



Gobierno del Estado Plurinacional de

BOLIVIA

Ministerio de
Desarrollo Rural y Tierras

Resumen
Dosier Técnico



Mapas de:
**Carbono Orgánico v.2020
y Salinidad de los Suelos
de Bolivia**

www.vicetierras.gob.bo

DIRECCIÓN Calle Batallón Colorados-Edificio El Cóndor N° 24, Piso 12

Especificaciones Técnicas

Resumen de los requisitos mínimos de datos para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Tipo de datos	Variables	Unidades	Principal fuente de datos	Otras fuentes	
				Nombre	Formato
Datos del suelo georreferenciados (entre 0 y 100 cm)	CE	dS/m	Datos nacionales	WOSIS ¹	Datos de puntos vectoriales
	pH	-			
	PSI	%			
	<i>Iones solubles</i> *	cmol/kg			
	<i>TSS</i> *	g/l			
Clima (Media anual)	Lluvias	mm	Datos nacionales	Worldclim ²	Datos de puntos vectoriales
	Temperatura Min	°C			
	Temperatura Max	°C			
Uso / cobertura de la tierra	tipos de cobertura/ usos	-	Datos nacionales	ESA ³	Imagen de la trama (300 m)
Mapa del suelo	tipos de suelos	-		WOSIS	Vector poligonal
Modelo de elevación digital (DEM)	Elevación	m	Mapa de contorno nacional	USGS ⁴	Imagen de la trama (15, 30, 90 m, etc.)
Sensores remotos de reflectancia de la superficie de la tierra	Reflectancia (RGB) visible	-	Datos nacionales	USGS	Imágenes MODIS (500 m) Landsat OLI (30 m) Sentinel2A (10-20 m) ASTER
	Reflectancia IR	-			
	Reflectancia SWIR	-			
Geología	Tipos de litología	-	Datos nacionales		
Hidrogeología*	Nivel de agua subterránea	m	Datos nacionales		

* Datos opcionales.

Imágenes de sensores remotos para el mapeo de suelos afectados por salinidad

Imágen	Bandas espectrales	
Landsat (OLI)	Banda 2	Azul: 0. 452-0. 512 μm
	Banda 3	Verde: 0. 533-0. 59 μm
	Banda 4	Rojo: 0. 636-0. 673 μm
	Banda 5	NIR: 0. 851-0. 879 μm
	Banda 6	SWIR1: 1. 566-1. 651 μm
	Banda 7	SWIR2: 2. 107-2. 294 μm
	Sentinel 2A	Banda 2
Banda 3		Verde: 0. 543-0. 578 μm
Banda 4		Rojo: 0. 650-0. 680 μm
Banda 8		NIR: 0. 785-0. 899 μm
Banda 11		SWIR1: 1. 565-1. 655 μm
Banda 12		SWIR2: 2. 10-2. 28 μm
MODIS MOD09GA V6	Banda 3	Azul: 0. 459-0. 479 μm
	Banda 4	Verde: 0. 545-0. 565 μm
	Banda 1	Rojo: 0. 62-0. 67 μm
	Banda 2	NIR: 0. 841-0. 876 μm
	Banda 6	SWIR1: 1. 628-1. 652 μm
	Banda 7	SWIR2: 2. 105-2. 13 μm

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

² WorldClim: <https://www.worldclim.org/>

³ ESA: <https://www.esa-landcover-cci.org/>

⁴ USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Especificaciones técnicas

Resolución espacial	1 km²
Profundidades	0 – 30 cm
	30 – 100 cm

Recopilación de Datos

Recopilación y Sistematización de datos de Suelos

Información de suelos (Mapas de suelo)

Datos de suelo cuantitativos

- ✚ Datos de resultados de laboratorio
- ✚ Datos georeferenciados
- ✚ Datos armonizados

Recopilación y Sistematización de Covariables Ambientales (Predictores)

Los predictores son los relacionadas con los factores formadores de suelo, es decir, corresponden a las variables que ayudan a predecir el valor del parámetro edáfico analizado.

Existen muchas fuentes de datos, dependiendo de la escala de trabajo y el tipo de dato. Para este efecto, los datos preparados corresponden a las siguientes:

- ✚ Soilgrids
- ✚ Datos preparados por GSP
- ✚ Datos nacionales

Armonización de Datos

Organización de la base de datos de Suelos

Organización de los datos de la hoja de cálculo

Los datos de la hoja de cálculo se organizaron de tal manera que permitan el escaneo secuencial durante el análisis de datos, especialmente en el análisis de pedotransferencia.

Variables edafológicas necesarias

La base de datos de los datos de suelo recolectados deberá contener por lo menos:

1. ID del Perfil
2. Latitud y Longitud
3. Rango de Profundidad (inicio y final de cada Horizonte)
4. CE
5. PSI
6. pH (agua)

Organización de los datos SIG

Armonizar el sistema de referencia de coordenadas

La armonización del Sistema de Referencia de Coordenadas (en adelante SCR) se realiza mediante la Reproyección, que es la terminología usada frecuentemente en un SIG, para transformar un SCR en otro.

Armonización del formato de capas

No todas las capas SIG se encuentran disponibles en un formato de archivo uniforme.

