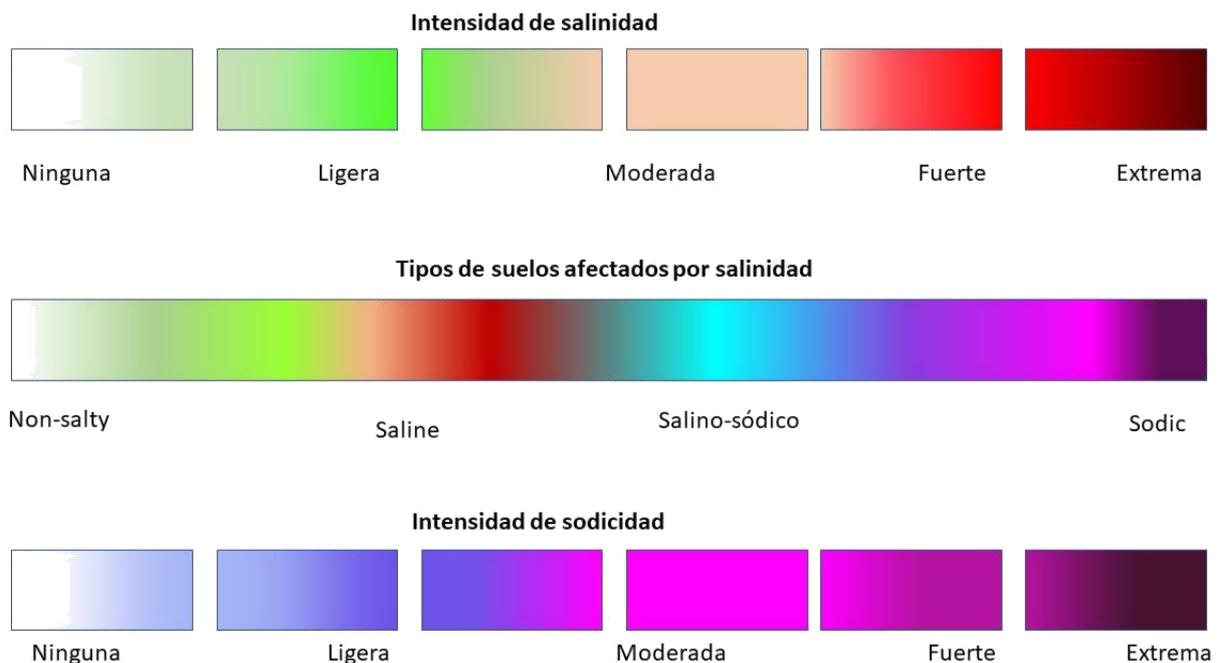


Figura 6.1: Representación de la salinidad en los mapas

- Evitar (o minimizar) la rotación del texto (al revés excepto para las etiquetas de la cuadrícula izquierda y derecha).
- Evitar (o minimizar) la mezcla de tipos de fuentes en una jerarquía de etiquetado.
- Separar las categorías de rango cambiando el tamaño de la fuente por 2.
- Utilizar el color azul profundo para los cuerpos de agua.
- Separar el mapa de los suelos afectados por salinidad y mapas de incertidumbre para mayor claridad (Figura 6.2).
- Revisar siempre la ortografía de las etiquetas.
- Un buen equilibrio visual en la legibilidad del mapa, incluyendo:
 - El tamaño, patrón y color de los símbolos.
 - Jerarquía visual de los símbolos y elementos.
 - Ubicación de los elementos del mapa con respecto a cada uno de ellos y el centro visual del mapa.
 - Retícula y línea limpia.

La orientación del fondo transmite la sensación de paisaje del mapa. Fija la perspectiva del usuario en áreas específicas del mapa. Los ejemplos de orientación de fondo incluyen la sombra de la colina, el encalado, la sombra de la gota, y el emplumado, entre otros.

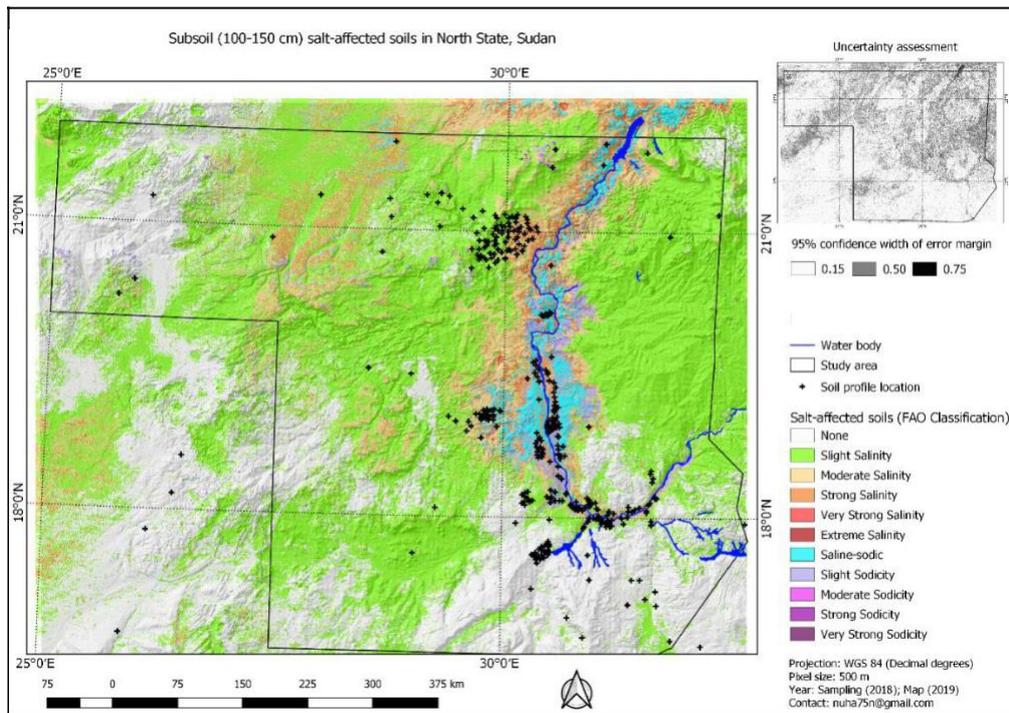


Figura 6.2: Documentación de ejemplo en el diseño de mapas

En el mapeo de los suelos afectados por salinidad, la orientación de fondo realza las zonas con determinados niveles salinos y transmite las relaciones visuales a los factores paisajísticos subyacentes de los niveles salinos (Figura 6.2).

6.1.2 Archivo de metadatos del mapa

Un metaarchivo es el archivo que contiene los metadatos del mapa. Los metadatos son los datos sobre los datos o simplemente la información sobre los datos (*métadonnée*, en francés). Proporciona un resumen del contenido del mapa, los datos utilizados y los métodos para crear el mapa, la fecha de publicación y otra información pertinente. Normalmente se trata de un archivo de texto de dos columnas, que puede convertirse en un archivo xml cuando sea necesario (Figura 6.3).

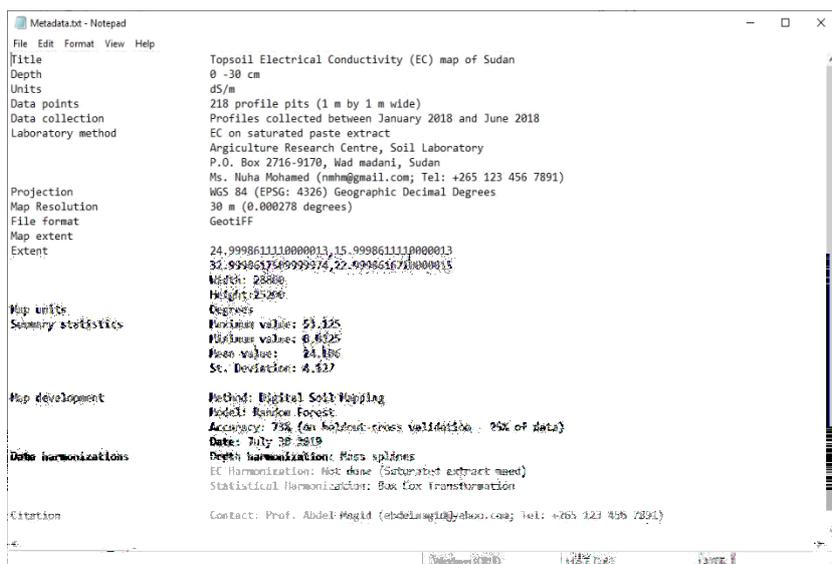


Figura 6.3: Ejemplo de metafichero que contiene metadatos de mapas

6.2 Intercambio de información

La planificación del intercambio de información es importante a fin de proporcionar información útil y orientada al impacto. Al planificar el intercambio de información sobre los suelos afectados por salinidad, es necesario tener en cuenta los tres aspectos siguientes (Figura 6.4):

- Identificación de las cuestiones clave que impulsan el intercambio de información.
- Especificación técnica para armonizar la información proveniente de distintas áreas/fuentes.
- Identificación de la plataforma para el intercambio de información.

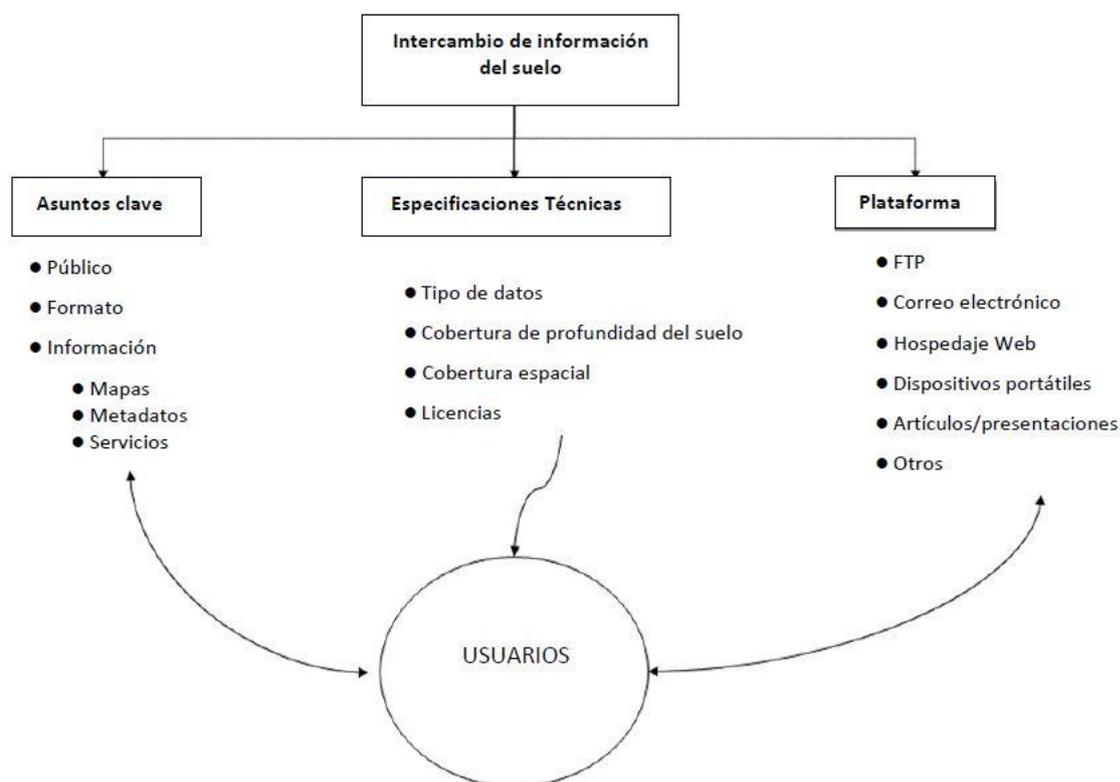


Figura 6.4: Áreas de consideración al planificar el intercambio de información

Los tipos de público destinatario influyen en el tipo de formato de la información, las características y el contenido de la información que va a compartirse. Por ejemplo, los investigadores y modelizadores a nivel regional pueden requerir archivos SIG de resolución gruesa, mientras que los funcionarios de extensión en los campos de cultivo pueden requerir imágenes en papel/digitales de alta resolución. El diseño para el intercambio de información enfocado a estos dos ejemplos es significativamente diferente. El tipo de público también influye en el tipo de medios a emplear como vehículo para el intercambio de información (Figura 6.4). Estas son algunas de las cuestiones clave que se deben considerar al diseñar un sistema de intercambio de información. El GSP-FAO ha propuesto archivos raster geoTiff con una resolución espacial de 1 km para mapas de indicadores de suelos (CE, pH, and PSI) y mapas de suelos afectados por salinidad para el intercambio de información entre países y usuarios a nivel regional y global (Cuadro 6.1). Sin embargo, cada país puede utilizar sus propias recomendaciones para planificar sistemas de intercambio de información sobre los suelos afectados por salinidad.

