



Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba

Estimates, simulations and the influence of expertise in the prediction of the collapsibility of loessial soils in the city of Cordoba

Rocca, R.J. ¹ ✉ - Terzariol, R.E. ¹ - Zeballos, M.E. ¹

Recibido: 20 de Noviembre de 2012 • Aceptado: 10 de Mayo de 2013

Resumen

Los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba se extienden a ambos márgenes del río Suquía y abarcan unas 30.000 hectáreas. Estos suelos macroporosos tienen distinto grado de colapsibilidad por humedecimiento, que va desde aquellos capaces de autocolapsar bajo su propio peso hasta los potencialmente colapsables que requieren de la acción de cargas externas para que se produzca el fenómeno.

Uno de los problemas que aún persiste está relacionado con la distribución areal, debido a que no es factible contar con suficientes datos como para tener mapas de alta confiabilidad.

Entre las soluciones posibles para cubrir las áreas no prospectadas, se encuentran el uso de métodos de extrapolación por medio de estimaciones geoestadísticas y simulación estocástica.

Otra manera de tratar el tema se refiere al empleo de información subjetiva, de acuerdo con la experiencia de los especialistas y su intuición en el tema. Existen métodos para combinar esa experticia con datos numéricos mediante actualización bayesiana.

Se analizan los resultados empleando SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), cuya versión 5, recientemente presentada en 2008, permite la implementación de todos los procedimientos, en un ambiente relativamente sencillo para el usuario.

Se han valorados distintos sectores de la ciudad, cuyas antecedentes generales presentan diferente grado de colapsibilidad definidos según criterios bien reconocidos. Los resultados obtenidos han sido contrastados con información independiente que no ha participado en los cómputos.

¹. Área Geotecnia, FCEfyn. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina

✉ rjrocca@efn.uncor.edu

Se comentan las dificultades encontradas en la resolución del mapeo y las limitaciones generales y particulares referidos a los métodos y a su implementación.

Palabras clave: loess-colapsibilidad-Córdoba-actualización-variabilidad.

Abstract

Loess soils of Cordoba city extend to both sides of the Suquia river and cover 30000 hectares. These macroporous soils have different degrees of collapsibility upon wetting, ranging from self-subsident under its own weight up to potentially collapsible, requiring external loads.

One problem that persists is related with the areal distribution, because it is not feasible to have enough data to generate maps with high reliability.

Among possible solutions to cover areas not prospected, are the uses of extrapolation methods using geostatistical estimates and stochastic simulation.

Another way to address the issue relates to the use of subjective information, according to the experience of experts and their intuition on the subject. There are methods to combine that expertise with numerical data using Bayesian updating.

The problem is analyzed using SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), whose version 5, recently introduced in 2008, allows the implementation of all the procedures in a relatively simple way for the user.

Different sectors of the city have been valued, whose general background have different levels of collapsibility defined by well recognized criteria. The results have been contrasted with independent data that has not participated in the computations.

It is discussed the difficulties encountered in the resolution of mapping and general and specific limitations relating to the methods and their implementation.

Keywords: loess-collapsibility-Cordoba-updating-variability.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Córdoba tiene una importante extensión de su superficie con suelos de origen loésico, que ocupan las planicies situadas fuera del valle del río Suquia. (Bodenbender, 1890, Reginatto, 1970, Quintana Crespo, 1991, Rocca et al. 1990, Rocca et al 1999, Rocca 2004, Rocca 2006).

La ciudad se ha expandido desde su posición original en el valle hacia las planicies norte y sur (formadas por suelos loésicos Zonas 4 y 5. Figura 1, Rocca et al 1999) y las construcciones han ido tomando contacto con este tipo de suelos. Esto se ha acelerado a mediados del siglo XX.

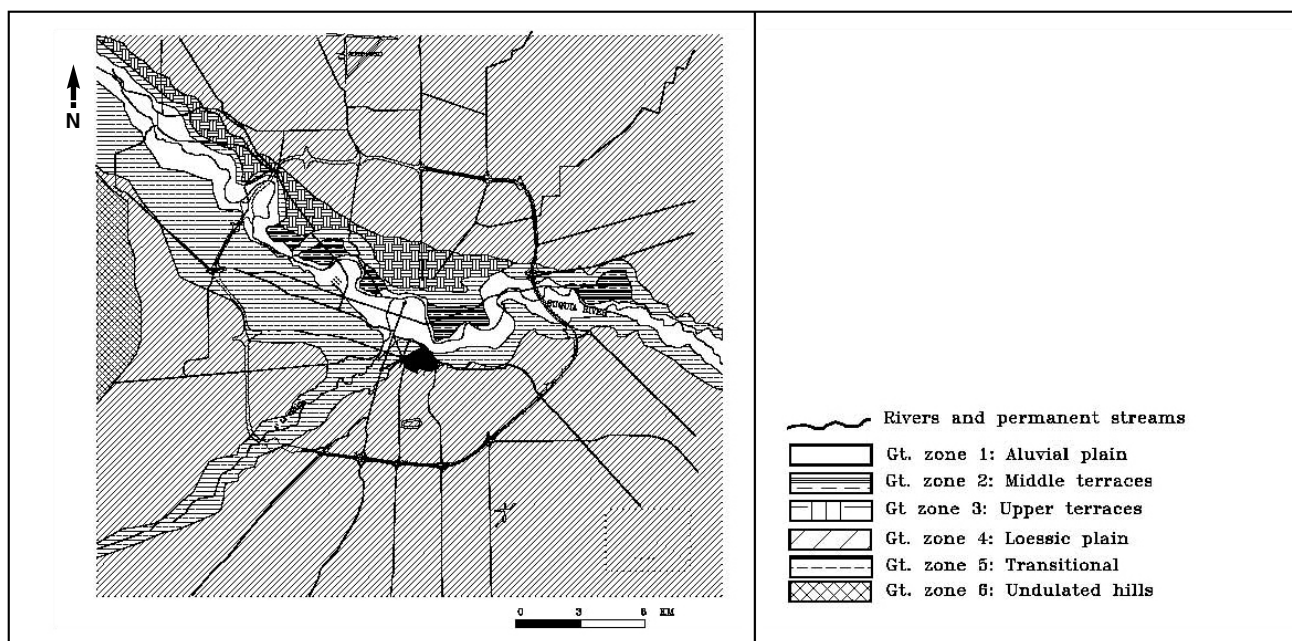


Figura 1. Características de los suelos presentes en la ciudad de Córdoba (según Rocca et al 1999)