Corrección de imágenes. Las imágenes de sensores remotos descargables en forma gratuita tienen características variadas que requieren de armonización antes de su aplicación en la modelación de suelos afectados por salinidad.

El Plugin de Clasificación Semi-automática (PCS) en QGIS, ofrece una manera rápida de corrección geométrica y radiométrica simultánea de las imágenes de sensores remotos.

Modelamiento digital del terreno (SAGA)

El modelamiento del terreno se centra en la determinación de los parámetros de relieve que influyen sobre la formación del suelo o el traslado de las sales del suelo durante la lixiviación, el escurrimiento o la erosión eólica. Los parámetros de relieve son atributos primarios o secundarios.

Base de datos del SIG Final (ILWIS)

Todos los datos espaciales en la base de datos del SIG deben tener un sistema de referencia de coordenadas (SCR) uniforme, es decir un SCR armonizado. Además, todas las capas de datos raster deben tener una resolución de píxeles uniforme. Una lista de mapas en ILWIS es una forma de garantizar que todas las capas de datos raster armonizadas.

Resultados

- ✚ Una base de datos organizada de indicadores de suelos afectados por salinidad (CE, pH, PSI)
- ✚ Una base de datos organizada de las capas SIG (cobertura terrestre, clima, geología, imágenes, MED, mapa del suelo, etc.)
- ✚ Instalación de programas de computación para el mapeo de suelos afectados por salinidad.

Proceso de modelado

Paquetes (Librerías) en R

Instalación de paquetes y carga de librerías

```
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); library(soiltexture); library(GSIF);  
library(aqp); library(plyr); library(Hmisc); library(corrplot); library(factoextra);  
library(spup); library(purrr); library(lattice); library(ncf); library(npsurv); library(isei);  
library(nnet); library(class); library(mda); library(RColorBrewer); library(vcd);  
library(grid); library(neuralnet); library(readxl); library(psych); library(qrnn);  
library(dplyr)
```

Preparación de datos (Predictores)

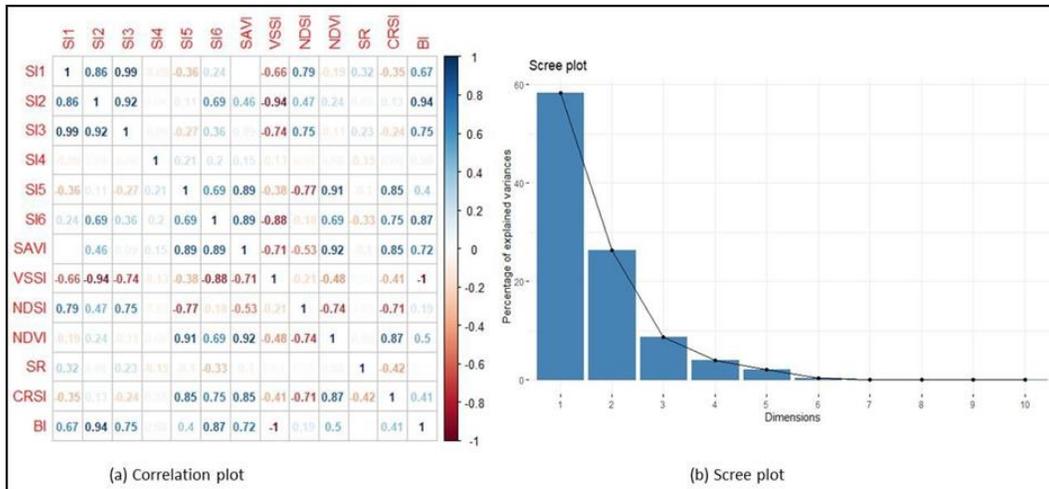
Datos Satelitales

Estos sets de datos deben estar preparados y entre los procesos más importantes a realizarse son:

- ✚ Verificación y armonización de la distribución estadística de las capas SIG.
- ✚ Normalizar los datos
 - Verificación y eliminación de NAs

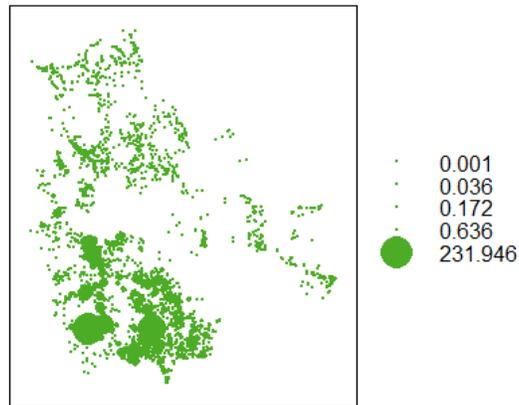
Derivación de índices de salinidad a partir de datos satelitales

- ✚ Se verifica la asimetría utilizando la distribución del histograma empírico
- ✚ Correlación entre los predictores para realizar el análisis de PCs
- ✚ Evaluar la importancia de los predictores para conocer el número de PCs para incluir en la lista de predictores
- ✚ Se seleccionan los primeros PCs [componentes principales] que representen más del 95% de la variación de los índices de imágenes.

