

Utilización de altimetría SRTM para la prescripción de fertilización nitrogenada variable del maíz en Córdoba (Argentina)

Hernández, C. M.^{1*}, Cerliani, C.¹; Naville, R.¹; Esposito, G.¹

¹Facultad de Agronomía y Veterinaria (Universidad Nacional de Río Cuarto)

*carlitoshernandez20@gmail.com: Ruta Nacional 36, km 601, 5800-Río Cuarto, Córdoba, Argentina; +54-358-467650

**Trabajo presentado al
Primer Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión
(CLAP2018)
11 al 13 de abril 2018
Santiago, Chile**

Resumen.

La región centro-sur de la provincia de Córdoba se caracteriza por presentar un paisaje ondulado. A través de la utilización de modelos digitales de elevación (MDE) es posible la estimación de atributos espaciales del terreno como por ejemplo el índice topográfico compuesto (CTI). Por este motivo, en esta región se desarrolló y calibró un modelo de recomendación de fertilización nitrogenada dependiente de la interacción entre el N, el CTI y la condición hídrica del año de acuerdo al pronóstico ENSO, el cual permite ajustar las dosis óptimas económicas de N (DOEN). Este modelo se denominó Modelo Econométrico Mixto Espacial (MEME). Sin embargo, para la obtención de atributos espaciales del terreno como el CTI, se requiere un relevamiento topográfico con Sistemas D-GPS. No obstante existe una gran disponibilidad de fuentes de altimetría provenientes de satélite que pueden ser utilizadas, p. ej. los datos del sensor SRTM. Los objetivos de este estudio fueron: I) Evaluar si los MDE/SRTM procesados a través de un filtrado (MDEfilt) son análogos a los MDE obtenidos con sistemas D-GPS, II) Evaluar si los mapas de CTI obtenidos a través de los MDEfilt son análogos a los obtenidos con sistemas D-GPS y III) Evaluar si las DOEN obtenidas a través del MEME utilizando datos de relevamientos D-GPS son análogas a las obtenidas por la utilización de MDEfilt. Para ello se realizaron relevamientos altimétricos D-GPS en cuatro lotes de producción. En cada relevamiento se determinó el MDE mediante una interpolación (MDE/DGPS). Los resultados indican que los MDE/DGPS presentaron un alto ajuste con los MDEfilt. Si bien la comparación entre CTI derivado de cada fuente disminuyó el ajuste, los valores del RMSE variaron entre 0.59 y 0.88 lo que significa un cambio bajo en términos relativos del CTI. La aplicación del modelo arrojó valores de DOEN de 91,55 kg.ha⁻¹ y 117 kg.ha⁻¹ para el año húmedo y de 1,3 kg.ha⁻¹ a 40,05 kg.ha⁻¹ para el año neutro. El MEME brindó ajustes aceptables para poder realizar mapas de prescripciones nitrogenadas en el cultivo de maíz constituyendo una fuente de información a la hora de realizar una recomendación de fertilizantes nitrogenados.

Palabras clave

SRTM, VRT, IGN, MDE, maíz, MEME, gaussiano, sitio-específico.

Introducción

La topografía es uno de los principales factores que determinan el rendimiento de los cultivos (Kravchenko & Bullock, 2000). En este sentido el paisaje del sudoeste de la provincia de Córdoba, se encuentra caracterizada por una toposecuencia de relieve ondulado, que determina un tipo de suelo predominante en cada sector. En este aspecto la topografía de los lotes de producción puede ser modelada a través de modelos digitales de elevación (MDE). Para ello existen diversas fuentes de datos de altimetría. Una de estas fuentes de datos son los sensores satelitales, los cuales pueden cubrir grandes superficies otorgando datos casi a escala mundial.

Los radares de apertura sintética (SAR) son un ejemplo de este tipo de sensores. Estos son ampliamente utilizados debido a que son muy sensibles a las variaciones topográficas del terreno. Los modelos provistos por estos son producidos por un sensor activo que emite ondas, las cuales chocan contra la superficie terrestre y son reflejadas nuevamente al sensor. En este sentido uno de los sensores más reconocidos estuvo enmarcado en el proyecto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM).