Los loess tienen variado comportamiento areal de acuerdo a los distintos tipos de estructuras internas, cementaciones y espesores presentes. El grado de conocimiento de los espesores loessicos es muy limitado y ha sido estudiado en algunos sectores de la ciudad donde existen perforaciones profundas (Rocca et al. 1996). En el sector Norte, próximos al aeropuerto se han excavado pozos de unos 100 metros. En el sector Sur, son relativamente común la construcción de pozos absorbentes del orden de 35 metros de profundidad.

La estructura interna macroroporosa de los loess se caracteriza por ser colapsable y por lo tanto, se han generado numerosos problemas y daños en las construcciones fundadas en forma directa.

Para analizar ese problema, existen métodos estadísticos que simplifican la cuantificación de los asentamientos de las fundaciones directas generados por construcciones de una a tres plantas (Rocca, 2006).

Para diferenciar los distintos tipos de loess se puede emplear la Relación de Colapsabilidad, $RC = P_f/P_o$. Esta expresión vincula la presión de fluencia, P_f , obtenida en ensayos edométricos con la presión de cobertura del terreno, P_o (Rocca et al, 1990). Así se pueden distinguir dos tipos básicos de comportamiento: cuando RC es menor que 1, son loess autocolapsables, mientras que cuando RC es mayor que 1 son loess potencialmente colapsables.

La mayoría de los loess requiere de cargas exteriores para colapsar, o sea son potencialmente colapsables.

En el cálculo de los asentamientos por colapso de un perfil de suelos, hay que integrar en profundidad, los asentamientos de los estratos con sus características de colapsabilidad

Con los perfiles analizados, se han trazado mapas de los asentamientos potenciales máximos de construcciones de una a tres plantas, en el caso de que el suelo se sature. Para la realización de los cálculos de este trabajo, se han considerado los primeros 12 metros de suelos, teniendo en cuenta que se trata de fundaciones directas.

La ciudad de Córdoba tiene 57.600 hectáreas. Si se descuenta el valle del río Suquía y su afluente, el arroyo La Cañada,

el área remanente está ocupado por suelos loessicos. Se los pueden encontrar en las planicies al Norte y al Sur del río (Zona Geomorfológica 4) con unas 33000 has y en una banda de Transición (Zona Geomorfológica 5) con otras 6.000 has.

Cuando se formulan mapas de predicción del comportamiento de los suelos loessicos de la ciudad se presentan numerosas incertidumbres. Esto se debe a la limitada cantidad de datos comparada con la superficie que ocupan los suelos loessicos. Por ello es necesario plantear cómo extrapolar los resultados de análisis en esos pocos sitios (menos del 2% de la superficie), a otros situados en zonas sin datos (alrededor del 98%). Asimismo, hay que considerar la manera más eficiente de actualizar las formulaciones existentes.

En la resolución del problema de escasez de datos, se pueden realizar distintos procedimientos, tales como las estimaciones geoestadísticas o por simulación estocástica del terreno. Es interesante señalar que esta disyuntiva ya ha sido estudiada en algunas geociencias, en problemas ambientales, en minería y en la edafología. (Brus et al 1997, Goovaerts 2000). Se puede añadir la opinión cualitativa de expertos para actualizar la información existente (Rocca et al 2010).

En este trabajo se presentan los resultados de distintos procedimientos para analizar y actualizar los mapas de predicción existentes. Los resultados se han contrastado con mediciones directas de otro conjunto de datos independientes, que no han participado de la prognosis.

TIPOLOGIA DE LOS SUELOS LOESSICOS

Los modelos más simplificados para estudiar la colapsabilidad de los distintos suelos loessicos presentes en Córdoba, han conducido a la clasificación en Tipos Geotécnicos, de acuerdo a las deformaciones que se producen cuando se induce el colapso

Como resultados de la misma, se distinguen varios Tipos Geotécnicos autocolapsables (TG As, TG Ai, TG D) y otros que son potencialmente colapsables (TG P, TG M, TG E). Las definiciones se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Asentamientos promedios por colapso (Rocca 2002)

TIPO GEOTECNICO	RC	Profundidad	1 Planta %	2 Plantas %	3 Plantas %
Autocolapso superior (TG As)	< 1	0 a 3 metros	7,08	8,96	10,67
Autocolapso inferior (TG Ai)	< 1	3 a 10 metros	4,63	4,85	5,09
Daño Potencial (TG P)	1 a 2	0 a 3 metros	2,66	4,23	5,93
Daño Marginal (TG M)	1 a 2	3 a 10 metros	1,12	1,12	1,12
Libre de Daños (TG L)	> 2		0,00	0,00	0,00
Autocolapso Profundo (TG D)	< 1	Mayor a 10 m.	4,56	4,56	4,56
Marginal Profundo (TG E)	1 a 2	Mayor a 10 m.	0,00	0,00	0,00
Inexistencia de daño (TG I)			0,00	0,00	0,00

RC: Relación de Colapsabilidad

Profundidad: entorno de validez del TG

1 Planta: construcción con zapatas cargadas con 7 T/m²

2 Plantas: construcción con zapatas cargadas con 12 T/m²

3 Plantas: construcción con zapatas cargadas con 18 T/m²

Los valores más probables de la Relación de Colapsibilidad, en los suelos de Córdoba, se extrajeron de la Base de Datos Geotécnica de la U.N.Córdoba, empleando los resultados de 830 ensayos de compresión confinada, tabulados de acuerdo con la profundidad.