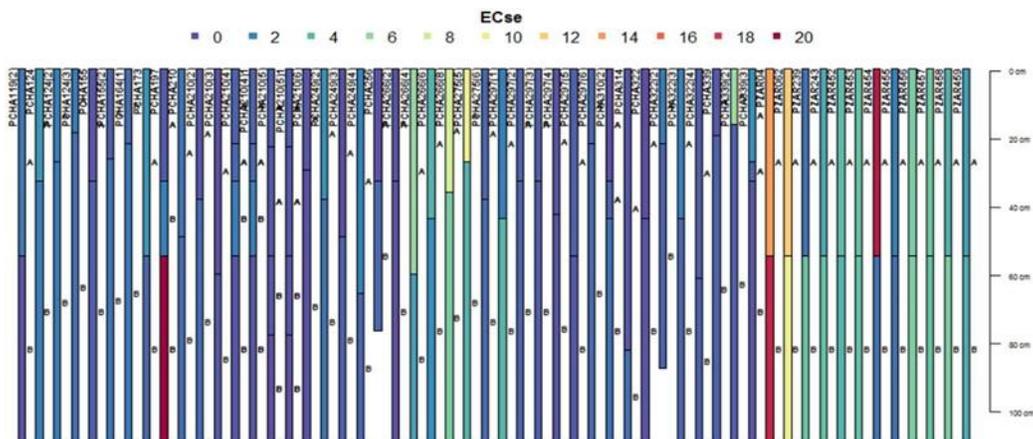


Armonización de los datos del suelo

Harmonized Electrical Conductivity (30-100 cm)



Armonización de profundidades



Armonización de distribución estadística

- ✚ Eliminar NA
- ✚ Transformar con Box-Cox

4.4 Modelado espacial de indicadores

- ✚ Información espacial de los indicadores de suelos afectados por salinidad (CE, pH, PSI) y distintas profundidades del suelo.
- ✚ Incertidumbres y precisión de mapeo.
- ✚ Información espacial de clases e intensidad de problemas de salinidad.

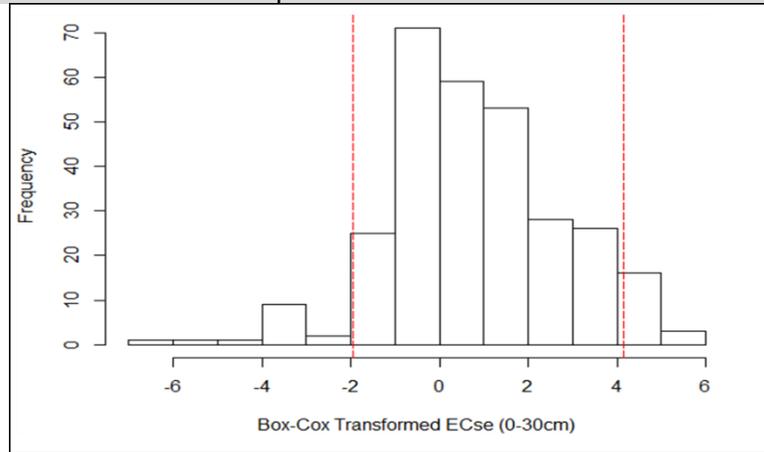
regmodelSuit: Sirve para orientar la elección del modelo adecuado para cartografiar las variables del suelo; prueba diferentes modelos y regresa a los nueve modelos principales utilizando RMSE (error cuadrático medio), ME (error medio), NSE (coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliff) y r^2 . El RMSE más bajo, ME más bajo, NSE más alto y r^2 más alto

MODEL	ME	RMSE	R2	NSE
Linear	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
QuantNeuralINT	1.16162791	1.7075411	0.2582558	0.07778314

- ✚ La construcción de modelos estadísticos y las estrategias de prueba, recomiendan conjuntos de datos independientes para la construcción del modelo y la prueba del modelo. Lo ideal es que estos conjuntos de datos sean muestreados con enfoque para la construcción y prueba del modelo.
- ✚ En ausencia del conjunto de datos muestreados independientemente para cualquiera de los dos modelos, el de construcción (calibración) o el de prueba (validación), se utiliza con frecuencia la estrategia de división de datos.
- ✚ La estrategia de división de datos, divide aleatoriamente (o aleatoriamente estratificada) los datos en dos partes.
- ✚ Una parte es tomada como calibración, la otra como validación.
- ✚ El conjunto de datos de validación se utiliza para evaluar la precisión.
- ✚ Los índices para reportar la precisión del modelo incluyen RMSE, ME, r^2 , NSE y la representación gráfica de los valores modelados contra los armonizados.
- ✚ La división de datos puede elegirse arbitrariamente de acuerdo con, o dependiendo del tamaño de los datos. Sin embargo, una vez seleccionado el modelo apropiado, el mapa final debe ser generado con todos los datos. En este caso, debemos usar el modelo con mayor capacidad predictiva con todos los datos y generar una predicción para el mapa final.