El proyecto SRTM constó de un radar de apertura sintética (SAR por su acrónimo en inglés) que tuvo como objetivo obtener un modelo digital de elevación a escala global de alta resolución y calidad uniforme. Los datos SAR fueron obtenidos durante 11 días durante febrero de 2000 por dos sistemas de radar, la banda C y la banda X ambos ubicados en el transbordador Endeavour. En el caso de la República Argentina, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) realizó una serie de procesamientos y correcciones de los modelos SRTM brindados por la NASA y los puso a disposición del público en forma libre y gratuita a través de su sitio en internet a través del proyecto *MDE-ar*. Algunas de las correcciones aplicadas fueron, el rellenado de vacíos, la inclusión de lagos, un filtrado espacial y enmascarado de límites (IGN, 2016a).

En virtud de ello es importante contar con fuentes de información que permitan cuantificar la distribución espacial de las elevaciones, las cuales ayudan a conocer mejor la variabilidad del paisaje. Uno de los usos más importantes de este tipo de datos es la obtención de atributos espaciales del terreno (AET). Schmidt y Persson (2003) encontraron en paisajes ondulados que AET como el Índice topográfico compuesto (CTI) se encuentra altamente correlacionado con la humedad del suelo.

La elevada variabilidad espacio-temporal existente en la provincia de Córdoba en la producción de maíz, provocada fundamentalmente por una distribución hídrica diferencial en los lotes de producción, implica la necesidad de utilizar modelos de diagnóstico de fertilización variable que incorporen atributos espaciales del terreno como el CTI de forma tal que permitan conocer que ambientes del lote de producción tendrán mayor captación hídrica. Investigadores como Kumhálová et al., (2011) encontraron que existe una relación significativa entre el rendimiento y la concentración de nutrientes de los cultivos con la topografía, identificando además que, la correlación entre el CTI y el rendimiento fue afectada por las características hídricas de cada campaña.

En base a lo anterior, Espósito (2013) desarrolló para la región centro sur de la provincia de Córdoba un Modelo Econométrico Mixto Espacial (MEME) para la dosificación variable de nitrógeno (DVN) a escala sitio-específica teniendo en cuenta el CTI como principal atributo del relieve junto con las perspectivas climáticas del fenómeno ENSO.

El uso de MDE provenientes de sensores satelitales para establecer atributos de terreno que se relacionen con la respuesta sitio específica del N en maíz, no ha sido una metodología muy estudiada hasta el momento, razón por la cual los resultados encontrados en este trabajo resultan promisorios para la recomendación sitio específica de la dosis de fertilización nitrogenada del maíz según la oferta hídrica de la campaña.

El objetivo de este trabajo es evaluar el uso de MDE IGN provenientes del sensor SRTM como fuente de datos de entrada para el uso de MEME como modelo de recomendación de fertilización nitrogenada en maíz en un área del centro-sur de la provincia de Córdoba.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica al sudoeste de la provincia de Córdoba (-31.883998; -63.728532 y -33.637251; -64.951155). En el área de estudio se seleccionaron cuatro lotes de producción, donde se realizó un relevamiento altimétrico con sistemas D-GPS. Los datos obtenidos de estos relevamientos fueron utilizados como datos de elevación de referencia.