La especificación técnica se refiere a las características de los productos de los mapas y al contenido de la información que va a compartirse. Las características definen las particularidades de los productos de información que los usuarios buscarán cuando busquen la información. Incluyen los datos del mapa (CE, pH, PSI, suelos afectados por salinidad, etc.), la resolución vertical y horizontal de los mapas, la antigüedad de los datos, los derechos de acceso/uso de la información y los formato de archivo para acceso. Las especificaciones técnicas son particularmente importantes para orientar el desarrollo de la información, ya que las características que definen deben ser incluidas durante el desarrollo del mapa. La Cuadro 6.1 es un ejemplo de las especificaciones de los tres productos propuestos por el GSP-FAO para actualizar la información nacional y global de los suelos afectados por salinidad. Estas especificaciones también figuran en las guías de los países para el desarrollo de información nacional de suelos afectados por salinidad. (FAO, 2020).

Cuadro 6.1: Lista de verificación resumida para el desarrollo e intercambio de mapas de suelos afectados por salinidad en los países

Categoría	Profundidad	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Plataforma
Propiedad del suelo	0 – 30 cm	Mapas GeoTiff CE, pH, PSI (WGS 84 Geográfico)	Estadísticas de precisión (RMSE, ME, r^2 , NSE)	Metaarchivo	FTP
	0 – 30 cm	Mapas de incertidumbre GeoTiff CE, pH, PSI	Estadísticas (Ancho de predicción)	Metaarchivo	FTP
(Tamaño pixel 1 km)	30-100 cm	mapas GeoTiff CE, pH, PSI (WGS 84 Geográfico)	Estadísticas de precisión (RMSE, ME, r^2 , NSE)	Metaarchivo	FTP
	30-100 cm	mapas de incertidumbre GeoTiff CE, pH, PSI	Estadísticas (Ancho de predicción)	Metaarchivo	FTP
Suelos afectados por salinidad clasificados	0 – 30 cm	Mapas de incertidumbre GeoTiff (WGS 84 Geográfico)	Estadísticas de precisión (Kappa)	Metaarchivo	FTP
	0 – 30 cm	Mapas de incertidumbre GeoTiff (WGS 84 Geográfico)	Estadísticas (Ancho de predicción)	Metaarchivo	FTP
(Tamaño pixel 1 km)	30-100 cm	Mapas de severidad GeoTiff (WGS 84 Geográfico)	Estadísticas de precisión (Kappa)	Metaarchivo	FTP
	30-100 cm	Mapas de incertidumbre GeoTiff (WGS 84 Geográfico)	Estadísticas (Ancho de predicción)	Metaarchivo	FTP

Las cuestiones de derechos de autor son importantes cuando se trata de compartir información. Muchos países poseen información primaria, como son datos de perfiles de suelo medidos con base en CE, pH, PSI, etc., que tienen derechos de autor; sin embargo, podrían estar dispuestos a compartir información secundaria de conformidad con una licencia pública general (GPL por sus siglas en inglés). La información secundaria incluye mapas desarrollados a partir de datos primarios, informes técnicos y publicaciones científicas. Otros países tienen derechos de autor estrictos sobre toda la información del suelo. También hay otros países con GPL sobre toda la información del suelo. La información compartida públicamente debe estar bajo una GPL. La plataforma para la difusión de la información es la última consideración para el intercambio de información. Muchos factores influyen para elegirla, entre otros: el público destinatario, los avances en la tecnología y el desarrollo de programas

informáticos, la seguridad de la información y la magnitud de los datos disponibles. Las alternativas de plataforma para intercambiar información son librerías físicas y digitales (portales), servidor en línea (geoservidor), medios de comunicación social/noticias, sitio web dedicado (sistema de información sobre el suelo), almacenamiento accesible en línea (controlador de Google), etc. Dado que muchos países actualmente están desarrollando sistemas nacionales de información sobre el suelo (<http://www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-data/glois/inventory-countrysis/en/>), pueden utilizar plataformas de servicio de información del suelo con alternativas adecuadas para el intercambio de su información de suelos afectados por salinidad. GSP-FAO tiene un protocolo de transferencia de archivos dedicados (FTP) para intercambiar información nacional y un geoserver para información aportada a nivel mundial sobre los suelos afectados por salinidad.

6.3 Movilización de recursos

6.3.1. Estrategia de movilización de recursos

Valoración de necesidades

La construcción y la actualización de la información sobre suelos afectados por salinidad. requiere de recursos. Las actividades inherentes como la generación y/o recolección de datos, el análisis de datos, los protocolos para compartir información en desarrollo, así como el monitoreo y la actualización de información son algunos de los elementos centrales que requieren de numerosos recursos. Es necesaria una planeación adecuada de movilización de recursos para el desarrollo y mantenimiento exitoso de la información de suelos afectados por salinidad.

Como fue previamente descrito en la Sección 1, los suelos afectados por salinidad son muy importantes para la utilización y el manejo de los recursos globales. Ocupan más de mil millones de hectáreas globalmente y predominan en zonas climáticas áridas y semiáridas. Esta significativa proporción de territorio puede contribuir a la economía mundial si se utiliza de forma económica en un modo sustentable (Wu *et al.*, 2015). Los suelos afectados por salinidad también albergan muchas formas de biodiversidad (Wu *et al.*, 2015). Su proporción en la superficie terrestre puede ser una fuente de recursos para la implementación de actividades de secuestro de carbono. También son un soporte para la producción mundial de alimentos a través de actividades de agricultura biosalina (Abdelly *et al.*, 2008; Dajic-Stevanovic *et al.*, 2008; Nikalje *et al.*, 2018; <https://www.biosaline.org/>). Estos aspectos positivos fortalecen la necesidad de información adecuada sobre el estado y la extensión de los suelos afectados por salinidad. Además de los aspectos positivos de los suelos afectados por salinidad, éstos no son verdaderamente deseables en las áreas agrícolas. Tienen un impacto negativo general en la productividad de los cultivos. Se están haciendo numerosos esfuerzos para manejar, reducir o prevenir y recuperar los suelos afectados por salinidad en áreas agrícolas.

La movilización de recursos para desarrollar y actualizar periódicamente la información sobre problemas de salinidad en los suelos es importante para el manejo sustentable de los suelos afectados por salinidad. De acuerdo con (FAO, 2012) un paso inicial hacia la movilización de recursos es la valoración de necesidades. La valoración de necesidades considera las áreas esenciales donde la movilización de recursos es crucial. También es un proceso para justificar la inversión en el desarrollo de información acerca de los problemas de salinidad en los suelos. (Figura 7.1). Las siguientes áreas, que requieren de numerosos recursos, pueden servir de guía para planear la evaluación de necesidades de movilización de recursos:

- Estudio de suelos y análisis de laboratorio para la estimación de los indicadores del suelo de problemas de salinidad
- Adquisición de equipo y predictores espaciales de alta resolución para detectar suelos afectados por salinidad
- Desarrollo de la capacidad técnica para la construcción de productos de información espacial (sistemas)
- Desarrollo de infraestructura para sistemas de intercambio de información espacial
- Establecimiento e implementación de sistemas de monitoreo periódico.

La valoración de necesidades para la movilización de recursos deberá establecer la importancia de desarrollar o actualizar la información sobre los suelos afectados por salinidad. La coordinación con las prioridades de desarrollo de los gobiernos, las iniciativas regionales o globales y las sinergias entre las partes interesadas son algunas de las áreas que deberán ser focalizadas durante la evaluación de necesidades para la movilización de recursos. Éstas ayudarán a identificar las oportunidades de participación de estas importantes partes interesadas.

Las valoraciones de necesidades para movilización de recursos se pueden llevar a cabo mediante a estudios como son, entrevistas, debates y revisión de literatura (FAO, 2012). Sus resultados se alimentan en el desarrollo de estrategia para la movilización de recursos (Figura 6.5).

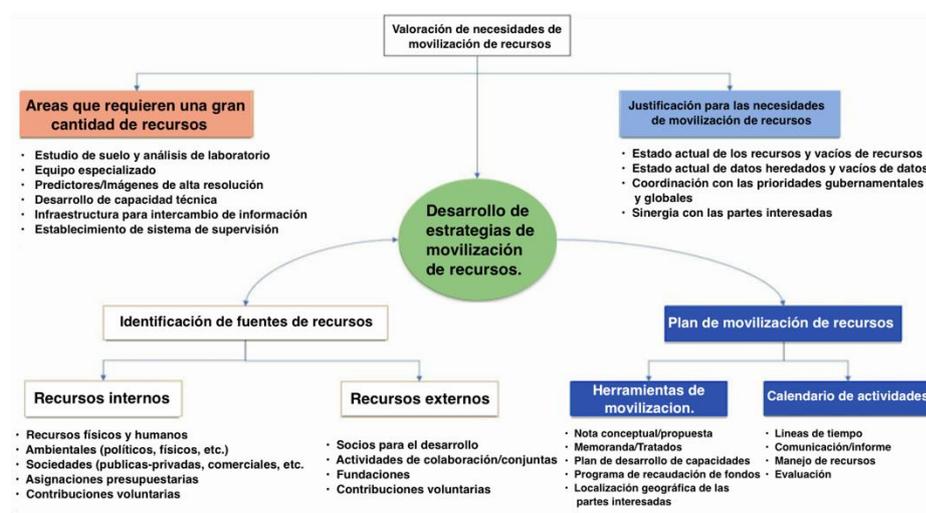


Figura 6.5: Estrategia de movilización de recursos para la elaboración y actualización de información de suelos afectados por salinidad

Identificación de fuentes

La identificación de fuentes de recursos es de carácter prioritario en la movilización de recursos. Implica la valoración de las características de diferentes números y tipos de fuentes. También incorpora el mapeo de tiempos y duración de la disponibilidad de recursos para las fuentes identificadas. Esto es especialmente importante cuando se focalizan múltiples fuentes. Una identificación adecuada de fuentes de recursos mejora la eficiencia cuando se seleccionan los medios (herramientas). Las fuentes internas y externas son dos categorías principales de fuentes de recursos (FAO, 2012). Las fuentes internas incluyen recursos humanos y de capital disponibles como son, capacidad técnica, equipamiento, marcos institucionales (ambientales), actividades de generación de

ingresos, sociedades (asociaciones públicas y privadas o asociaciones comunitarias y privadas), asignaciones presupuestarias gubernamentales y contribuciones voluntarias de fundaciones locales o individuos. La disponibilidad de una base de datos y una red entre expertos técnicos en suelos afectados por salinidad y una red entre instituciones que cuentan con datos de suelos también son recursos importantes. Las fuentes internas son de importancia crítica durante los estudios del suelo y al y el monitoreo a largo plazo de los problemas de salinidad en suelos. El entorno institucional también afecta el intercambio de datos, las actividades de generación de ingresos para apoyar el marco de monitoreo y el compromiso potencial con la adquisición de recursos de fuentes externas de recursos. Las fuentes externas incluyen socios para el desarrollo internacional/regional, la colaboración potencial (incluida la investigación), con organismos/instituciones regionales o internacionales sobre áreas específicas, entre otros. Algunas organizaciones regionales/internacionales cuentan con valiosos programas de cooperación técnica (TCP), que pueden brindar un apoyo sustancial en muchas de las áreas clave de desarrollo de información ambiental y de suelos.