Construcción y prueba del modelo

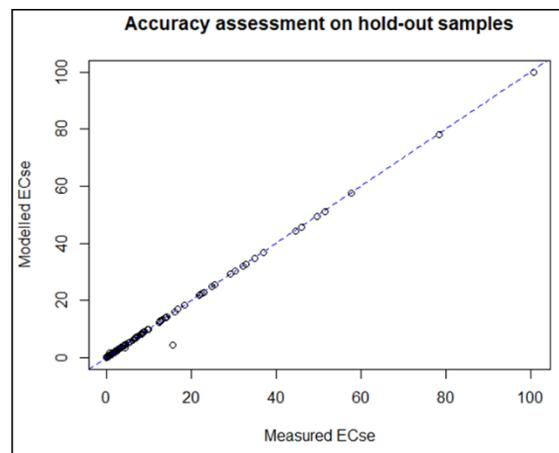
➤ Muestre el intervalo de predicción



Representación gráfica de la distribución de frecuencia con límites de predicción a un intervalo de confianza del 95%

Los límites de predicción de los valores transformados via Box-Cox al 95% de confianza muestra el intervalo alrededor de la media de 0.77 como [-2, 4.1].

Evaluación de la precisión



Representación gráfica de CE predecidos Vs. los CE medidos

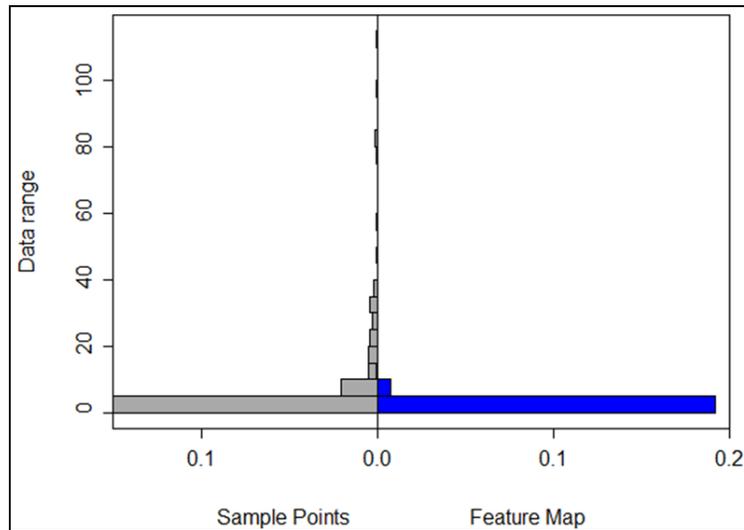
	Bias	RMSE	Rsquared	NSE
1	-0.1019564	1.751158	0.9950319	0.982046

Se usa el modelo desarrollado para predecir el mapa

Se compara la predicción espacial y validación del conjunto de datos

Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Máx.
0.00007	0.48810	1.17487	1.51685	1.61781	112.74435

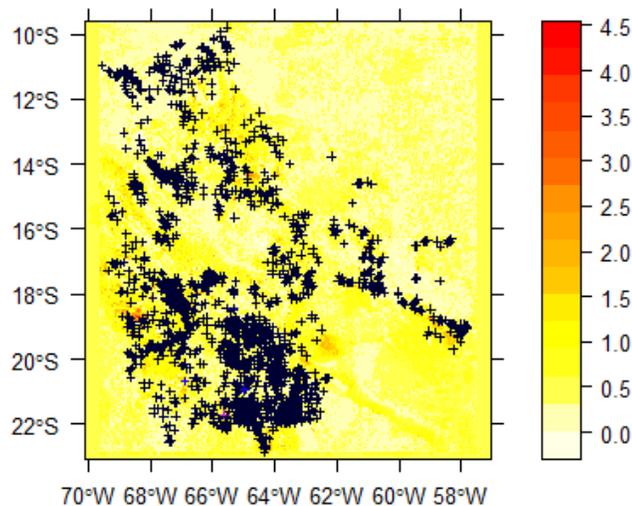
Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Máx.
0.00048	0.59755	1.71126	6.60388	5.05220	113.50941



Representatividad de los rangos de la validación de CE (puntos de muestreo) en el mapa de predicción (mapa de características) Y es la distribución de frecuencias

La representación de características muestra qué tan bien está contenido el rango de mediciones CE (con respecto a CE de validación) en el mapa de predicción. En el muestreo del caso de estudio, los valores de CE altos (>40 dS/m) están contenidas deficientemente en el mapa de predicción. El eje de las x muestra la frecuencia (densidad de probabilidad) de ocurrencia de los valores de datos (CE) en el eje de las y. La representación deficiente de altos valores de CE (CE > 40) implica la incertidumbre del modelo para valores altos de CE. Esto se investigará con mayor detalle cuando se produzcan las incertidumbres.

Evaluación de la incertidumbre



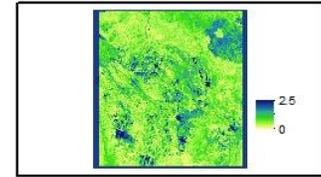
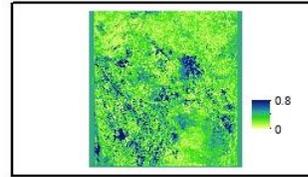
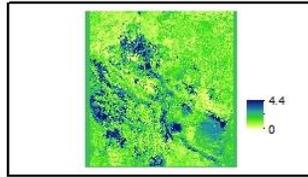
Ancho de la predicción espacial al 95% del intervalo de confianza y sobreposición de los puntos de Validación