Para analizar las variaciones sectoriales, se dividió a la ciudad en tres grandes zonas: al N del río Suquía, al SW del río Suquía y al SE del río Suquía. Estas dos últimas están separadas por el Arroyo La Cañada. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 2. Relación de colapsibilidad en la ciudad de Córdoba

TIPOS GEOTECNICOS AUTOCOLAPSABLES						
	#	TG As P _f /P _o	#	TG Ai P _f /P _o	#	TG D P _f /P _o
ZONA NORTE (DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	16	0,71	31	0,67	2	0,45
COV		0,25		0,27		0,13
ZONA OESTE (SW DEL SUQUIA)						
PROMEDIO	41	0,74	41	0,56	38	0,56
COV		0,28		0,36		0,36
ZONA ESTE (SE DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	57	0,71	138	0,61	45	0,64
COV		0,25		0,39		0,44
TOTAL DE ENSAYOS	114		236		85	
PROMEDIOS GENERALES		0,72		0,60		0,60
TIPOS GEOTECNICOS POTENCIALMENTE COLAPSABLES						
	#	TG P P _f /P _o	#	TG M P _f /P _o	#	TG E P _f /P _o
ZONA NORTE (DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	26	1,57	34	1,45	5	1,70
COV		0,27		0,21		0,12
ZONA OESTE (SW DEL SUQUIA)						
PROMEDIO	52	1,50	49	1,37	28	1,46
COV		0,18		0,18		0,21
ZONA ESTE (SE DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	72	1,46	85	1,39	43	1,39
COV		0,19		0,20		0,20
TOTAL DE ENSAYOS	150		168		71	
PROMEDIOS GENERALES		1,49		1,40		1,44

#: número de ensayos

TG: Tipo Geotécnico (ver definiciones en Tabla I)

TIPOS DE ANÁLISIS REALIZADOS

La Geoestadística es una disciplina que estudia fenómenos que fluctúan en el espacio y sus métodos estadísticos son empleados por varias geociencias. Se la puede definir como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias a la descripción de la distribución espacial de propiedades de materiales geológicos (Auvinet et al 2001).

A fines de la década de 1960 fue establecida para mapear la distribución espacial de uno o más atributos. Las aplicaciones más recientes han migrado hacia la simulación condicional también llamada imagen estocástica. Permite dibujar realizaciones igualmente probables, alternativas, de la distribución espacial del atributo estudiado (Deutsch et al 1998).

Estimaciones

La forma más empleada del análisis geoespacial es la interpolación, donde los datos puntuales son transformados en mapas continuos estimando los valores en los lugares no muestreados. Estos valores son sólo predicciones y existe incertidumbre sobre el valor exacto. Algunos métodos como en las estimaciones geoestadística se pueden cuantificar la incertidumbre implícita. Los valores no muestreados son una función de la estructura de correlación que describe la variabilidad espacial.

La estimación espacial de datos se realiza en función del conocimiento que existe entre los valores de una variable (en este caso, asentamientos) situados a una distancia determinada h (lag). La relación entre los valores de dos puntos en función de la distancia, se expresa a través de correlogramas, covariancia o variogramas (Auvinet et al, 2001, Deutsch et al 1998, Davis 1986, Isaaks et al 1989).

Una de las ventajas de la Geoestadística, sobre otras formas de interpolación, es que toma como base el krigeado (kriging) que es un estimador lineal no sesgado (BLUE: best linear unbiased estimator). Esto se debe a que está basado en la minimización de la variancia. Existen varios tipos de krigeado, siendo los más empleados el ordinario (OK) y el de indicadores (IK).

Asimismo, es posible obtener, además de los valores de las estimaciones, los correspondientes a la desviación estándar de la estimación, la que se suele tomar como la matriz de errores. Esto es la principal ventaja teórica sobre otros métodos de interpolación más sencillos como el de la distancia inversa.

Los métodos geoestadísticos proveen este estimador formal de la confiabilidad de los datos interpolados permitiendo que se destaquen las áreas de incertidumbre estadística. Cualquier error estándar que sea mayor que la desviación estándar de la muestra denota una predicción no confiable (Isaaks et al).

Existen variados ejemplos de aplicación en ingeniería geotécnica (Giles, 1994, Auvinet et al 2003, Parsons et al 2002, Christian, 2003, Baecher et al 2003) y en particular a suelos colapsables (Ali et al 1989).

Simulación Estocástica

La simulación estocástica trata básicamente de generar un juego de representaciones equi-probables (denominada realizaciones) de la distribución espacial de valores de atributos (en este caso asentamientos) y usar las diferencias entre los mapas simulados como una medida de la incertidumbre.

La simulación estocástica no tiene como objetivo minimizar la variancia del error local, sino que se enfoca en la reproducción de estadística tal como el histograma de muestreo (Brus et al 1997, Goovaerts 2000).

Hay realizaciones que están condicionadas a los valores de los datos. La simulación condicional fue inicialmente desarrollada para corregir el efecto de la suavización mostrado en los mapas producidos por los algoritmos del kriging. De hecho, las estimaciones por kriging son promedios móviles ponderados de los valores de los datos originales, por lo que ellos tienen menor variabilidad espacial que los datos originales (Figura 2).