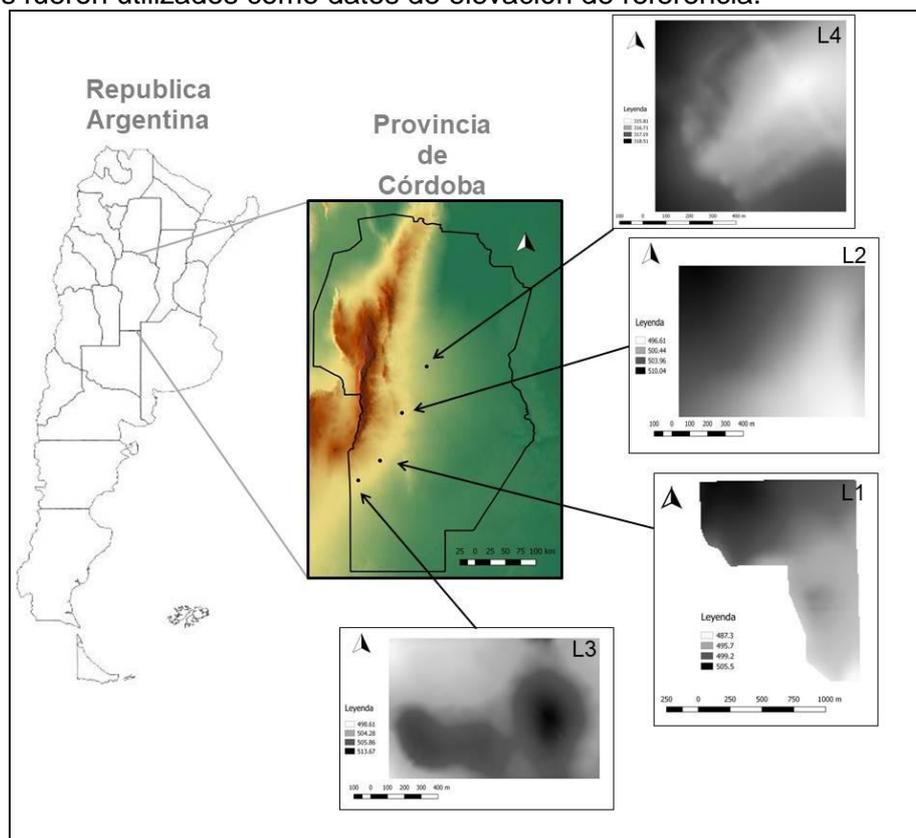


Figura 1. Distribución espacial de los experimentos en el área sudoeste de la Provincia de Córdoba, Argentina.

Utilizando los datos obtenidos a través de los relevamientos y a través de la herramienta Thin Plate Spline (TPS) del software SAGA-GIS (Conrad et al., 2015) se obtuvieron MDE (MDE/DGPS). La elección de esta técnica de interpolación se encuentra relacionada con la capacidad de realizar interpolaciones que suavizan la superficie de los MDE no afectando significativamente los datos de elevación. En este sentido diversos autores han reconocido a TPS como un método efectivo y preciso para interpolar datos espaciales (Chen & Li, 2012; Erdogan, 2009; Wahba, 1990).

Los MDE del sensor SRTM del área de estudio fueron obtenidos desde el sitio del IGN (IGN, 2016a) (MDE SRTM IGN). Si bien esta fuente de datos presenta como ventaja la apertura al público en forma libre y gratuita, estos datos pueden estar sujetos a diferentes fuentes de error. Estas distorsiones a su vez pueden influir en los diferentes productos derivados de los MDE, como pueden ser la pendiente, el índice topográfico compuesto (CTI), el área de cuenca específica, los canales de drenaje, entre otros (Stevenson et al., 2010), por lo que es necesario recurrir a diferentes procesos para poder minimizar el efecto de estas distorsiones. Los MDE provistos por el IGN recibieron una serie de correcciones antes de ser dispuestos al público.

Algunas de las correcciones aplicadas fueron, el rellenado de vacíos, la inclusión de lagos, un filtrado espacial y enmascarado de límites (IGN, 2016b).

Cuando el ruido presente es de alta frecuencia, algunos autores recomiendan el uso de filtros pasabajos para poder mejorar la precisión vertical de los MDE (Domingos et al., 2014). Este tipo de filtros tiene como objetivo eliminar las fluctuaciones locales de pequeñas dimensiones que le confieren una apariencia rugosa a la superficie (Domingos et al., 2017). Uno de los filtros más difundidos es el gaussiano. El filtro gaussiano es un operador convolucional de dos dimensiones usado para mejorar la información de baja frecuencia y remover el ruido de alta frecuencia. Este a su vez produce un suavizado de la superficie del MDE (Milledge et al., 2009). El grado de suavizado característico de este filtro está definido por dos parámetros: a) el desvío estándar y b) el radio. En una serie de aproximaciones sucesivas se evaluaron un rango de 0 a 100 para cada uno de los parámetros. Un análisis visual permitió que se escogieran valores de desvío estándar = 80 y de radio = 40 como parámetros óptimos. A través de la herramienta Filtro gaussiano del paquete SAGA-GIS incluido en el Software QGIS v2.16. (QGIS Development, 2016) se aplicó este filtro con los parámetros descritos para los sitios seleccionados.