Resultados

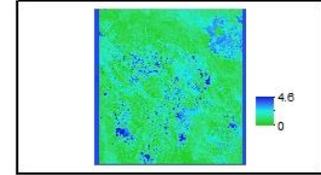
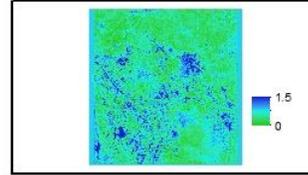
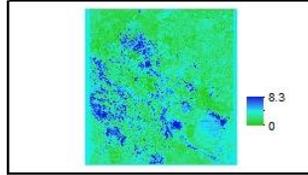
Al finalizar la lección, se espera que cada participante utilice los conocimientos aprendidos, para que produzca los siguientes mapas de indicadores de suelos afectados por salinidad:

- ✚ Mapas raster GeoTiff de indicadores de suelos afectados por salinidad (CE, pH, y PSI), para 0-30 cm y 30-100 cm (6 mapas raster en total).
- ✚ Mapas raster GeoTiff de evaluación de la incertidumbre para cada propiedad del suelo (CE, pH, y PSI), para 0- 30 cm y 30-100 cm (6 mapas raster en total).
- ✚ Archivo de texto de la evaluación de la precisión para cada propiedad del suelo (CE, pH, y PSI) para 0-30 cm y 30- 100 cm (6 mapas raster en total).

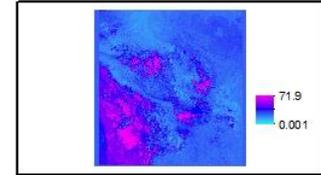
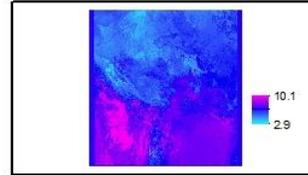
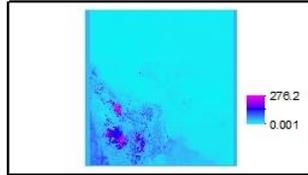
Desviación
Estándar
0-30 cm



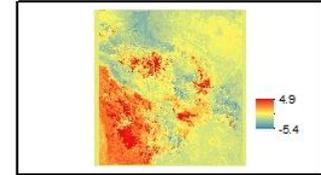
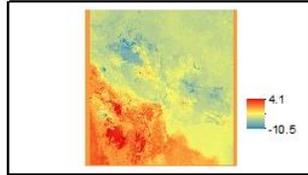
Incertidumbre
0-30 cm



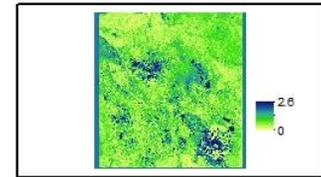
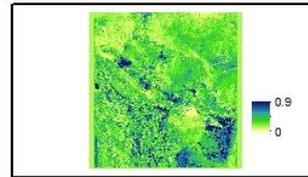
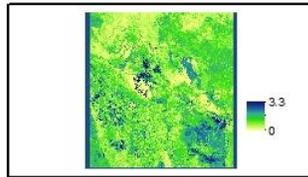
Validación
0-30 cm



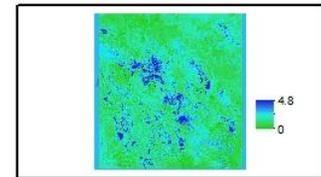
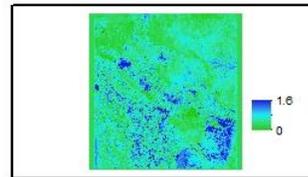
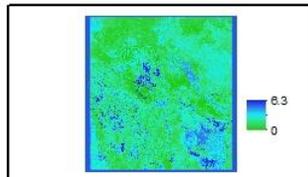
Mapa indicador
0-30 cm



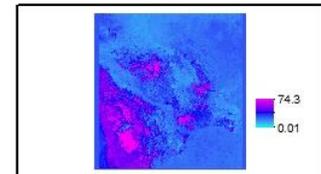
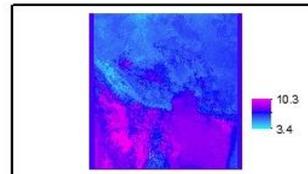
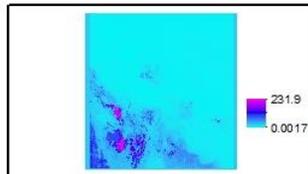
Desviación
Estándar
30-100 cm



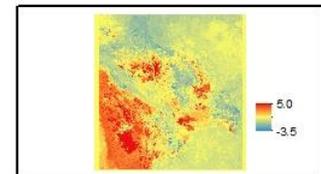
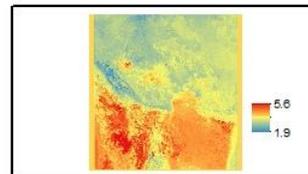
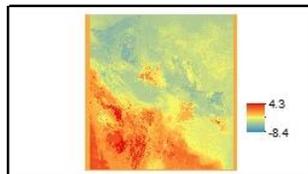
Incertidumbre
30-100 cm