Plan de movilización de recursos

El plan de movilización de recursos es una hoja de ruta práctica para movilizar recursos para implementar el desarrollo y la actualización periódica de información espacial sobre suelos afectados por salinidad. Implica el desarrollo de planes para la comunicación, implementación de actividades de movilización de recursos, así como el monitoreo y la evaluación del avance. El plan de movilización de recursos señala el medio (las herramientas) que deben usarse para la movilización de recursos y el cronograma para su implementación. Las notas conceptuales y propuestas son ejemplos de herramientas para la obtención de fondos mientras que los memorandos son frecuentemente usados para movilizar contribuciones en especie, equipos y redes de expertos (FAO, 2012; Kipchumba *et al.*, 2013). Un plan adecuado de movilización debe tener estrategias múltiples usando diferentes herramientas (medios) para focalizar muchas fuentes de recursos. Esto es particularmente apropiado para suelos afectados por salinidad donde los estudios de campo, los análisis de laboratorio y el almacenamiento en línea de servicios de información, son una fuente de inversión inicial única. Este tipo de inversión es abordado en gran parte con múltiples fuentes de recursos.

Diferentes organizaciones tienen diferentes requerimientos y formatos para las herramientas de movilización de recursos (también conocidos como medios para la movilización de recursos). Es importante que estos requerimientos sean claramente observados cuando se prepare la estrategia de comunicación. Dado que estas herramientas exponen la idea y las necesidades de la movilización al donante, es importante que se les dé la atención adecuada durante su preparación. Estas son algunas importantes áreas de atención al momento de preparar las herramientas:

- a) Identificar las áreas que consumen una gran cantidad de recursos durante el desarrollo/actualización de información de suelos afectados por salinidad
- b) Costo indicativo/real para la implementación de las áreas identificadas en el punto a) anterior
- c) Justificación de la movilización de recursos
- d) Calendario de actividades

La Cuadro 6.2 presenta un resumen de cinco pasos para desarrollar e implementar el plan de movilización de recursos. Estos pasos son secuenciales y comienzan con la identificación de la(s)

área(s) de enfoque que requieren movilización de recursos y sus respectivas fuentes potenciales de recursos. Los pasos subsecuentes son guiados por el primer paso, lo que implica que el primer paso determinará el éxito/fracaso de el plan de movilización (FAO, 2012).

Cuadro 6.2: Pasos para la planeación de la movilización de recursos para la obtención de información actualizada sobre suelos afectados por salinidad

Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
Identificación de fuentes de recursos	Identificación de herramientas	Desarrollo de herramientas	Negociación	Monitoreo y evaluación
Trazar las fuentes potenciales de recursos y sus intereses	Hacer coincidir las herramientas con los donadores potenciales	Iniciar juntas entre fuente y socio	Lograr acuerdos y condiciones	Supervisar y evaluar periódicamente el progreso
Verificar la fuentes y sus condiciones	Identificar las herramientas adecuadas.	Desarrollar las herramientas para la movilización de recursos	Desarrollar y formalizar el acuerdo vinculante	Informe de retroalimentación
Identificar las áreas que los recursos pueden apoyar		Iniciar comunicación con la fuente identificada.	Asegurar el recurso	
Identificar las lagunas en el financiamiento				

6.4 Programa de desarrollo de capacitación técnica para el desarrollo de información espacial

6.4.1 Descripción del programa

El programa de desarrollo de capacidades en el mapeo digital de suelos afectados por salinidad fue diseñado para ayudar a los países o a los socios de la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) a lograr un conocimiento técnico y las habilidades para desarrollar mapas de suelos afectados por salinidad con objeto de supervisar periódicamente los problemas de salinidad en sus países. En el espíritu de los enfoques impulsados por los países y el sistema global de información de suelos, nunca se hará suficiente hincapié en las necesidades armonizadas de capacidades y productos nacionales. Se contempla que creación de la capacidad nacional y la información armonizada de los suelos afectados por salinidad, enviarán un mensaje uniforme para crear conciencia nacional, regional y mundial de la necesidad del manejo sustentable y el uso económico de estos suelos.

Existen varios métodos y enfoques en la literatura, así como indicadores para evaluar los suelos afectados por salinidad. Este programa de desarrollo de capacidades se enfoca en apoyar la armonización de protocolos, la uniformidad en los informes y el empoderamiento técnico de los funcionarios nacionales para proporcionar información confiable de la situación nacional de los suelos afectados por salinidad. Hace uso de conceptos de mapeo digital de suelos, computación estadística y herramientas SIG para producir información espacial sobre salinidad de suelos. Este programa apunta hacia los puntos focales nacionales encargadas del mapeo de suelos afectados por salinidad en sus países. El programa también es adecuado para los profesionales avezados en la generación de información y en el manejo de suelos afectados por salinidad. A las personas interesadas en el mapeo digital y el monitoreo de problemas de salinidad, el programa les podrá resultar ideal para perfeccionar sus habilidades de modelado espacial.

6.4.2 Duración y requisitos

Este programa fue diseñado para tomar dos semanas de recolección de datos y 64 horas de contacto entre los participantes e instructores en el desarrollo de información espacial. Se requiere que los participantes cuenten con sus propios conjuntos de datos durante la capacitación. La implementación exitosa del programa requiere de lo siguiente:

- 1) Experiencia
 - a. Ciencia básica de suelos y conocimiento de suelos afectados por salinidad.
 - b. SIG y conocimiento de cómputo.
 - c. Entendimiento adecuado de los problemas de salinidad en suelo de acuerdo con el país focalizado
 - d. Entendimiento básico de los indicadores de sales en el suelo y análisis de métodos de análisis en laboratorio
- 2) Equipo y programas de computación
 - a. Computadora con características mínimas de: procesador core i3, 8GB de RAM y suficiente capacidad de almacenamiento
 - b. Programas QSIG, ILWIS, R y RStudio instalados en sus últimas versiones
 - c. Los siguientes plugins y paquetes instalados:
 - i. QSIG – Semi Automatic Classification, Profile Tool
 - ii. R – Rstudio, raster, caret, rgdal, sp, soiltexture, soilassessment, randomforest, gstat, arm, automap, e1071, GSIF, Hmisc, corrplot, factoextra, spup, purr, ncf, aqp, car, pl yr y kernlab.
 - d. Programa de hoja de calculo (por ej.: Excel y Access)
- 3) Recursos
 - a. Conexión a internet.
 - b. Manual técnico de mapeo de suelos afectados por salinidad.
 - c. Datos del país para el mapeo de la salinidad en el suelo (Cuadro 4.1).

6.4.3 Objetivos y resultados

Meta del programa: La meta general del programa es optimizar las capacidades técnicas de los países para producir información espacial consistente, confiable y comparable de los suelos afectados por salinidad. Resultados del Programa: Al final del programa, se espera que los participantes sean capaces de:

1. Producir bases de datos actualizadas para el mapeo de suelos afectados por salinidad en sus países.
2. Establecer una referencia para monitorear los suelos afectados por salinidad en sus países.
3. Producir mapas nacionales del estado de los suelos afectados por salinidad en sus países.
4. Contribuir a el mapeo mundial de suelos afectados por salinidad.

Objetivos de aprendizaje: El programa fue diseñado para:

1. Permitir al participante recopilar y organizar datos relevantes para el mapeo de suelos afectados por la salinidad.

2. Presentar a los participantes las metodologías de punta para el mapeo digital de suelos afectados por salinidad.
3. Perfeccionar las capacidades técnicas de los participantes en el desarrollo de información espacial de suelos afectados por salinidad.
4. Permitir que los participantes cuantifiquen la precisión e incertidumbre de los mapas de suelos afectados por salinidad.

6.4.4. Mejorar las habilidades y conocimientos de los participantes en documentación e intercambio de información sobre suelos

Cuadro 6.3: Esquema genérico de capacitación

#	Tema	Subtema	Duración	Resultado
Parte 1: Preparación de entrada de datos e instalación de programas				
	Recursos	1. Directrices para los países y especificaciones técnicas para el mapeo de suelos afectados por salinidad 2. Notas de la Lección 1: Requisitos y preparación de datos		
1	Identificación de recursos y recolección de los datos requeridos	Identificación de fuentes de datos de suelos/SIG	1 semana	Datos recopilados de suelo y SIG nacionales para el mapeo de suelos afectados por salinidad
		Recolección de datos		
		Verificación de datos		
		Documentación de los datos recolectados		
2	Preparación de la entrada de datos	Preparación de los datos de suelos	1 semana	Entrada de datos organizados
		Preparación de los datos SIG		
	Recursos	1. Notas de la Lección 2: Instalación de programas de computación y organización de datos		
3	Instalación de programas de computación y organización de datos	Adquisición de programas de computación	1 semana	
		Instalación de programas de computación y guía para principiantes		
		Organización de la entrada de datos		

#	Tema	Subtema	Duración	Resultado
Parte 2: Modelado de estudios de caso de suelos afectados por salinidad				
Recursos		Notas de la Lección 3: Modelado espacial de indicadores del suelo (propiedades) Notas de la Lección 4: Modelado espacial de suelos afectados por salinidad Datos de estudio de caso		
1	Principios básicos de suelos afectados por salinidad	Suelos afectados por salinidad y el problema de salinidad	1 h	Puntuación
		Distribución de los suelos afectados por salinidad		
		Importancia de evaluar los suelos afectados por salinidad		
		Métodos de clasificación		
		Actividad: Examen corto		
2	Requisitos de la entrada de datos	Indicadores de salinidad		
		Propiedades del suelo	1 h	
	para el mapeo de suelos afectados por salinidad	Indicadores de sensores remotos	30 min	Puntuación
		Otras covariables		
		Tipos de datos y fuentes de datos		
		Actividad: Examen corto		
4	Preparación de la entrada de datos	Organización de datos de hoja de calculo	2 h	Base de datos y Documentación Actualizadas
		Organización de capas espaciales en el SIG	3 h	
		Presentación de informes y documentación	1.5 h	
		Actividad: Organizar base de datos de mapeo	30 min	
5	Introducción al programa de computación	Operaciones en la hoja de calculo	4 h	
		QSIG: Operaciones en el SIG y análisis del terreno		
		ILWIS: Desarrollo de la base de datos SIG		
		R y RStudio: Modelado Estadístico de la CDS (Mapeo digital de suelos)		
		Actividad: Examen corto		Puntuación