El principio de simulación secuencial es una generalización en el que el condicionamiento se extiende para incluir todos los datos disponibles dentro de un vecindario, incluyendo los datos originales y todos los valores previamente simulados. Entre los métodos más empleados están la Simulación Secuencial Gaussiana (SGS) y la Simulación Secuencial de Indicadores (SIS) (Deutsch et al 1998).

Participación de expertos

La Geoestadística también permite el empleo de información cualitativa (soft) combinándola con datos reales numéricos (hard). Existen antecedentes que provienen de otras disciplinas tales como la Hidrología y la Edafología.

Deutsch and Journel (1998) han expresado que la principal ventaja de la aproximación por IK para generar una distribución condicionada acumulada CCDF a-posteriori es la habilidad para tener en cuenta datos cualitativos.

El modelo CCDF puede ser visto como un cokriging de indicadores donde la información se nutre de diferentes tipos: la información de indicadores hard y las probabilidades a-priori soft.

Si se los puede incorporar en los valores de probabilidad local a-priori, IK puede ser usado para integrar esa información dentro de los valores de la probabilidad a-posteriori. El proceso de IK consiste en una actualización de tipo bayesiana de la CCDF local a-priori en una CCDF a-posteriori usando la información suministrada por la CCDF local a-priori del vecindario.

El nombre del modelo Markov-Bayes (MB) para la CCDF relaciona a la aproximación constitutiva de Markov con el proceso bayesiano de adaptación a datos de la función a-priori.

La implementación MB para tener en cuenta datos de indicadores cualitativos se asimila a un cokriging de indicadores, donde las covariancias de datos de indicadores cualitativos y las covariancias cruzadas son calibradas desde el modelo de covariancia de indicadores hard. En todos los otros aspectos el algoritmo MB es similar a la simulación de indicadores secuenciales.

Este tipo de solución ha sido planteada en Geotecnia por Kinnicutt and Einstein (1996), en la creación de perfiles del terreno. Es un modelo iterativo en el cual se coloca inicialmente un perfil geológico usando datos objetivos existentes, y se va actualizando con el añadido o supresión de nuevos datos.

Bardossy et al (1998), han empleado la MB en una cuenca loessica de unos 6 km². Murray et al (2002) han usado esta técnica en el mapeo de contaminantes. Regli et al (2004) han indicado que la actualización en la simulación secuencial de indicadores es adecuada para la simulación de variables continuas o codificadas categóricamente.

Empleo de Tecnologías disponibles de fácil accesibilidad

La implementación de estos métodos requiere el empleo de un software geoestadístico específico. Recientemente, Goovaert (2009) ha realizado una comparación entre las ofertas disponibles. Algunos de estos programas tienen costos reducidos, incluso gratis, con los que se puede generar variogramas y realizar las interpolaciones por kriging y otros permiten también hacer simulación y actualización.

La principal fuente es la biblioteca Gslib (Geostatistical Software Library) que es un conjunto de programas desarrollados en D.O.S. por la Universidad de Stanford (Deutsch et al 1998). Los algoritmos se han incorporado a varios paquetes de programas más amigables.

En este trabajo se empleó el SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance) V. 5 que es el producto de The Institute for Environmental Modeling (2008), un Consorcio liderado por la E.P.A. (U.S.A.) y varias universidades coordinadas por la U. Tennessee. Es un proyecto muy amplio y difundido, destinado a problemas esencialmente ambientales. Es de mencionar que el SADA combina a su accesibilidad (gratuidad) una muy buena prestación general para mapeos, tanto en 2D como en 3D. En la versión 5 ha incorporado a su menú la simulación. Además, ha simplificado mucho la instrumentación. Permite crear modelos pintándolos en el mapa. Pueden ser del tipo probabilístico cuando se expresa la probabilidad de que algo sea verdadero o falso. Esto podría ser la probabilidad de que un criterio de decisión pudiera ser excedido. Así, el rango de valores va desde 0 a 1.

Los modelos pueden ser suavizados con un algoritmo. La actualización se realiza por medio de un modelo MB. Como en todos los modelos geoestadísticos se requiere de un modelo de correlación para la actualización.

COMPARACIÓN DE MÉTODOS

Para el estudio, se introdujeron en el SADA v5, los datos de asentamiento un conjunto de perfiles de los distintos sectores de la ciudad. Con los distintas subrutinas, se realizaron cálculos para generar mapas en una cuadrícula de 120 x 120 pixels.

Para evaluar las diferencias entre los distintos métodos, se realizaron correlaciones entre ellos, mediante la comparación de los coeficientes de correlación entre los 14.400 puntos que están representados en cada uno de los mapas generados.

Estimaciones OK vs Distancia inversa

La correlación entre el OK y el método de Distancia inversa dio como resultado un CC = 0,982. Esto implica que el esfuerzo de usar estimaciones por OK no se refleja en mejoras sustanciales de resultado, frente a un método más sencillo como el de Distancia inversa.

Estimaciones por OK vs Simulaciones SGS con distinto número de realizaciones

La comparación visual entre ambos métodos, OK y SGS se presenta en la figura 2, donde se puede apreciar que a medida que aumenta el número de realizaciones, los gráficos de SGS se van aproximando al OK. El valor del coeficiente de correlación es de 0,94, cuando el número de realizaciones de SGS es 10, mientras que sube a 0,98 considerando SGS con 100 realizaciones.

Estimaciones IK vs Simulaciones SIS

La comparación entre IK y SIS presenta un CC de 0,86, lo que es inferior a los casos precedentes.