El remuestreo de un MDE de baja resolución para la obtención de uno de mayor resolución es un proceso que debe realizarse cautelosamente debido a que pueden derivar en algunas inconsistencias desde el punto de vista teórico (Domingos et al., 2014). Sin embargo en esta situación es necesario aumentar la resolución a una escala que permita un ancho de trabajo correcto para la maquinaria utilizada en la zona, en este caso de 9 m x 9 m.

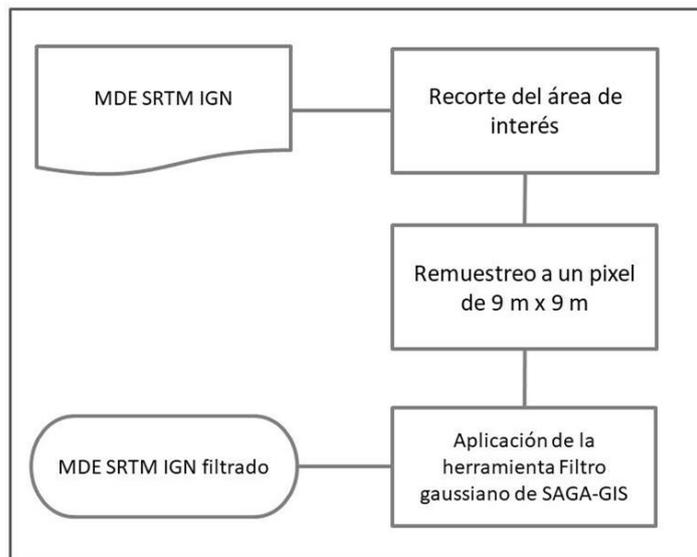


Figura 2. Flujo ordenado de procesos para filtrar rugosidades en MDE SRTM IGN

Para la obtención de la dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN) a través del criterio MEME es necesario contar con un mapa de CTI. Utilizando los MDE/DGPS obtenidos mediante el relevamiento de precisión y los MDE SRTM IGN filtrados (MDEfilt) se realizó el cálculo de CTI utilizando la expresión publicada según Beven & Kirkby, (1979) utilizando la ecuación (1).

$$CTI = \ln\left(\frac{SCA}{\tan(SLP)}\right) \quad (1)$$

Donde SCA es el área de cuenca específica y SLP es la pendiente de la cuenca.

El CTI es un índice topográfico asociado al flujo superficial del agua ante eventos de precipitación, el cual está altamente correlacionado con la humedad del suelo en paisajes ondulados (Schmidt & Persson, 2003). En este sentido Espósito et al., (2012) encontraron que a mayores valores de CTI, los rendimientos de maíz aumentaban. Este efecto puede atribuirse a

que los sitios con mayor CTI son sectores de mayor acumulación hídrica en la toposecuencia. Similares resultados fueron encontrados por Ruffo et al., (2006) en Illinois (EEUU).

El MEME es un modelo de recomendación que requiere el conocimiento del pronóstico ENSO que se libera a partir del mes de agosto para conocer las perspectivas climáticas de la campaña. Siguiendo este criterio los años pueden ser clasificados en años secos, húmedos o neutros según el año sea Niña, Niño o Neutro respectivamente. Este modelo también requiere el conocimiento del precio del maíz a cosecha y el precio del fertilizante nitrogenado en forma de nitrógeno elemental. De esta manera se construye la relación de precios presente en el modelo. A los efectos de esta publicación y para evitar las variaciones de precios coyunturales se utilizó una relación de precios modales para el Sur de Córdoba de 7,76 utilizada por Espósito (2013).