#	Tema	Subtema	Duración	Resultado
6	CDS de indicadores de suelos afectados por salinidad.	Armonización de entrada de datos	3 h.	Mapas de indicadores de salinidad
		Modelado de la CDS	20 h.	
		Evaluación de la precisión		Informe de precisión
		Presentación de informes y documentación		Documentación
7	Modelado de suelos afectados por salinidad	Clasificación de salinidad	6 h.	Mapas de salinidad
		Evaluación de la incertidumbre		Mapas de Incertidumbre
		Presentación de informes y documentación		Documentación
8	Intercambio de información	Políticas de intercambio de información	4 h	Entrega de documentos para el Mapa Mundial de Salinidad
		Contenidos del intercambio de información		
		Contribución a el mapeo mundial de salinidad de suelos		
Parte 3: Desarrollo de una base de datos nacional de suelos afectados por salinidad				
Recursos		Datos a nivel nacional para el desarrollo de información espacial de suelos afectados por salinidad		
9	Mapeo de indicadores	Desarrollo de información espacial de indicadores de problemas de salinidad	1 día	Mapas compartidos de indicadores y tipos de suelos afectados por salinidad
10	Mapeo de suelos afectados por salinidad	Desarrollo de información espacial de suelos afectados por salinidad	1 día	

6.4.5. Método de impartición

El programa está diseñado para impartir lecciones presenciales/en línea, demostraciones prácticas y exámenes de reflexión.

1. Lecciones

Los puntos 1 and 2 son forman parte de la lección de introducción que fue diseñada para poner en contacto a los participantes con las bases de los suelos afectados por salinidad, su clasificación y los requisitos de entrada de datos para el mapeo. Las presentaciones en PowerPoint, los debates en clases y las consultas con los materiales de recursos deben ser los adecuados para la transferencia de conocimientos. Los exámenes tendrán retroalimentación para la comprensión de las lecciones.

2. Demostraciones con ejemplos elaborados

La parte 2 del programa está enfocada en la exposición de los participantes a las herramientas de mapeo. Las demostraciones que utilizan conjuntos de datos de estudios de caso ponen énfasis en ayudar a los participantes a comprender los pasos del procedimiento para elaborar el mapeo de los suelos afectados por salinidad y a familiarizarse con las herramientas de mapeo.

3. Ejercicio práctico con datos del participante

La parte 3 del programa está dedicada al trabajo de los participantes con sus propios conjuntos de datos. Los participantes aplicarán las habilidades adquiridas en la Parte 1 a sus propios conjuntos de datos. Podrán trabajar independientemente en el conjunto de datos de su país.

6.4.6. Entregables

Se esperan los siguientes entregables para el final del programa de capacitación:

- i. Una base de datos nacional de suelos afectados por salinidad actualizada y armonizada
- ii. Información espacial nacional (mapa con documentación) de suelos afectados por salinidad
- iii. Mapas nacionales de indicadores de salinidad (CE_{SE} , pH, PSI) para profundidades de 0-30 y 30-100 cm enviados a la AMS (Alianza Mundial por el Suelo) como contribución a el mapeo mundial de suelos afectados por salinidad
- iv. Mapas mundiales de incertidumbre para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Referencias

- Abdely C., Ozturk M., Ashraf M., Grignon C. 2008. *Biosaline agriculture and high salinity tolerance*. Verlag AG. Berlin.
- Abd-Elwahid M., 2018. *Influence of long-term wastewater irrigation on soil quality and its spatial distribution*. Annals of Agricultural Sciences, 63:191-199.
- Abou-Baker N., El-Dardiry E. 2015. *Integrated management of salt-affected soils in agriculture: Incorporation of soil salinity control methods*. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Abrol I.P., Yadav J.S.P, Massoud F.I. 1988. *Salt-affected soils and their management*. FAO Soils Bulletin 39. FAO, Rome.
- Abuelgasim A, Ammad R. 2019. *Mapping soil salinity in arid and semi-arid regions using Landsat 8 OLI satellite data*. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 13: 415-425.
- Amrhein C. 1996. *Australian sodic soils: Distribution, properties, and management*. Soil Science 161. pp412.
- Bivand R., Keitt T, Rowlingson B., Pebesma E. 2019. rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/index.html>
- Bivand R., Keitt T., Rowlingson B., Pebesma E. 2019. rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/index.html>
- Bouchhima R.A., Sarti M., Ciolfi M., Lauteri M., Ksibi M., 2008. *Decision tree for mapping of halophyte cover around Ghannouch, Tunisia*. Environmental Monitoring and Assessment, 190: 742.
- Box, G. E. P. and Cox, D. R. (1964). *An analysis of transformations*, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 26, 211-252.
- Buckley A. 2012. *Make maps people want to look at: Five primary design principles for cartography*. Winter 2012. <https://www.esri.com/news/arcuser/0112/files/design-principles.pdf>
- Cherlet M., Hutchinson C., Reynolds J., Hill J., Sommer S., von Maltitz G. 2018. *World Atlas of Desertification*. Publication Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/9205.
- Chi C.M., Wang Z.C. 2010. *Characterizing salt-affected soils of Songnen plain using saturated paste and 1:5 soil-to-water extraction methods*. Arid Land Res. Mgmt. 24:1-11. doi:10.1080/15324980903439362.
- Chinese Academy of Sciences. 2001. Chinese soil taxonomy. Coordinated by Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, p 203.
- Choudhary O.P., Kharche V.K. 1993. *Soil salinity and sodicity*. In *Soil Science: An Introduction*. Eds. Leeper GW and Uren NC. Chapter 10. pp 354-385. Melbourne University Publishing.
- Corwin DL, Lesch SM. 2005. *Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1–3 Spec Iss.): 11–43.
- Craig D.A., Hempel J. 2017. *Soil taxonomy and soil classification*. International Encyclopedia Of Geography: People, the Earth, Environment and Technology, 1-15, <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0347>
- Dajic-Stevanovic Z., Pecinar I., Kresovic M., Vrbnicanin S., Tomovic L. 2008. *Biodiversity, utilization and management of grasslands of salt affected soils in Serbia*. Community Ecology, 9: 107-114.
- Daliakopoulus I.N., Tsanis I.T., Koutroulis A., Kourgialas N.N., Varouchakis A.E., Karatzas G.P., Ritsema C.J. 2016. *Threat of salinity: A European scale review*. Science of the Total Environment, 573(15): 727-739.

- Dalton F.N., Van Genuchten M T. 1986. *The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity*. Geoderma, 38(1–4): 237–250.
- Efron, B. 1992. *Jackknife-after-bootstrap standard errors and influence functions*. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 83–127.
- Fanning D.S., Fanning M.C.B., 1989. *Soil, Morphology, Genesis, and Classification*. John Wiley & Sons, New York.
- FAO and ITPS. 2018. *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report*. Rome. 162 pp.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CSA and JRC. 2008. *Harmonized World Soil Database (version 1.0)*, FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- FAO. 1984. *Prognosis of salinity and alkalinity*. FAO, Rome.
- FAO. 2006. *Guidelines for soil description*. FAO, Rome.
- FAO. 2012. *A Guide to resource mobilization: promoting partnership with FAO*. FAO. Rome.
- FAO. 2020. *Country guidelines and specifications for mapping salt-affected soils*. Rome.
- FAO-ITPS-GSP. 2015. *Status of the world's soil resources*. FAO-ITPS-GSP Main Report, FAO, Rome, Italy, pp 125–127.
- Farifteh J., van de Meer F., van der Maijde M., Atzberger C., 2008. *Spectral characteristics of salt-affected soils: A laboratory experiment*. Geoderma, 145: 196-206.
- Farzamian M., Paz M.A., Paz A.M., Castanheira N.L., Goncalves M.C., Santos F.A.M., Triantafilis J. 2019. *Mapping soil salinity using electromagnetic conductivity imaging—A comparison of regional and location-specific calibrations*. Land Degradation and Development, 30(12): 1393-1406.
- Fox J., Wesberg S., Price B. 2020. car: Companion to Applied Regression. <https://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html>
- Gorji T, Yildirim A., Sertel E, Tanik A. 2019. *Remote sensing approaches and mapping methods for monitoring soil salinity under different climate regimes*. International Journal of Environment and Geoinformatics 6(1): 33-49 (2019).
- GSP-FAO. 2018. *Report of the Sixth Meeting of the Plenary Assembly of the Global Soil Partnership*. GSPPA-VI/18/Report. <http://www.fao.org/3/CA0389EN/ca0389en.pdf>
- Gupta H.V., Kling H. 2011. *On typical range, sensitivity, and normalization of mean squared error and Nash-Sutcliffe efficiency type metrics*. Water Resources Research, 47: W10601.
- Hengl T. 2019. GSIF: Global Soil Information Facilities. <https://cran.r-project.org/web/packages/GSIF/index.html>
- Hijman R.J. 2020. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>
- Hogg T.T.J., Henry J.L. 1984. *Comparison of 1:1 and 1:2 suspensions and extracts with the saturation extracts in estimating salinity in Saskatchewan*. Can. J. Soil Sci. 1984, 64, 699–704.
- Holst E, Thyregod P. 1999. *A statistical test for the mean squared error*. Journal of Statistical Computation and Simulation, 63(4): 321-347
- Horneck, D.S., Ellsworth, J.W., Hopkins, B.G., Sullivan, D.M., Stevens, R.G. 2007. *Managing Salt-Affected Soils for Crop Production. PNW 601-E. Oregon State University, University of Idaho, Washington State University*.

IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Ivuskin K., Bartholomeus H., Bregt A.K., Pulatov A., Kempen B., de Sousa L. 2019. *Global mapping of soil salinity change*. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111260.

Jafari A., Finke P.A., Wauw J.V., Ayoubi S., Khademi H. 2012. *Spatial prediction of USDA - great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types*. *European Journal of Soil Science*, 63(2): 284-298. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01425.x>

Jalali M., Merikhpour Kaledhonkar M.J., van der Zee SEATM. *Agriculture Water Management*, 95(2): 143-153.

Kargas G., Chatzigiakoumis I., Kollias A., Spiliotis D., Massas I., Kerkides P. 2018. *Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil:water 1:1 and 1:5 ratios extracts*. *Water*, 10:1589, doi:10.3390/w10111589.

Karla N.K., Joshi D.C., 1994. *Spectral reflectance characteristics of salt-affected arid soils of Rajasthan*. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 22(3): 183-193.

Kelly W.P., Brown S.M. 1934. *Principles governing the reclamation of alkali soils*. *Hilgardia*, 8(5): 149-177.

Khitrov B.N., Rukhovivh D.I., Kalinina N.V., Novikova A.F., Pankova EI, Chernousenko G.I. 2009. *Estimation of the Areas of Salt-Affected Soils in the European Part of Russia on the Basis of a Digital Map of Soil Salinization on a Scale of 1: 2.5 M*. *Eurasian Soil Science*, 42(6): 581–590.