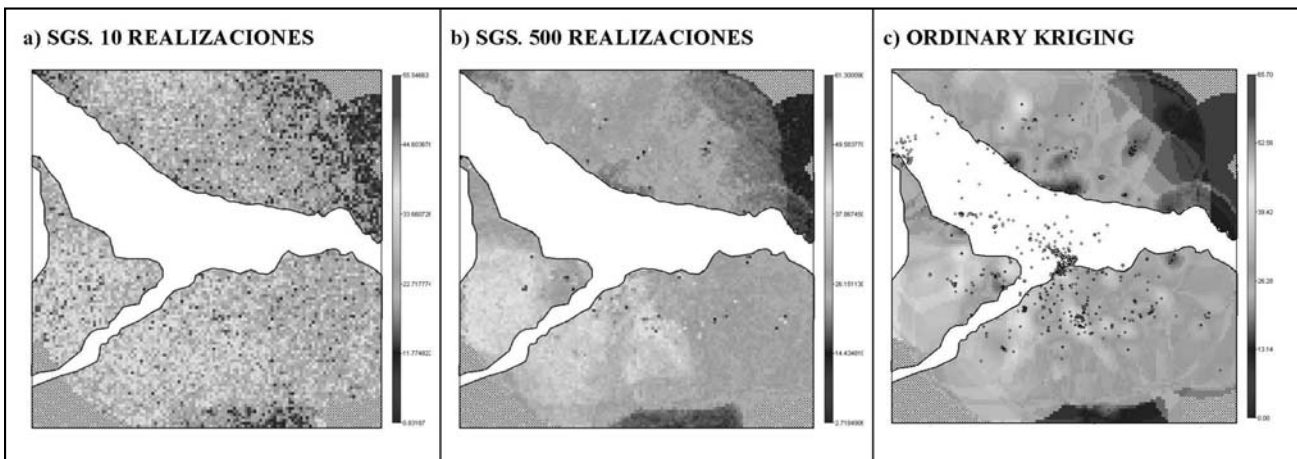
Cuando se comparan entre si, distintas simulaciones, el CC entre SIS 10r y SIS 100r es de 0,87

Actualizaciones de expertos con mapas de excedencia de distintos niveles

La participación de expertos requiere que formulen un mapa de tipo probabilístico, que luego es actualizado con datos reales. A los expertos se les solicitó que explicitaran gráficamente cuál es la probabilidad que cada zona de la ciudad tenga asentamientos de 15 y 35 cm. A modo de ejemplo, una de las respuestas formulando un mapa de experto y su actualización MB, se presenta en la figura 3. (Rocca et al 2010).

Para medir la influencia de los mapas de predicción formulados por expertos, se compararon las salidas de mapas generados a partir de considerar probabilidad de superar umbrales de 15 cm y de 35 cm.

Se analizaron los casos de umbrales probabilísticas correspondientes a 0, 15, 35 y 50 cm de asentamiento. La comparación entre los resultados de las actualizaciones considerando comenzar con un mapa a-priori de experto con umbral de 15 y con umbral de 35 cm, tiene un CC = 0,999. (Figura 4). Esto implicaría que no es relevante el umbral para la formulación del experto.



Figuras 2. Comparación visual entre a) y b) SGS y c) OK de las Zonas 4 norte y sur definidas en la figura 1. Las zonas vacías corresponden al valle del río Suquia y su afluente la Cañada y la región montañosa del oeste.

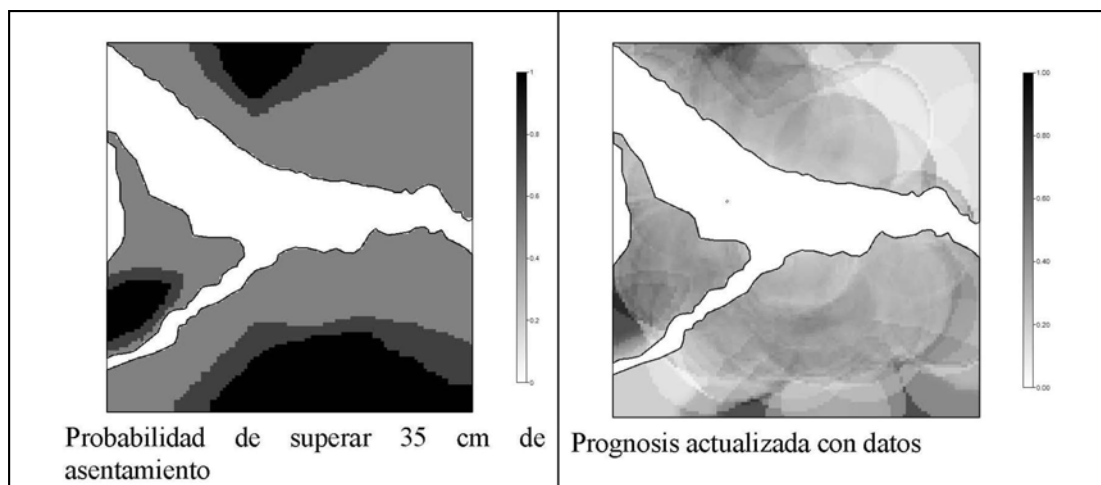


Figura 3. Actualización de un mapa realizado por un experto para las Zonas 4 norte y sur definidas en la figura 1. Escala de grises: negro=1, blanco=0

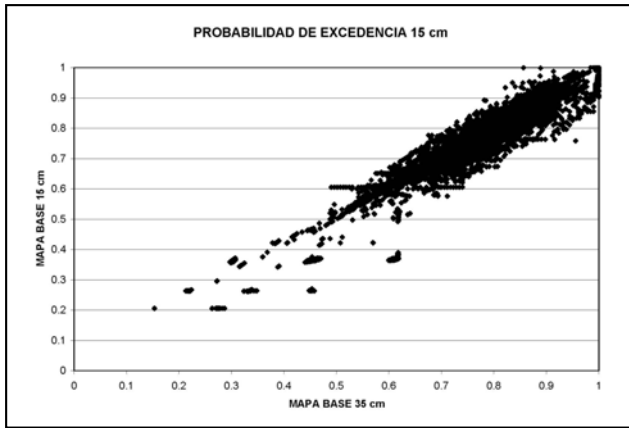


Figura 4. Correlación entre los resultados obtenidos con un mapa de experto con umbral de 15 y de 35 cm, en el cálculo de probabilidad de excedencia de 15 cm. en el mapa actualizado con datos numéricos.