Validación
30-100 cm



Mapa indicador
30-100 cm



Clasificación de salinidad de suelos

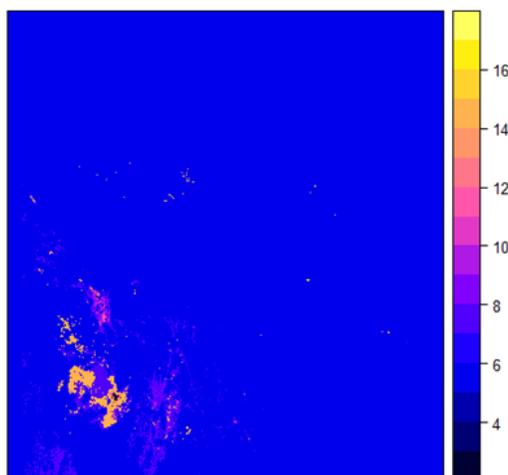
Los tres principales tipos de suelos salinos son: suelos salinos, sódicos, y salino-sódicos. La Tabla 1 proporciona los esquemas de clasificación popularmente utilizados para clasificar estos principales tipos de suelos afectados por salinidad.

Características de los suelos salinos

Propiedad del suelo	Unidad/ Símbolo	Tipo de suelo afectado por salinidad		
		Salino	Salino-sódico	Sódico
Conductividad eléctrica	CE (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	RAS	< 13	> 13	> 13

El paquete `soilassessment` contiene las funciones `saltClass`

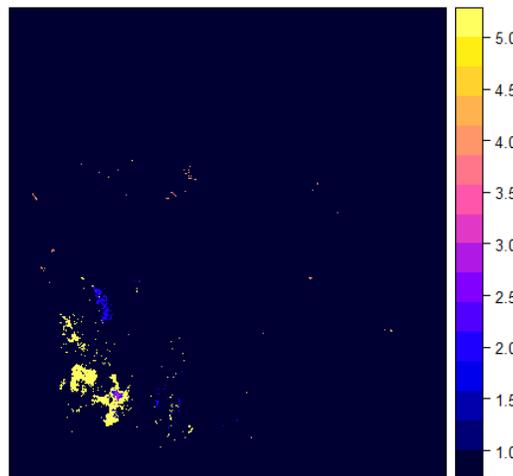
Min. 1.000 Q1 1.000 Mediana 1.000 Media 1.151 Q3 1.000 Máx. 5.000



Mapas de suelos afectados por salinidad superficial (0-30 cm) de suelos

Identificación de la intensidad de afectación por salinidad

Salinidad (CE _e dS/m)			Sodicidad (PSI)		
Intensidad	FAO	USDA	Intensidad	FAO	Amrhein (1996) ¹
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/M. Fuerte	70	25
Extrema	>15				



Mapa de intensidad de salinidad superficial (0-30 cm) del suelo

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 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 después comparadas con las clases de pixel extraído a partir de los mapas clasificados. El índice Kappa es un indicador adecuado para reportar la precisión.

Clasificación del conjunto de datos de validación

Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Máx.
3.0	6.0	8.0	8.5	11.5	15.0

Salinidad Extrema	Salinidad Moderada	Sodicidad Moderada	Ninguna
3	10	1	18
salino_sódico	SalinidadLigera	SodicidadLigera	SalinidadFuerte
12	13	16	5

✚ Extraer las clases de salinidad a partir del mapa utilizando las muestras de validación

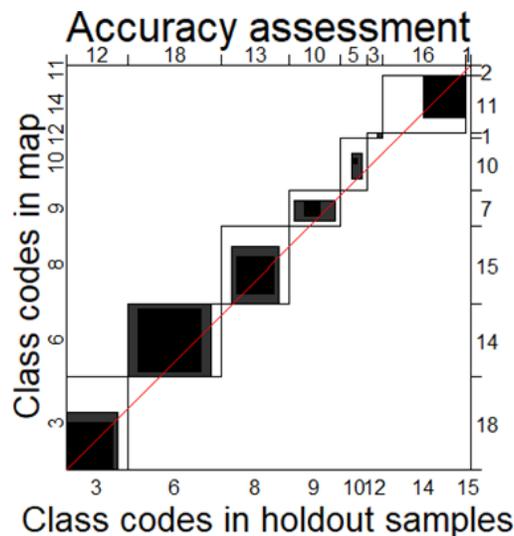
Después de clasificar el conjunto de datos de validación, el conjunto de datos se utiliza para extraer los valores de pixel del mapa clasificado y compararlos con la validación clasificada.

✚ Verificar el resumen de los pixeles clasificados extraídos

Min.	Q1	Mediana	Media	Q3	Máx.
3.000	6.000	8.000	7.808	10.000	14.000

Salinidad Extrema	Salinidad Moderada	Sodicidad Moderada	Ninguna
1	7	0	14
salino_sódico	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