Kipchumba S.K, Zhimin L., Chelagat R. 2015. *A study on the sources of resources and capacity building in resource mobilization: case of private chartered universities in Nakuru Town, Kenya*. *Journal of International Education and Leadership*, 3(2): 1-18.

Krasilnikov P., Gutierrez-Castorena M.C., Ahrens RJ, Cruz-Gaistardo C.O., Sedov S., Solleiro-Robelledo E., 2013. *The soils of Mexico*. Springer, London.

Kuhn M. 2020. caret: *Classification and Regression Training*. <https://cran.r-project.org/web/packages/caret/index.html>

Landon J.R. 1984. *Booker Tropical Manual*. Longman Inc., New York, pp. 157-163.

Lesch S.M., Rhoades J.D., Lund L.J., Corwin D.L. 1992. *Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements*. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 540-548.

Li J., Pu L., Zhu M., Zhang J., Li P., Dai X., Xu Y., Liu L. 2014. *Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review*. *Geoderma*, 226-227: 130-139.

Li Z., Zhu Q., Gold C. 2005. *Digital Terrain Modeling: Principles and methodology*, CRC Press: Boca Raton, FL, 323pp.

Mandal A.K., Reddy G.P. O, Ravisankar T. 2011. *Digital database of salt affected soils in India using Geographic Information System*. *Journal of Soil Salinity and Water Quality*, 3, 16–29.

Massoud, F.I. 1976. *Basic principles for prognosis and monitoring of salinity and sodicity*. In: *Proc. International Conference on Managing Saline Water for Irrigation*. Texas Tech. University, Lubbock, Texas. 16-20 August 1976. pp. 432-454.

- Matternicht G.I., Zinc J.A.. 2003. *Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints*. Remote Sensing of Environment, 85:1-20.
- McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L, Minasny B. 2003. *On digital soil mapping*. Geoderma 117: 3-52
- Miller J.J., Brierley J.A. 2011. *Solonetzic soils of Canada: genesis, distribution, and classification*. Canadian Journal of Soil Science, 91:889–902.
- Miller J.J., Pawluk S. 1994. *Genesis of solonetzic soils as a function of topography and seasonal dynamics*. Canadian Journal of Soil Science, 74: 207–217.
- Munn L.C., Boehm M.M. 1983. *Soil genesis in a Natrargrid-Haplargid complex in Northern Montana*. Soil Science Society of America Journal, 47(6): 1186-1192.
- Muyen Z., Moore G.A., Wrigley R.J. 2011. *Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in southeast Australia*. Agriculture Water Management, 99:33-41.
- Nikalje C.G., Srivastava A.K., Pandey K.D., Suprasanna P. 2018. *Halophytes in biosaline agriculture: mechanism, utilization, and value addition*. Land Degradation and Development, 29(4): 1081-1095.
- Omuto, C.T. 2020. *Soil assessment: Assessment Models for Agriculture Soil Conditions and Crop Suitability*. <https://cran.r-project.org/web/packages/soilassessment/index.html>
- Ozcan H., Ekinci H., Yigini Y., Yuksel O., 2006. *Comparison of four soil salinity extraction methods. Proceedings of 18th International Soil Meeting on “Soil Sustaining Life on Earth, Managing Soil and Technology”, May 22–26, 2006, Sanliurfa, Turkey, p. 697–703.*
- Pankova EI, Konyushkova M.V. 2013. *Climate and soil salinity in the deserts of Central Asia*. Eurasian Soil Science, 46(7): 721–727.
- Pankova EI. 2015. *Salt-affected soils of Russia: Solved and unsolved problems*. Eurasian Soil Science, 48:115–127.
- Pebesma E., Bivand R. 2020. *sp: Classes and Methods for Spatial Data*. <https://cran.r-project.org/web/packages/sp/index.html>
- Perri S., Suweis S., Entekhabi B., Molini A. 2018. *Vegetation controls on dryland salinity*. Geophysical Research Letters, 45(21): 11,669-11,682.
- Piotr H. 2008. *Quantitative and qualitative differentiation of soil salinity in Poland*. Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 1-4.
- Pulido-Bosch A., Rigol-Sanchez J.P., Vallejos A., Andreu J.M., Ceron J.C., Molina-Sanchez L., Sola F. 2018. *Impacts of agricultural irrigation on groundwater salinity*. Environmental Earth Sciences volume, 77, 197. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7386-6>
- Rangesamy P., Marchuk A. 2011. *Cation ratio of soil structural stability (CROSS)*. Soil Research, 49: 280-285.
- Richards L.A. 1954. *Diagnosis and improvements of saline and alkali soils*. Agriculture Handbook No. 60. USDA, Washington.
- Rietz D.N., Haynes R.J. 2003. *Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity*. Soil Biology and Biochemistry, 35: 845-854.
- RStudio Team. 2015. *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Sawicka K., Heuvelink G.B.M., Walvoort D.J.J. 2018. *Spatial uncertainty propagation analysis with the spup R package*. The R Journal 10(2): 180-199.

- Schaetzl, R.J., Anderson, S., 2005. *Soils, Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schirman M., Gebbers B., Kramer E., Seidel J. 2011. *Soil mapping with an on-the-go sensor*. *Sensors*, 1(1): 573-598. <https://doi.org/10.3390/s110100573>
- Schofield R., Thomas D.S.G, Kirkby M.J. 2001. *Causal processes of soil salinization Tunisia Spain and Hungary*. *Land Degradation and Development*, 12(2): 163-181.
- Scudiero E., Corwin L.D., Ray A., Yemoto .K, Clary W., Wang Z., Skaggs T. 2017. *Remote sensing is a viable tool for mapping soil salinity in agricultural lands*. *California Agriculture*. 71. 10.3733/ca.2017a0009.
- Sheikholeslami R., Razavi S. 2017. *Progressive Latin hypercube sampling: An efficient approach for robust sampling-based analysis of environmental models*. *Environmental Modelling and Software*, 93: 109-126.
- Sheng J., Ma L., Jiang P., Li B., Huang F., Wu H. 2010. *Digital soil mapping to enable classification of the salt-affected soils in desert agro-ecological zones*. *Agriculture Water Management*, 97(12): 1944-1951.
- Skarie R.L., Arndt JL, Richardson JL. 1987. *Sulfate and gypsum determination in saline soils*. *European Soil Science Society of America Journal*, 51:901-905.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA Agriculture Handbook 436. Natural Resource Conservation Service. Washington DC.
- Sonmez S., Buyuktas D., Asri F.O.. 2008. *Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies*. *Geoderma*, 144: 361-369.
- Sparks D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press.
- Squires, V.R., Glenn E.P. 2004. *Salination, desertification, and soil erosion*. In: *Squires, V.R. (Ed.), The Role of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries in Human Nutrition*. UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK.
- Sumner M.E., Naidu R. 1998. *Sodic Soils Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences*. Oxford University Press, New York.
- Szabolcs I. 1979. *Review of research on salt-affected soils*. UNESCO, France.
- Szabolcs I. 1987. The global problems of salt-affected soils. *Acta Agronomica Hungarica*, 36:159-172.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Minasny B., Toomanian N., Zeraatpisheh M., Amirian-Chakan A., Triantafilis J. 2019. *Digital mapping of soil classes using ensemble of models in Isfahan Region, Iran*. *Soil Systems*, 3, 37. doi:10.3390/soilsystems3020037
- Toth G., Adhikari K., Varallyay G., Toth T., Bodis K., Stolbovoy V. 2008. *Updated map of salt affected soils in the European Union*. In: *Toth et al. (Eds). Threats to soil quality in Europe*. EUR 23438. Scientific and Technical Research series Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities p.61-74. JRC.
- Triantafilis J., Odeh I.O.A., McBratney A.B.. 2001. *Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton*. *Soil Society of America Journal*, 65:869-878.
- USDA-NRCS, 1999. *The mechanics of soil survey*. Lincoln Nebraska.
- Weibel R., Heller M. 1991. *Digital terrain modelling*. In: *Maguire, D. J.; Goodchild, M. F.; Rhind, D. W., ed. Geographic Information Systems - Vol. 1: Principles*. Harlow Longman.
- Wicke B., Smeets E., Dornburg V., Vashev B., Gaiser T., Turkenburg W., Faaij A. 2011. *The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils*. *Energy and Environmental Science* 4, 2669-2681.

Wilson J.P., Gallant J.C. 2000. *Digital terrain analysis*. In: Wilson JP, Gallant JC, editors. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.; 2000. pp. 1-28.

Yang X, Frey MK, Ghodes R.H., Norris S.J., Brooks I.M., Anderson S.P., Nishimura K., Jones A.E., Wolff. W.E. 2019. *Sea salt aerosol production via sublimating wind-blown saline snow particles over sea-ice: parameterizations and relevant micro-physical mechanisms*. Atmospheric Chemistry and Physics, 19: 8407-8424.

Yu-Peng W., Zhang Y., Ye-Meng B., Zhen-Jun S.. 2015. *Biodiversity in saline and non-saline soils along the Bohai Sea Coast, China*. Pedosphere, 25(2): 307-315.

Zaman M, Shahid SA, Heng L. 2018. *Guidelines for Soil Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. International Atomic Energy Agency-Springer, Vienna.

Zhang H., Schroder J.L., Pittman J.J., Wang J.J., Payton M.E. 2005. *Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extract*. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1146-1151.

Zurqani H., Mikhailova E., Post C., Schlautman M., Sharp J. 2018. *Predicting the classes and distribution of salt-affected soils in Northwest Libya*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 49(6): 689- 700, DOI: 10.1080/00103624.2018.1432637.

Glosario

Absorción: Captación de materia o energía por una sustancia
Suelo Acido: Suelo con un valor pH menor de 7.0.

Acidificación: Proceso a través del cual el suelo se vuelve ácido ($\text{pH} < 7$) por la presencia de material parental ácido o en regiones con alta pluviosidad, donde ocurre lixiviación de suelos. La acidificación puede ser acelerada por las actividades humanas (uso de fertilizantes, depósito de contaminantes industriales o vehiculares).

Adsorción: Proceso a través del cual los átomos, moléculas o iones son retenidos en las superficies de los sólidos por medio de una unión química o física.

Anión: Partícula con carga negativa. Su capacidad de intercambio de aniones es la suma de aniones intercambiables que un suelo puede adsorber. Usualmente se expresa como centimoles o milimoles de carga por kilogramo de suelo (o de cualquier material adsorbente como la arcilla).

Calcificación: Proceso mediante el cual se suministra suficiente cantidad de calcio al suelo para saturar los sitios de intercambio catiónico.

Capacidad de intercambio catiónico: La cantidad total de cationes intercambiables que pueden ser retenidos por el suelo. Se expresa en términos de miliequivalentes por 100 gramos de suelo en neutralidad ($\text{pH} 7.0$) o en otro valor de pH declarado. El término, aplicado a suelos, es sinónimo de capacidad de intercambio de bases, pero es más preciso en su significado.

Conductividad eléctrica (CE): Es la conducción de electricidad a través del agua o alguna solución de suelo usado comúnmente para estimar el contenido de sal soluble en una solución, por ej.: solución de suelo.