VERIFICACIONES EN PUNTOS CONOCIDOS

Para validar los resultados obtenidos por los distintos métodos, se emplearon mediciones directas en localizaciones cuyos datos no participaron en los análisis. La figura 5 presenta los resultados en términos absolutos, comparando distintos métodos para tres puntos con asentamientos por colapso conocidos, desde baja a alta colapsabilidad.

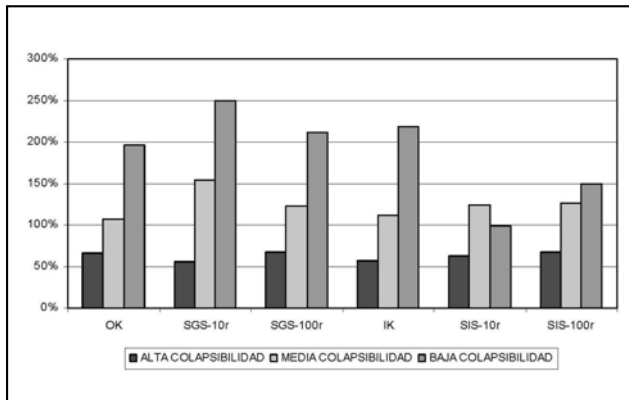


Figura 5. Relaciones entre las estimaciones/simulaciones y el valor de cálculo directo de puntos de control, expresado como porcentaje de éste (Rocca 2010).

Se puede apreciar que a medida que aumenta el número de realizaciones desde 10 a 100, los valores no se comportan uniformemente, tal como se puede presuponer desde el punto de vista teórico.

Esto llevó sumar más datos independientes y a analizar otros mapas de probabilidades abarcando una mayor gama de comportamiento, incorporando también las actualizaciones MB realizadas con mapas con participación cualitativa de expertos. En este último caso, los expertos responden sobre probabilidades de alcanzar un determinado umbral.

Para poder valorar los resultados, se puede considerar que en los lugares correspondientes a los puntos de control, la probabilidad de alcanzar los valores de asentamiento será de 1. La diferencia en alcanzar esa cifra, indica cuán alejado se está en la prognosis del método.

La figura 6 señala los resultados de las verificaciones realizadas para distintos métodos. Se calcularon probabilidades de excedencia de niveles de asentamiento para estimaciones por OK, SIS con cien realizaciones y la actualización de mapas formulados por expertos. En este caso, se partió de mapas de probabilidades de exceder 15 y 35 cm.

Cada punto de la figura 6 indica las probabilidades alcanzadas por cada método en particular. La probabilidad igual a 1 es la condición de verificación perfecta.

Se observa que hasta los 25 cm de asentamiento, aproximadamente, algunos valores pronostican razonablemente bien. En cambio para asentamientos altos, las probabilidades de las prognosis son relativamente bajas.

Los puntos correspondientes a la opinión de expertos usados en la actualización aparecen dentro de la tendencia general y no parecen diferenciarse significativamente en las prognosis.

Si se desagregan los resultados por zonas (Figura 7) se observa en general, una tendencia similar. Sin embargo, en los análisis realizados en la zona E, las diferencias entre los valores correspondientes a los asentamientos menores a 25 cm y los superiores a éstos, parecen más marcados.

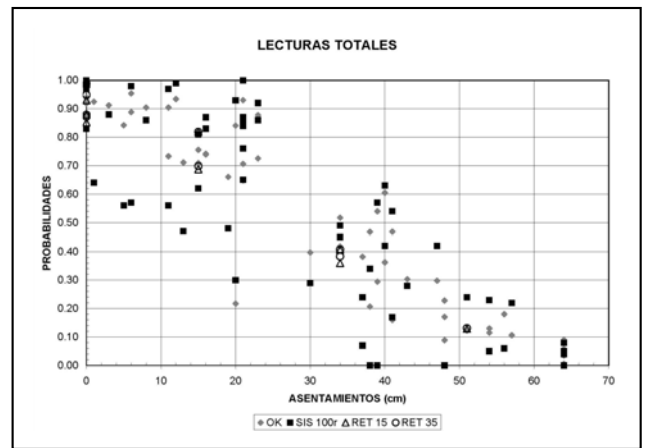


Figura 6. Comparación de probabilidades de los distintos métodos, estimaciones (OK), simulaciones (SIS) y actualización de formulaciones de expertos (RET 15, RET 35)

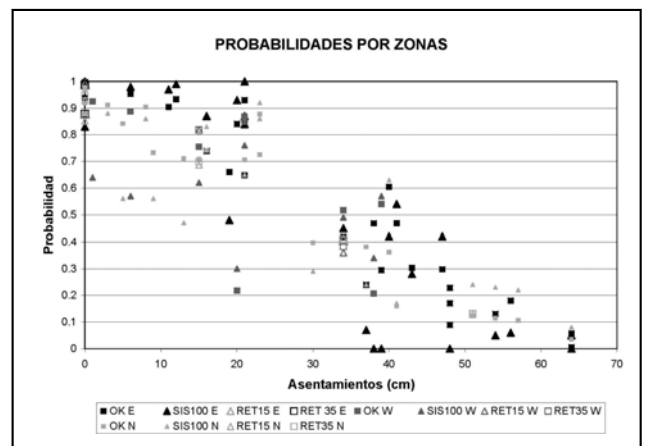


Figura 7. Desagregado de las probabilidades de los distintos métodos, de acuerdo a los distintos sectores de la ciudad.