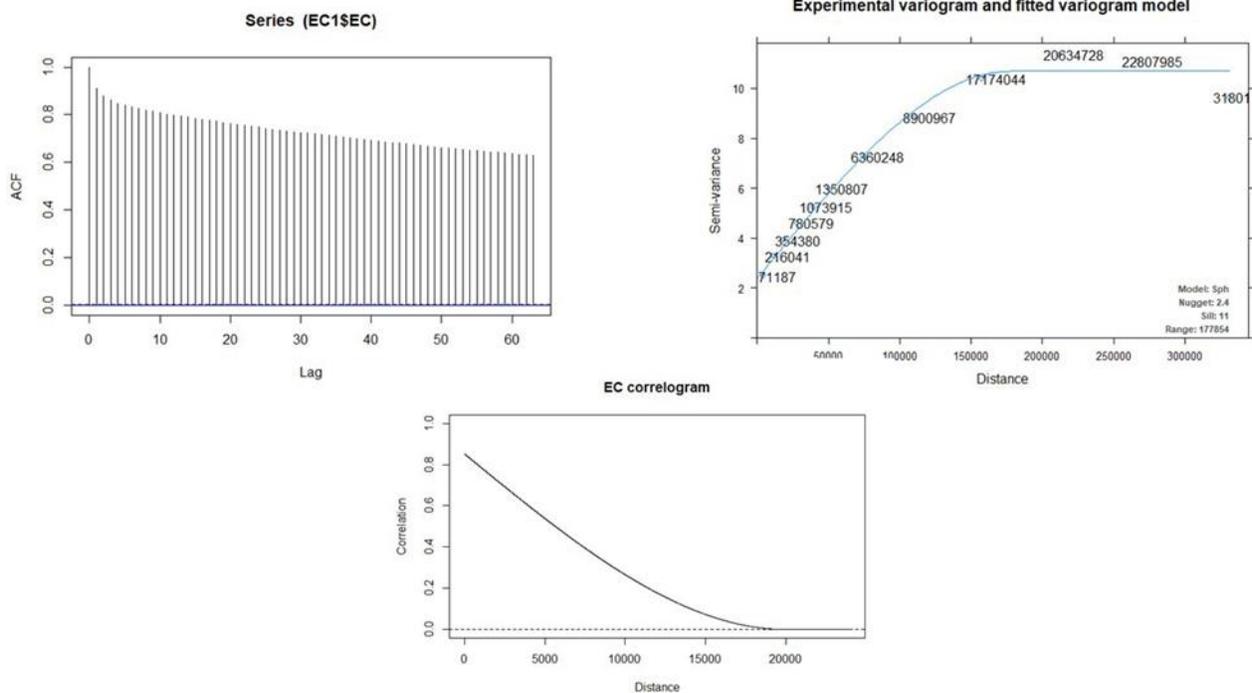


Precisión de la clasificación de suelos afectados por salinidad

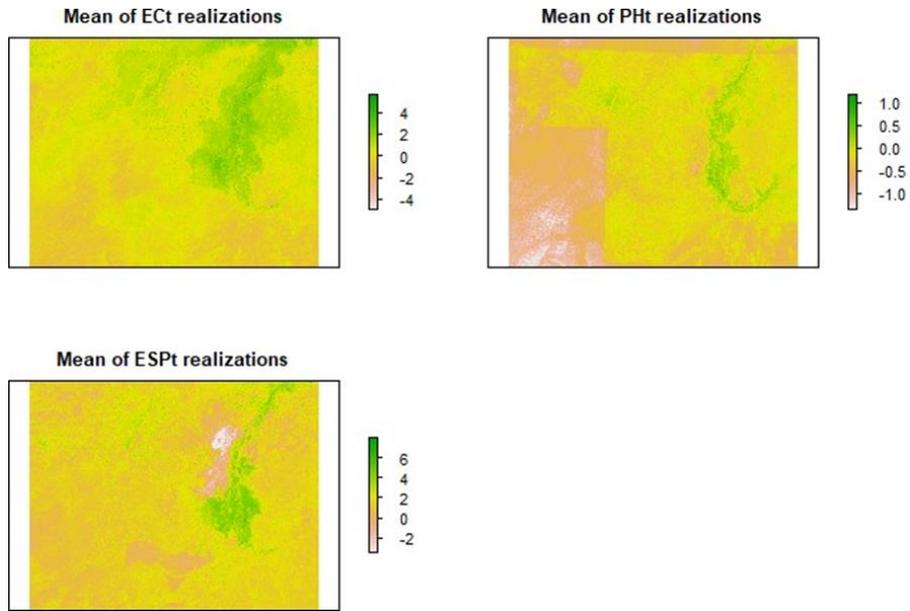
Evaluación de la incertidumbre

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.

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.