Descalcificación: Remoción del carbonato de calcio o de iones de calcio del suelo por medio de lixiviación.

Horizonte sódico: Una clase especial de horizonte argílico que contiene suficiente sodio intercambiable como para tener un efecto adverso en las condiciones físicas del subsuelo.

Neutral: un suelo con un valor de pH de 6.6 a 7.3 (Ver Reacción del suelo).

Ion: Átomo o grupo de átomos cargados eléctricamente.

Irrigación: Aplicación de agua a los suelos para ayudar a la producción de cultivos. Algunos métodos de irrigación son:

- **Cuenca:** Se aplica agua rápidamente a planicies casi niveladas rodeadas por hojas o diques.
- **Escurrimiento:** El agua se aplica en el extremo más alto de una franja en la cual el flujo lateral del agua es controlado por zanjas más pequeñas de tierra llamadas canales de o bordes.
- **Inundación controlada:** El agua se libera a intervalos desde zanjas del campo muy cercanas entre sí y se distribuye uniformemente en el campo.

- Corrugación: El agua se aplica a pequeñas surcos o zanjas muy cercanos entre si, en campos de cosechas cercanas o en huertos para que fluya en una sola dirección.
- Goteo (o gota a gota): El agua se aplica lentamente y a baja presión a la superficie del suelo o al interior del suelo por medio de aplicadores como emisores de riego, tubería porosa o tubo perforado.
- Surco: El agua se aplica en zanjas pequeñas hechas con utensilios de cultivo. Los surcos se utilizan para cultivos arbóreos y en hilera.
- Aspersión: El agua es rociada en la superficie del suelo a través de tubos o boquillas de pulverización por medio de un sistema de presión.
- Irrigación subterránea: El agua se aplica en zanjas abiertas o en redes de distribución hasta que el nivel freático se eleve lo suficiente para humedecer el suelo.
- Inundación libre: El agua se libera en puntos altos y se le permite fluir hacia un área sin distribución controlada.

Monitoreo de suelo: La constante observación y medición de propiedades y funciones selectas del suelo, principalmente para el estudio de cambios en las condiciones del suelo.

Morfología del suelo: Forma y disposición de las características edafológicas. El subsuelo técnicamente, el horizonte B; difícilmente, la parte de *solum* que está por debajo de la profundidad de labranza. La superficie del suelo, los horizontes A, E, AB y EB, se considera colectivamente. Incluye todas las subdivisiones de esos horizontes.

Perfil de suelo: Una sección vertical del suelo que se extiende a través de todos sus horizontes y en el material parental.

Razón de adsorción de sodio (RAS): Una medición de la cantidad de sodio (Na) en relación al calcio (Ca) y el magnesio (Mg) en el extracto de agua de la pasta saturada del suelo. Es la relación de la concentración de Na dividida entre la raíz cuadrada de la mitad de la concentración de Ca + Mg.

Reacción del suelo: Medida de acidez o alcalinidad de un suelo. Se expresa en valores pH. Un suelo que arroja como resultado un valor de pH 7.0 se describe como precisamente neutral en su reacción ya que no es ácido ni alcalino. Estos son los grados de alcalinidad o acidez expresados en valores pH:

- Ultra ácido: Menos de 3.5.
- Extremamente ácido: 3.5 a 4.4.
- Muy fuertemente ácido: 4.5 a 5.0.
- Fuertemente ácido: 5.1 a 5.5.
- Moderadamente ácido: 5.6 a 6.0.
- Ligeramente ácido: 6.1 a 6.5.
- Neutral: 6.6 a 7.3
- Ligeramente alcalino: 7.4 a 7.8.
- Moderadamente alcalino: 7.9 a 8.4.
- Fuertemente alcalino: 8.5 a 9.0.
- Muy Fuertemente alcalino: 9.1 o más.

Saturación de bases: El grado en el que el material, que tiene propiedades de intercambio catiónico es saturado con bases intercambiables (suma de Ca, Mg, Na, y K), expresado como porcentaje de la capacidad total de intercambio catiónico.

Sodicidad: El grado en que un suelo es afectado por sodio intercambiable. La sodicidad se expresa como una relación de adsorción de sodio (RAS) de un extracto de saturación, o la razón entre Na^+ y $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$. Los grados de sodicidad y sus respectivas razones son:

- Ligera: Menor que 13:1.
- Moderada: 13–30:1.
- Fuerte: Mayor que 30:1.

Suelo afectado por salinidad: Suelo que ha sido afectado adversamente por la presencia de sales solubles, con o sin la presencia de grandes cantidades de sodio intercambiable. También ver: Suelo salino, suelos sódico salino y suelo sódico.

Suelo Alcalino (sódico): Un suelo con un grado de alcalinidad tan alto (pH de 8.5 o más alto) o con un porcentaje de sodio intercambiable tan alto (15 por ciento o más del total de bases intercambiables), o ambos, que restringe el crecimiento de la vegetación.

Suelo calcáreo: Un suelo con suficiente carbonato de calcio (comúnmente combinado con carbonato de magnesio) que efervesce visiblemente cuando se trata con una solución fría de ácido clorhídrico.

Suelo salino: Un suelo no sódico (ver suelo sódico) que contiene suficiente sal soluble como para afectar adversamente el crecimiento de la mayoría de las plantas de cultivo. El límite inferior de conductividad eléctrica en el extracto de saturación de dichos suelos es establecido convencionalmente en 4 dS m⁻¹(a 25°C), aunque algunas plantas sensibles se ven afectadas con la mitad de esta salinidad y las altamente tolerantes se ven afectadas con el doble de la misma. Los suelos afectados por salinidad con un alto porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor al 15%, usualmente tienen un pH menor de 8.5; por lo general estos suelos no son apropiados para la agricultura. Es un suelo que contiene sales solubles en una cantidad que altera el crecimiento de las plantas. Un suelo salino no contiene exceso de sodio intercambiable.

Suelo sódico (alcalino): Un suelo con un grado tan alto de alcalinidad (pH de 8.5 o mayor) o con un porcentaje tan alto de sodio intercambiable (15 por ciento o más del total de bases intercambiables), o ambos, que restringe el crecimiento de plantas.

Suelo sódico: Suelo con exceso de sodio cuyo pH es mayor que 7, usualmente en el rango de 8-10, porcentaje de sodio intercambiable, $\text{PSI} > 15$ y una estructura de suelo muy pobre. Estos suelos necesitan un manejo especial y no son usados para la agricultura; los suelos no sódicos no contienen exceso de sodio.

Suelo: Un cuerpo natural tridimensional sobre la superficie de la tierra. Es capaz de sustentar plantas y tiene propiedades resultantes del efecto integrado del clima y la materia viva que actúan sobre el material precursor terrestre, condicionado por el relieve y el transcurso del tiempo.

Suelos hidromórficos: Se forman bajo condiciones de mal drenaje en ciénegas, pantanos, áreas de filtración o llanos.

Valor pH: Una designación numérica de acidez y alcalinidad en el suelo. (Ver Reacción, suelo).

Apéndices

Apéndice A: Ejemplo de descarga de imágenes del USGS

Esta sección describe el procedimiento para la descarga de imágenes de sensores remotos como Landsat OLI, Sentinel e imágenes y elevación (Modelo de Elevación Digital) MODIS del sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Es importante observar que los pasos descritos en el presente son diferentes para la descarga de datos de otros repositorios en línea y que la ilustración aquí proporcionada es meramente con fines demostrativos.

1. Paso 1: Cargue el sitio web pegando el link en el navegador web o presionando simultáneamente Ctrl (en el teclado) y haciendo clic en el enlace.
2. Paso 2: Navegue hacia el área de interés (ej. frontera nacional) manteniendo presionado el botón izquierdo del mouse y moviendo el handpan al área (país) de interés. Puede ser necesario alejar o acercar la imagen (usando los signos de navegación + ó – en la parte superior derecha de la pantalla) para localizar el área/país de interés. El sitio de descarga tiene cuatro botones en la parte superior izquierda: *Criterio de búsqueda*, *Conjuntos de datos*, *Criterios Adicionales* y *Resultados*. El botón *Criterio de Búsqueda* permite ingresar parámetros espaciales para la búsqueda de datos. Esto se logra por mediante la digitación manual de las esquinas del polígono, delimitando el área de estudio o cargando el archivo (shapefile o kml/kmz) (Figura A1).

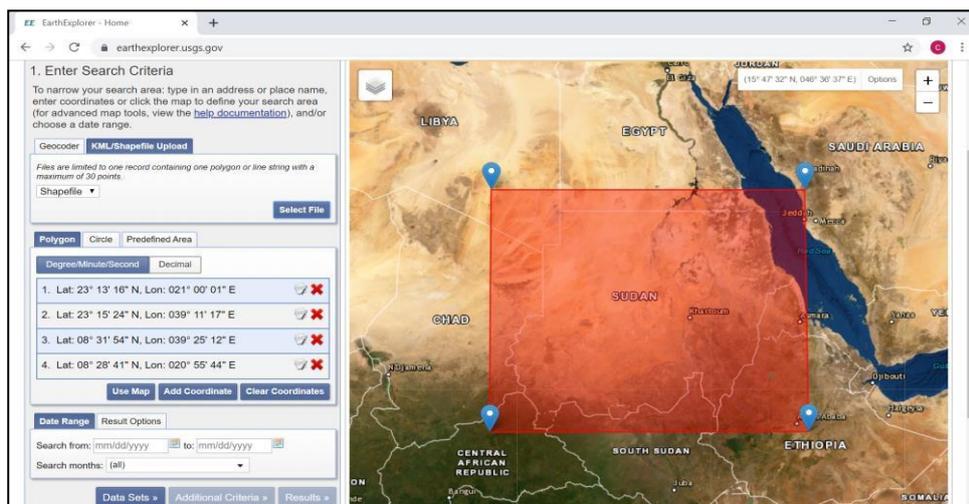


Figura A1: Interfaz Earth-Explorer para la descarga de datos.

3. Paso 3 (Selección de Dataset (Conjunto de datos): Activar el botón Conjunto de Datos para iniciar la ventana de visualización de Conjuntos de Datos disponibles. Esta ventana enlista las imágenes disponibles por categoría como son: Elevación Digital, Imágenes Aéreas, Sentinel, etc. (Figura A2). Cada categoría tiene el signo (+) expandible al principio de la lista, que muestra el conjunto de datos disponible en el grupo cuando se expande. Seleccionando las casillas blancas cuadradas a un lado de los datos, se eligen los datos de interés. Además, un clic en el símbolo abre una nueva ventana con los detalles de los metadatos del conjunto de datos seleccionado. Las áreas expandibles podrán usar datos de elevación (GMTED2010) e imágenes (MOD9A1 V6) mientras que Landsat OLI/Sentinel y SRTM DEM (30/90 m) pueden ser ideales para áreas más pequeñas y menos expandibles. Es importante seleccionar una categoría de datos a la vez para un fácil rastreo y descarga de datos.

4. Paso 4 (selección de Visualización de resultados): La selección del botón de resultados abre una nueva ventana en la visualización del mapa interactivo. Aquí, los datos son enlistados cronológicamente. Al seleccionar huella se mostrará este icono en la visualización del mapa interactivo. Posteriormente, aparecerá una ventana para confirmar la selección y dará inicio la descarga de datos. En este punto es importante asegurar una conectividad de internet adecuada. GMTED2010 contiene datos de elevación en tres opciones: 1km (30 arcosegundos), 500 m (15 arcosegundos) y 250 m (7.5 arcosegundos). Se deberá seleccionar la opción adecuada para la descarga (Figura A.2).