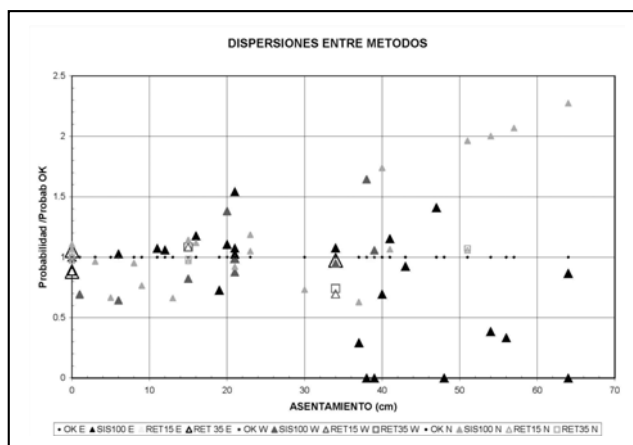


Figura 8. Relaciones entre distintos métodos, tomados relativo a la probabilidad computada por OK.

Para analizar los comportamientos relativos se calcularon relaciones entre las distintas prognosis. Se normalizó con relación a las probabilidades calculadas por OK y se los graficó en la figura 8.

En la figura 8 se observa que a medida que aumenta el asentamiento, existe mayor dispersión relativa entre los métodos empleados. Los valores correspondientes a expertos, se presentan con menor dispersión relativa que las simulaciones secuenciales.

Se nota, además, tendencias de tipo zonal, en este caso E (sudeste) y N (norte). Estas tendencias no son uniformes, y dependen del tipo de análisis que se realice. Lo más significativas se observan en la diferencia de sentido entre las zonas E y N, en correspondencia con el SIS.

Estas diferencias zonales no han sido aclaradas aún, y se especula sobre distintos fuentes que requieren estudios más profundos.

CONCLUSIONES

Los problemas de los suelos loessicos colapsables de la ciudad de Córdoba son conocidos desde hace varias décadas. Por ello se conoce bien que las zonas potenciales de generar daños están localizadas en las planicies al norte y sur del río Suquia. No obstante ello, todavía existen incertidumbre sobre detalles de ubicación que expliquen las diferencias de comportamiento de acuerdo con los espesores de los distintos tipos de loess y la susceptibilidad al colapso propia de ellos.

Debido que una considerable proporción de los loess requiere de la presencia de cargas exteriores para colapsar, existen cuantificadores como la Relación de Colapsabilidad y

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ALI, M.M., E.A. NOWATZKI AND D.E. MYERS, 1989.

Geostatistical methods to predict collapsing soils.
Proc. XII Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Vol 1: 567-570.

AUVINET, G., M. JUAREZ AND Z. MEDINA, 2001.

Geostatistical interpretation of soil exploration.
Proc. XV Intl. Conf. Soil Mech. Geot. Engng. Istanbul. Vol 1: 373-376.

AUVINET G., AND M. JUAREZ, 2003.

Geostatistical Characterization of the Lacustrine subsoil of Mexico valley.
Proc. XII PanAm. Conf. Soil Mech. Geot. Engng. Boston. Vol 1: 61-66.

procedimientos para su rápida determinación por medio de ensayos edométricos.

La visualización de la variabilidad espacial de los asentamientos de loess debido a la colapsabilidad, se puede apreciar a través de la representación de los asentamientos máximos que ocurrirían en construcciones fundadas en forma directa y extender por interpolación en el resto de la zona loessica.

Las herramientas informáticas disponibles más potentes han permitido realizar esta tarea empleando estimaciones geoestadísticas o mediante modelación estocástica.

En el análisis también se han considerado la actualización de la opinión cualitativa de expertos. La combinación con datos reales genera nuevos mapas cuyo análisis permite ponderar la influencia de estas opiniones.

Los cálculos se han realizado empleando SADA v. 5, que está integrado con un sistema de información geográfica. Este programa es el que brinda las mejores prestaciones en cuanto a costos y amigabilidad.

Se han producido mapas con los asentamientos esperables y sus variaciones areales por medio de Krigeado Ordinario (OK) y Krigeado de Indicadores (IK) y se han comparado con sus analogías estocásticas, la Simulación Gaussiana Secuencial (SGS) y la Simulación de Indicadores Secuenciales (SIS). A esto ha que sumar, la combinación de datos cualitativos de expertos.

El control realizado en puntos independientes no señala diferencias sustantivas entre los distintos métodos, en el sentido de que muestran igual tendencia. Hay diferencias en cuanto al mayor gasto computacional de las simulaciones estocásticas, por lo que se la debería reservar para problemas donde se deban reflejar los patrones de variabilidad local.

La experiencia global indica que los resultados de mapas de probabilidades de todos los métodos van perdiendo precisión a medida que va aumentando la magnitud del asentamiento por colapso.

Se observa que la opinión experta genera mejoramientos que tienen mayor influencia sobre las simulaciones estocásticas y relativamente poca sobre las estimaciones geoestadísticas. Esto se nota más cuando se analizan las dispersiones de los métodos en los distintos rangos de asentamiento por colapso.