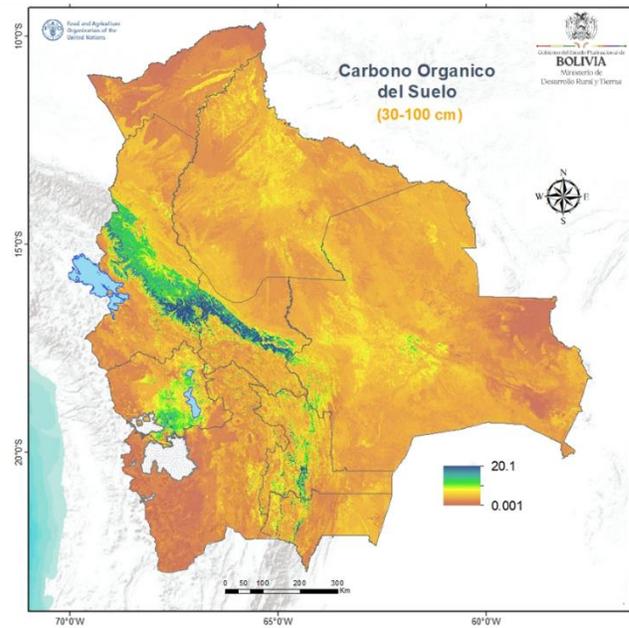
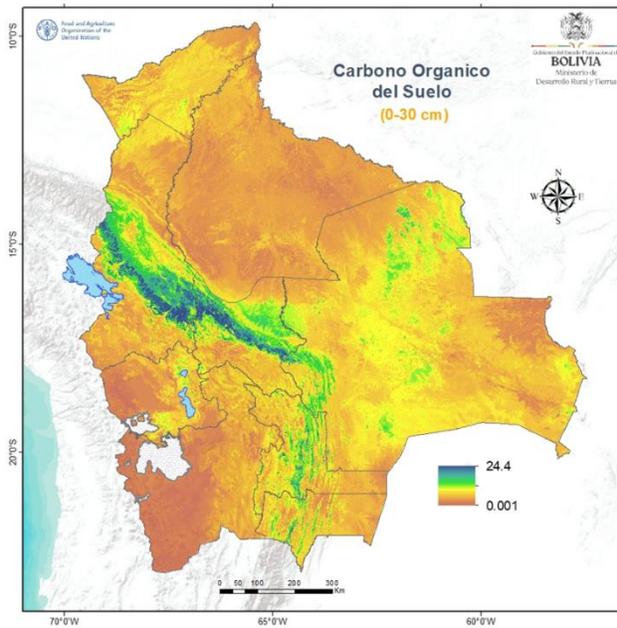
Funciones de correlación para CE (0-30 cm)



Procesos simulados de indicadores normalizados del suelo

Resultados

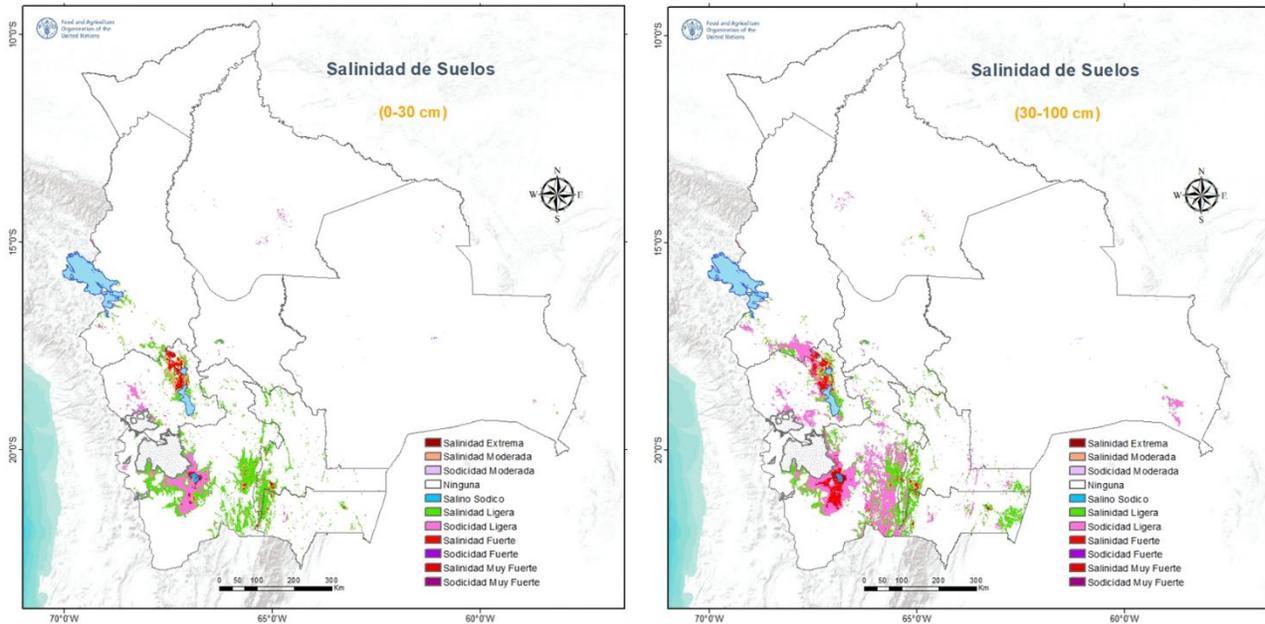
Carbono Orgánico del Suelo (v.2020)



COMPARACIÓN 2017 - 2020

	COS 2017	COS 2020
Número de muestras	10.800	13.700
Número de calicatas	6.000	10.600
Modelo MDS	RANDOM FOREST	QUANTILE RANDOM FOREST
Profundidades	0-30	0-30 30-100

Salinidad de Suelos



Referencias

Guías técnicas y libro de recetas para el mapeo de suelos afectados por salinidad. ([GSP- Secretariat@fao.org](mailto:GSP-Secretariat@fao.org))

Guías y especificaciones nacionales para el mapeo de suelos afectados por salinidad.

Fuentes de datos

Datos de suelos:

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

Portal de Suelos de la FAO (<http://www.fao.org/soils-portal/en/>)

Datos de Suelos de Estados Unidos (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/national-soil-maps-eudasm>)

Clima: (WorldClim) <https://www.worldclim.org/>

Cobertura terrestre:

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

Imágenes de sensores remotos

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