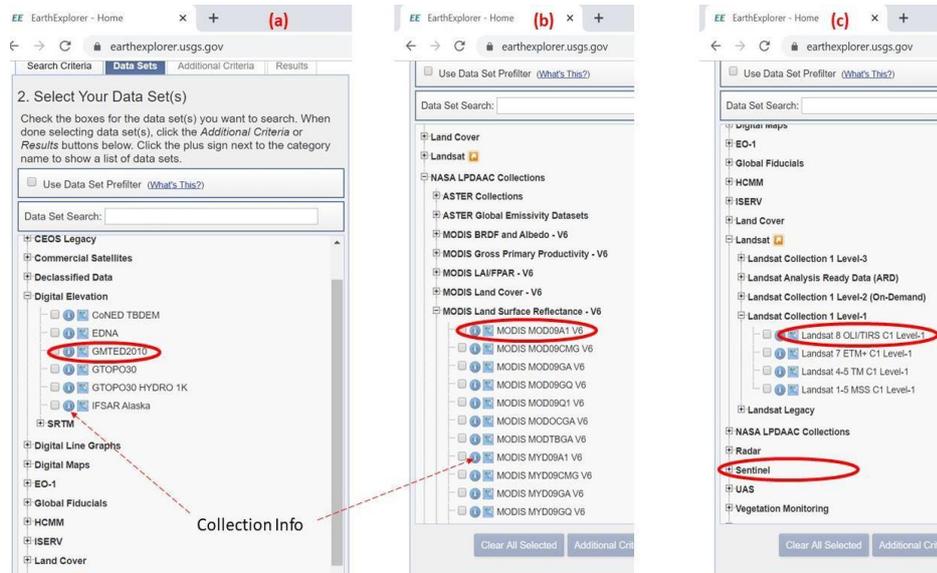


Figura A2: Selección del grupo de datos: a-altitud, b- MODIS, c-Landsat y Sentinel

(1) Descarga de cobertura terrestre y datos climáticos.

El repertorio en línea para cobertura terrestre está disponible en (USGS)

<https://earthexplorer.usgs.gov/>, GLC200 en (JRC)

<https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>), base de datos GLCS en (FAO)

<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home?uuiid=ba4526fd-cdbf-4028-a1bd-5a559c4bff38>,

Los mapas mundiales LC en (ESA) <https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/158>.

Estos conjuntos de datos están disponibles para descarga directa para todo el mundo. Podrán ser necesarios subconjuntos de datos. Los datos de cobertura terrestre en USGS se pueden descargar usando los pasos señalados en las figuras A1 y A2.

Los datos climatológicos se pueden descargar en: <http://www.worldclim.org/> en archivos GeoTiff a una resolución espacial de 1km para todo el mundo.

Apéndice B: Preguntas frecuentes al implementar R

A. Errores con tipos de archivos.

1. Replacement has 0: Tengo el siguiente error al ejecutar la línea ...

```
Error in `[<-data.frame`(`*tmp*`, name, value = numeric(0))
:
  replacement has 0 rows, data has 536766
```

Este error puede ocurrir cuando se utilizan múltiples capas/variables para producir una salida. Ocurre cuando falta una de las capas/variables de entrada. Confirmar que estén disponibles todas las capas/variables de entrada para esa línea revisando el ambiente global o ejecutando `resumen` como por ejemplo `resumen(predictores)` o `resumen(soil1)`. Repetir las líneas anteriores para asegurar que todas las variables/capas previas fueron creadas.

2. Object not found: Tengo un error en la línea 161 que dice:

```
Error in is.data.frame(x): object 'predictors' not found
```

Este tipo de error ocurre cuando un archivo o dato no fue creado. Ya sea que la línea para su creación fue omitida o la línea tuvo un error y no pudo crear exitosamente el archivo. Es mejor rastrear la línea donde el/la archivo/capa o dato fue originalmente creado(a) e implementar la línea de nuevo.

3. Warning message: Hay un mensaje de error en la línea 128.

Warning message:

```
In sqrt((nir * red - blue * green)/(nir * green + blue * green)): NaNs produced
```

Este no es un error, es un mensaje de advertencia. Revisar la salida puede confirmar si hay alguna particularidad en el/la capa/dato.

4. Null summary: El resultado de resumen (summary) es NULL cuando ejecuto la línea ...`summary(predictors$CETse)`

```
Length Class Mode
0 NULL NULL
```

Esto ocurre cuando la capa/variable no se creó o el nombre de la capa no se deletreó correctamente. Revisar si la capa está disponible en el ambiente global o si una corrección ortográfica puede resolver el error.

5. Undefined columns selected: Error en la línea 292: undefined columns selected

```
Error in `[.data.frame` (predictors@data, , c("SI1", "SI2", "SI3", "SI 4",
:
undefined columns selected
```

Este tipo de error surge si uno o más de los nombres especificados para las variables/capas está faltando en el marco de datos o en el objeto R. Ejecutar la función `str` con el marco de datos o el objeto R (`str(object)`) proporcionará una lista de las variables contenidas en el marco de datos/objeto. Confirmar si las variables/capas faltantes están enlistadas con la escritura correcta de sus nombres.

6. NA detected: Error en la línea 296 NA en los datos

```
Error in regmodelSuit(soil, TSS, lon, lat, CE) :
Remove NA in columns: clay, ph, TSS, TTS, CETSS, PSI, CETTS, X
```

Esta función no acepta NA en los datos y debe ser removido antes de su ejecución.

7. Transformación Box-Cox: Error en la línea 273 mientras se ejecuta la transformación de Box-Cox.

```
Error in bc1(out[, j], lambda[j]) :  
First argument must be strictly positive.
```

Este tipo de error ocurre cuando la variable objetivo tiene entradas cero o negativas. Estas entradas deben ser eliminadas antes de implementar la transformación. Si hay ceros, un valor muy pequeño (como 0.0001) puede ser agregado a la variable objetivo para eliminar las discontinuidades alrededor de cero y un regreso del mensaje de error.

8. Histograma: Hay un mensaje de error cuando ejecuto la función histograma.

```
Error in hist.default(soil1$TSS.1, main = "Frequency distribution (before transformation)",  
'x' must be numeric
```

9. Visualización gráfica: Error in plot

```
Error in plot.new() : figure margins too large  
In addition: Warning messages:
```

Este error ocurre cuando la ventana de plot es muy pequeña. Agrandar la ventana manualmente por medio de alargar sus límites hacia arriba y hacia la izquierda elimina el error.

10. Muchos símbolos de suma en la consola: Hay muchos signos (+) de suma en la consola.

Este fenómeno ocurre cuando una de las líneas es ejecutada sin cerrar paréntesis o sin cerrar comillas. Digitar uno (o más) signo(s) de cerrar paréntesis (o cerrar comillas) en la consola detendrá el error (con un mensaje de advertencia, claro).

11. Orientación del cursor: El cursor es horizontal en vez de vertical.

Esto sucede cuando el botón "Insert" fue apretado por accidente. Si se presiona el botón "insert" de nuevo se restaurará la orientación del cursor.

12. Armonización de profundidad: Error en la función.

```
[1] "pedons (616) rows of site data (619)"  
Error: invalid site data, non-unique values present in horizon data?
```

Este tipo de error ocurre cuando la librería (aqp) no ha sido actualizada o cuando hay discrepancias en el perfil reportado. La discrepancia frecuentemente ocurre cuando hay diferencias en (1) las entradas más bajas y más altas de profundidad/horizontes de la muestra. Es importante asegurar que para todos los perfiles, la entrada más alta de profundidad para cada fila (profundidad/horizonte muestreado(a)) debe igualar la entrada más baja de la fila predecesora (profundidad/horizonte muestreado(a)) (ver Figura 4.5), (2) el número de pozo o entrada de latitud/longitud para el mismo pozo discrepa para cualquier muestra dada de profundidad/horizonte (Figura 4.5), (3) se seleccionaron las columnas incorrectas en el momento de desarrollar la base de datos del perfil. La corrección de esas anomalías resolverá el error.

13. Armonización de profundidad: Error mientras se ejecuta *prof1* line

Error in data.frame(id, lon, lat) :
arguments imply differing number of rows: 407, 0

Este error surge cuando uno de los parámetros para armonización de profundidad no fue especificados adecuadamente. Revisar el ambiente global en cada uno de los parámetros (lon, lat, id, horizonte, etc.) que se han creado no sean nulos (NULL) y que sean del tipo de archivo numérico (con excepción de horizonte e id que pueden ser factor).

14. Unexpected symbol: Error de símbolo no esperado.

Error: unexpected symbol in "loncurv=readGDAL("loncurve.mpr")band"

Esto ocurre cuando hay un carácter faltante o mal colocado en la línea del script. Se debe resolver el carácter adecuadamente.

15. Tipo de variable: No es significativo para factores.

En algunas ocasiones algunas operaciones no están permitidas para los datos del tipo factor y devuelven errores para factor o del tipo de variables enteras. Esto sucede cuando (durante la organización de datos en la hoja de cálculo) las entradas se convierten a entero/factor sin integración decimal (o NA en los datos). Es importante hacer verificación cruzada de la integración decimal en el programa de hoja de cálculo antes de importar los datos a R.

B. Errores con librerías

1. Funciones Faltantes: Tengo un error que indica "cannot find function..."

Este tipo de error ocurre cuando las librerías no están cargadas o no están instaladas. Escriba un signo de interrogación seguido de la función faltante en la consola R y presione "enter". Una ventana aparecerá mostrando la definición de la función. El nombre de la librería que contiene esa función se mostrara en la parte superior izquierda de la ventana. Si la librería ya está instalada, vuélvala a cargar escribiendo `library(librería faltante)` en la consola. Si la librería no está instalada, instálela y cárguela después de la instalación. Algunas funciones estarán enmascaradas por otras librerías. Pueden ser accedidas añadiendo las librerías asociadas antes de las mismas usando doble colon (ej. `dplyr::count(predictors$saltaffected)`). NB: Es importante ejecutar todas las librerías como primer paso, cada vez que se reinicia RStudio.

2. Cannot install package (No se puede instalar el paquete): No funcionan los paquetes de instalación.

Esto sucede cuando 1) no hay conexión a internet, 2) Los folders tienen protección de escritura (my documents or C/Programs/R), 3) el mirror de CRAN no responde, 4) el paquete no se encuentra disponible para su instalación. Revise la conexión a internet e intente instalar nuevamente. Revise los permisos de administrador e intente la instalación otra vez.

Cambie el mirror de CRAN escribiendo `chooseCRANmirror()` en la consola. Se mostrará una lista con la opción de selección al final de la lista. Revise los números en la lista y seleccione el número

correspondiente al mirror en funcionamiento más cercano. Introdúzcalo y presione “enter”. Después trate de instalar el paquete nuevamente. Algunos paquetes que no están publicados en R CRAN pueden estar disponibles en GitHub. Pueden ser instalados siguiendo las instrucciones proporcionadas en los enlaces de GitHub.