Las variaciones zonales de los distintos sectores de la ciudad presentan particularidades que requieren un análisis más pormenorizado que el realizado hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la U.N.C. y de la Agencia Córdoba Ciencia (Gobierno de Córdoba).

- BAECHER, G.B. AND J. CHRISTIAN, 2003.
Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering.
J. Wiley, 605 pp. Chichester. UK.
- BARDOSSY A, AND W. LEHMANN, 1998.
Spatial distribution of soil moisture in a small catchment.
Part 1: geostatistical analysis. J. of Hydrology, 206:1-15.
- BODENBENDER G., 1890.
La cuenca del valle del Río Primero en Córdoba.
Bol. Ac. Nac. Ciencias. Córdoba. Tomo XII: 5-54.
- BRUS, DJ AND J.J. DE GRUIJTER, 1997.
Random sampling or geostatistical modeling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with Discussion).
Geoderma 80: 1-44. Discussion: 45-59.
- CHRISTIAN, J.T., 2003.
Geotechnical Engineering Reliability: How well do we know what are doing?
ASCE J. Geot. Geoenv.Engng Vol 130: 985-1003.
- DAVIS, J.A., 1986.
Statistics and data analysis
in Geology. J. Wiley, 646 pp., New York.
- DEUSTCH, C.V. AND A.G. JOURNAL, 1998. GSLIB.
Geostatistical Software Library and User's Guide.
Oxford U. Press, 369 pp. London. U.K.
- GILES, D., 1994.
Geostatistical interpolation techniques for geotechnical data modeling and ground conditions risk and reliability assessment. B.
O. Skipp, ed. Risk and Reliability in ground engineering.: 202-214. Thomas Telford, London.
- GOOVAERTS, P., 2000.
Estimation or simulation of soil properties?
An optimization problem with conflicting criteria.
Geoderma 97:165-186.
- GOOVAERTS, P (2009)
Geostatistical software.
En Fisher and Getis eds. Handbook of Applied Spatial analysis.:129-138. Springer.
- INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL MODELING (2008)
SADA: Spatial Analysis and Decision Assistance.
V.5. University of Tennessee
- ISAAKS, E.H AND R.M. SRIVASTAVA, 1989.
An introduction to Applied Geostatistics.
Oxford U. Press, 561 pp. New York .
- KINNICUTT P.G. AND H.H. EINSTEIN, 1996.
Incorporating uncertainty, objective and subjective data in geologic site characterization.
Proc. Uncertainty in the Geologic environment ASCE GT Sp Conf. 58, Vol 1:104-118.
- LIN Z. AND W. LIANG, 1982.
Engineering properties and zoning of loess and loess-like in China.
Can. Geot. J. 19:76-91.
- MURRAY CJ, H.J. LEE AND M.A. HAMPTON, 2002.
Geostatistical mapping of effluent-affected sediment distribution on the Palos Verdes shelf.
Continental Shelf Research. 22:881-897.
- PARSONS, R.L. AND J.D. FROST, 2002.
Evaluating site investigation quality using GIS and Geostatistics.
J. Geot. Geoenv. Engng. Vol 128: 451-461.
- QUINTANA CRESPO, E., 1991.
Sistema de evaluación geotécnica del terreno en áreas urbanas.
Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas VI: 189-201.
- REGINATTO, A., 1970.
Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba.
Memorias 2 R.A.M.S.I.F. Vol. 1. Córdoba.

- REGLI C., ROSENTHALER L, AND P. HUGGENBERGER, 2004.
GEOSSAV: a simulation tool for subsurface applications.
Computer and Geosciences, Vol 30: 221-238.
- ROCCA, R. J., 2002.
Cálculo del asentamiento por colapso en suelos loessicos de Córdoba.
Proc. XVI Congr.Arg. Mec. Suelos e Ing. Geotec. Trelew.:36-47.
- ROCCA, R.J., 2004.
Variaciones areales de la colapsibilidad en la ciudad de Córdoba.
XVI Congreso Arg. Mec.Suelos e Ing.Geot. Vol 1. Córdoba.
- ROCCA, R. J., 2005
Método simplificado para el cálculo del asentamiento por colapso en suelos loessicos de Córdoba.
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tomo 57: 137-146.
- ROCCA R.J., 2006.
Confiabilidad de las estimaciones de colapsibilidad de la ciudad de Córdoba.
XVIII CAMSIG. Vol I.: San Juan
- Rocca R.J. 2010.
Limitaciones de estimaciones y simulaciones de la colapsibilidad en suelos loessicos de Córdoba.
Rev. Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Vol.24: 63-72.
- ROCCA, R.J., E. QUINTANA CRESPO Y V. RINALDI, 1990.
Modelación geotécnica del subsuelo de la ciudad de Córdoba. As. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas V:121-130.
- ROCCA, R.J., E, QUINTANA CRESPO, M.G. GOIO Y E.G. ABRIL, 1996.
Fundamentos para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Córdoba.
Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas X: 237-355.
- ROCCA, R.J. AND E. QUINTANA CRESPO, 1999.
Geotechnical zonation of Cordoba city (Argentina) using cluster analysis.
Proc. XI PanAm. Cong. Soil Mech.Geot.Eng. Vol II: 659-666. Foz Iguazu. Brasil.
- ROCCA, R.J., E. QUINTANA CRESPO, M.G. GOIO Y E.G. ABRIL, 1995.
Carta geotécnica de la ciudad de Córdoba.
As.Arg.Geol.Apl.Ing. Pub.Esp. 3: 322-340.
- ROCCA R.J. Y TERZARIOL R.E. (2010)
La ponderación de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos de la ciudad de Córdoba.
XX CAMSIG. Mendoza. Vol.1: 129-136.