C. Errores con directorios de trabajo.

1. El archivo no se encuentra en el directorio: Cannot find file (No se localiza el archivo)

```
Error in file(file, "rt") : cannot open the connection In addition: Warning message:
In file(file, "rt") :
cannot open file 'soildataU2.csv': No such file or directory
```

Este error ocurre cuando 1) el directorio de trabajo no está especificado correctamente, 2) el nombre del archivo no está escrito correctamente, 3) el script de importación contiene errores de sintaxis. Verifique la ruta correcta para el directorio de trabajo, revise espacios o el nombre de la ruta para el directorio, revise que el nombre del archivo este escrito correctamente. Verifique que ortografía y los parámetros estén correctos en el script para los nombres del parámetro (ej. `soil=read.csv("soildata.csv", heade=T)`.. a *header* en el parámetro le falta la *r* al final y devolverá un error de importación).

E. Errores con la capacidad de cómputo.

1. Tengo un mensaje de error que dice “cannot allocate vector of size...”
(No se puede asignar el vector de tamaño)

Este error ocurre cuando la memoria de la computadora es poca. Algunas veces se puede mejorar el funcionamiento ajustando la memoria (tal como `memory.limit (size=NA)` o incrementando el tamaño sustituyendo el NA con un valor mayor, que corresponda a o se acerque al tamaño de la memoria RAM de la computadora). La mejor opción es usar una mejor computadora con más memoria.

2. Mi computadora se está tardando mucho o está congelada.

Esto sucede cuando el software está ejecutando simulaciones con un umbral muy alto o con grandes conjuntos de datos. Es recomendado ser paciente y esperar que el proceso avance a su finalización.

3. La computadora falla y se reinicia.

Esto sucede cuando la computadora tiene poca memoria RAM o cuando ciertas funciones están regresando cálculos infinitos.

Apéndice C: Revisión de la organización correcta de datos en Excel

1. Inserción de números secuenciales para el muestreo de horizonte/profundidad.

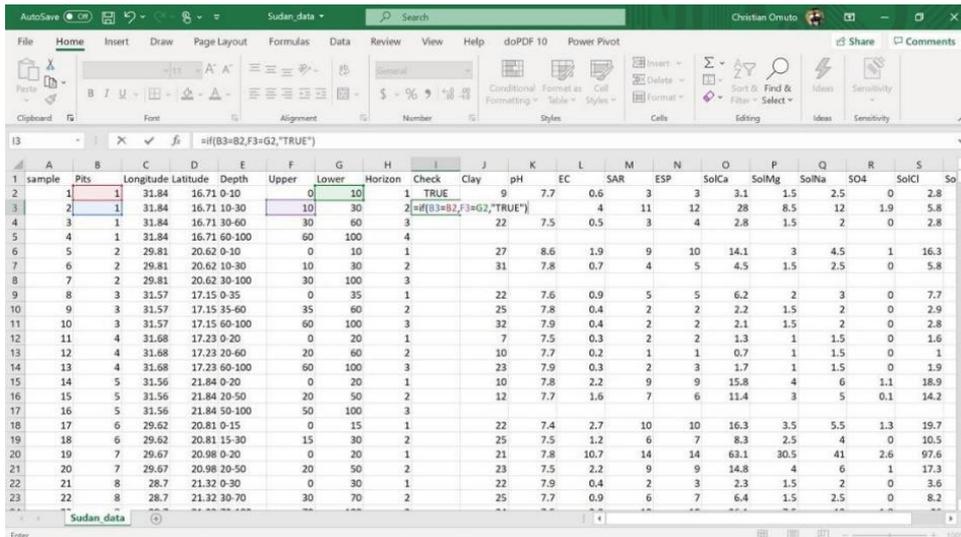
Los códigos de horizonte/profundidad son números secuenciales de 1 en el muestreo de horizonte/profundidad superior e incrementándose consecutivamente (ej. Incrementándose por 1) al ultimo muestreo de horizonte/profundidad. (Figura 4.5).

- Paso 1: Clasificar las columnas de *Pozo*, *Longitud*, *Latitud*, y *Pozo (Pit, Longitude, Latitude, y Pit)* en ese orden. Esto ordenara la columna de profundidad adecuadamente.
- Paso 2: Crear tres columnas nuevas después de la columna de (Depth) Profundidad (Por los tres elementos en los artículos de profundidad – primera profundidad, menos (-)/ guion bajo (_) para rango, y ultima profundidad, 0-15). La creación de nuevas columnas se logra seleccionando la columna contigua a la columna de Profundidad, hacer click derecho con el mouse y seleccionar “insert”.
- Paso 3: Copiar y pegar la columna de Profundidad (Depth) en la columna contigua recién creada.
- Paso 4: Seleccionar la columna recién pegada en el paso 3. Ir al panel de Datos (Data panel) en la fila superior de botones, hacer click, seleccionar la opción de “text-to-columns”. Una nueva ventana aparecerá con la opción “Delimited” seleccionada. Hacer click en next, seleccionar “other” y escribir el símbolo para el rango como se usa en los datos (ya sea – o _). Hacer click en next hasta completar el proceso (finalizar).
- Paso 5: Renombrar las columnas como Upper y Lower en la primera parte y segunda parte respectivamente.
- Paso 6: Nombrar la siguiente columna como “Horizon” e ingresar 1 en la primera celda (justo abajo del nombre de la columna). A continuación, calcular series consecutivas para todas las entradas en el mismo Pozo (Pit). Ingresar la formula

=if(B3=B2, H2+1,1) en la segunda celda de la columna “Horizon”. Copiar los resultados en las celdas de toda la columna. Esta fórmula significa que el código Pit de la fila anterior es el mismo que el de la fila actual, a continuación, agregar 1 al valor de “Horizon” en la fila anterior, de lo contrario regrese 1. 1 es agregado para que cada Horizonte (Horizon) inicie a partir de 1,

2. Verificación de entradas correctas/consistentes en las entradas menor y mayor profundidad (lower y upper Depth).

- Paso 1: Insertar una nueva columna después de Horizonte (Horizon) y nombrarla “Check”. Esta columna comprobara (y regresara el resultado TRUE) si el valor mayor (Upper) en la fila actual es el mismo que el valor Menor (Lower) en la fila anterior.
- Paso 2: Escribir TRUE en la primera celda justo debajo de “Check”. Ingresar la fórmula =if(B3=B2, F3=G2, “TRUE”) en la segunda celda. Copiar la fórmula en todas las celdas.

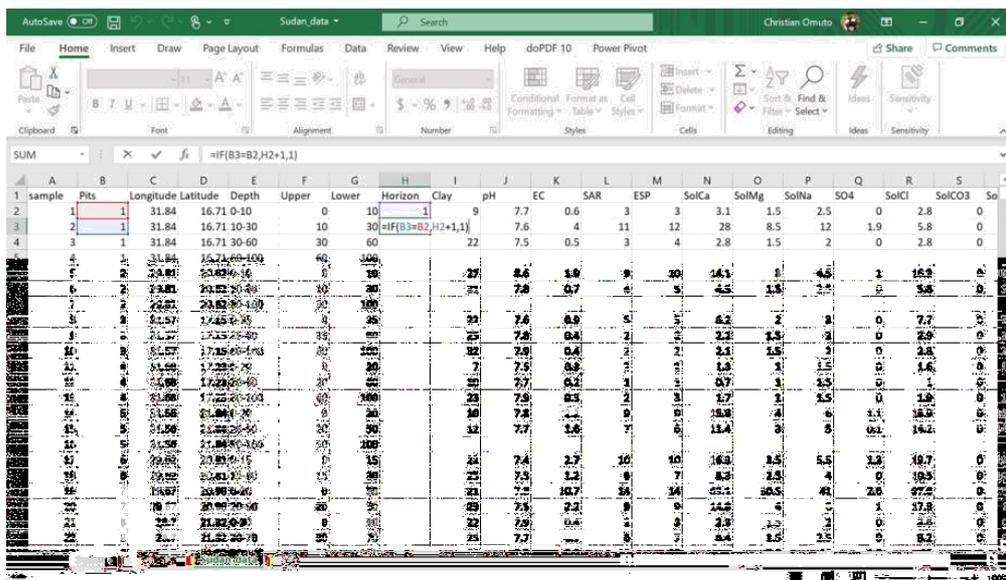


- Paso 3: Filtrar la recién creada columna “Horizon”, seleccionar y sombrear las entradas con FALSE, investigar y corregirlas adecuadamente.

3. Remover errores en el formato.

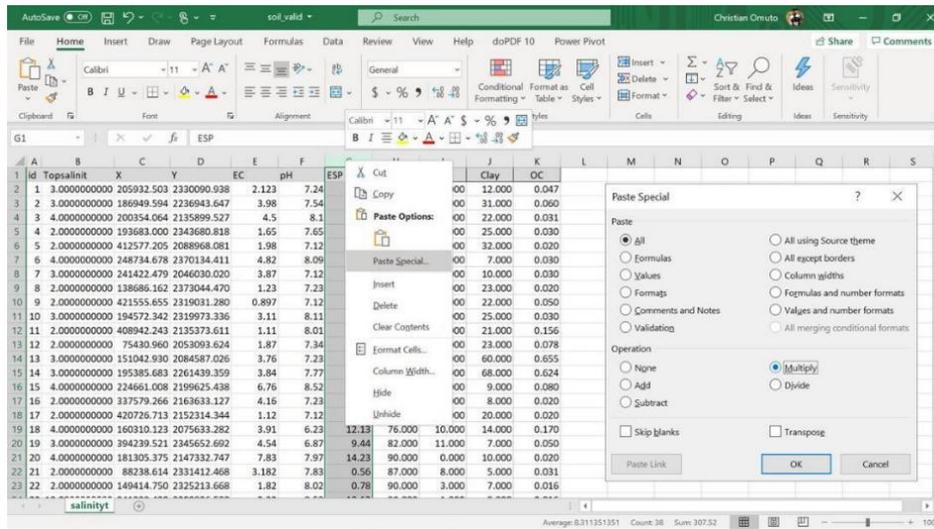
Algunas veces algunas columnas pueden mostrar errores de formato con una etiqueta verde en la parte superior izquierda de las celdas. Esto puede ser debido a la autocorrección de la fórmula, a dudosas diferencias en la secuencia numérica o a errores de formato comunes. Se pueden remover convirtiendo las celdas (o las columnas) en números.

- Paso 1: Escribir 1 en una celda vacía en una nueva hoja de cálculo. Luego copiar la celda y regresar a la hoja de cálculo original.



- Paso 2: Seleccionar la columna a formatear comenzando por las entradas numéricas que mostraron formateo.

- Paso 3: Hacer “click” derecho y seleccionar “Pegado especial” (Paste especial), luego seleccionar “Multiplicar” y hacer “click” en “Ok”. El error desaparecerá.





La Alianza Mundial por el Suelo (AMS) se estableció en 2012 como un mecanismo reconocido mundialmente para posicionar los suelos en la Agenda Global a través de la acción colectiva. Nuestros objetivos clave son promover la Gestión Sostenible del Suelo (GSS) y mejorar la gobernanza del suelo para garantizar suelos saludables y productivos y apoyar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la seguridad alimentaria y la mejora en la nutrición, la adaptación y mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible.

Gracias al apoyo financiero de



Ministerio de Finanzas de la
Federación de Rusia



Comisión
Europea



Rural Development
Administration

ISBN 978-92-5-133840-7



9 789251 338407

CA9215ES/1/03.21