El procedimiento de dosificación del modelo MEME determina una ecuación de cálculo de dosis para cada año según su condición hídrica. A través de la calculadora raster presente en el software QGIS 2.16 (QGIS Development, 2016) y la implementación de las ecuaciones (2), (3) y (4) teniendo en cuenta la condición hídrica del año, se determinaron los mapas de DOEN en kg.ha^{-1} .

SI Año = Húmedo.

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - 25.04 + 0.49CTI}{2 \times -0.06} \quad (2)$$

SI Año = Neutro.

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - 15.95 + 0.6273CTI}{2 \times -0.0506} \quad (3)$$

SI Año = Seco

$$DOEN = \frac{\left(\frac{\rho N}{\rho M}\right) - 3.18 - 0.27CTI}{2 \times -0.02} \quad (4)$$

Donde ρN representa el precio del fertilizante en forma de nitrógeno elemental, ρM representa el precio del maíz al momento de la cosecha. El cociente $(\rho N/\rho M)$ representa la relación de precios.

Para poder evaluar el comportamiento del modelo en tres campañas contrastantes en términos de aportes hídricos se aplicó el modelo para un año húmedo, un año neutro y un año seco, en cada uno de los experimentos.

Para evaluar la precisión vertical de los MDE, de los mapas de CTI y de los mapas de DOEN se tomaron entre 120 y 170 puntos de referencia y se compararon los MDE/DGPS y los MDEfilt. Para el análisis se utilizaron tres estadísticos diferentes descritos por Reuter et al., (2009) como los más comúnmente utilizados, siendo estos la raíz cuadrada del error medio (RMSE) (Ecuación 5), el error aritmético medio (EAM) (Ecuación 6) y el desvío estándar del error (DSE) (Ecuación 7), siendo el error la diferencia entre el dato de MDE/DGPS y el dato del mapa estimado a través de MDEfilt. También se calculó el coeficiente de determinación (R^2).

$$RMSE = \sqrt{\left[n^{-1} \sum_{i=-1}^n (Z_{precisión} - Z_{filtrado})^2 \right]} \quad (5)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{precisión} - Z_{filtrado})}{n} \quad (6)$$

$$DSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z_{precisión} - Z_{filtrado}) - ME]^2}{n-1}} \quad (7)$$

Donde $Z_{precisión}$ es la elevación en la capa obtenida a través de un MDE/DGPS y $Z_{filtrado}$ es la elevación del MDEfilt.

Resultados

Los resultados obtenidos mostraron un alto ajuste entre el MDE/DGPS y el MDEfilt. De acuerdo a lo esperado y a lo encontrado por Milledge et al., (2009) el proceso de filtrado gaussiano suavizó el MDEfilt eliminando las rugosidades del modelo original. En este sentido es necesario el procesamiento de los MDE derivados de SAR ya que de acuerdo a lo indicado por Lencinas & Diaz, (2011) los errores en estos MDE se encuentran espacialmente asociados con la rugosidad del relieve.

Si bien algunos autores han encontrado valores más bajos de RMSE para las pendientes de los experimentos (Shortridge & Messina, 2011), el desvío estándar de los errores varía entre 0,32 m y 1,23 para los experimentos seleccionados, menor a lo expresado por IGN, (2016a) para los MDE SRTM IGN de la provincia de Córdoba. Shortridge & Messina (2011) encontraron que diversos MDE provenientes de SRTM sobrestiman la altura. Sin embargo en los cuatro experimentos seleccionados en esta publicación, los MDE/DGPS tuvieron una elevación mayor que los MDEfilt. Esto se puede observar en la tabla 1 a través del EAM.

Tabla 1. Parámetros estadísticos de ajuste entre los MDE/DGPS y los MDEfilt.

Sitios	R ²	RMSE	EAM	DSE
L1	0.93	26.44	-26.41	1.23
L2	0.98	9.65	-9.61	0.89
L3	0.92	20.6	-20.58	0.9
L4	0.8	27.02	-27.02	0.32

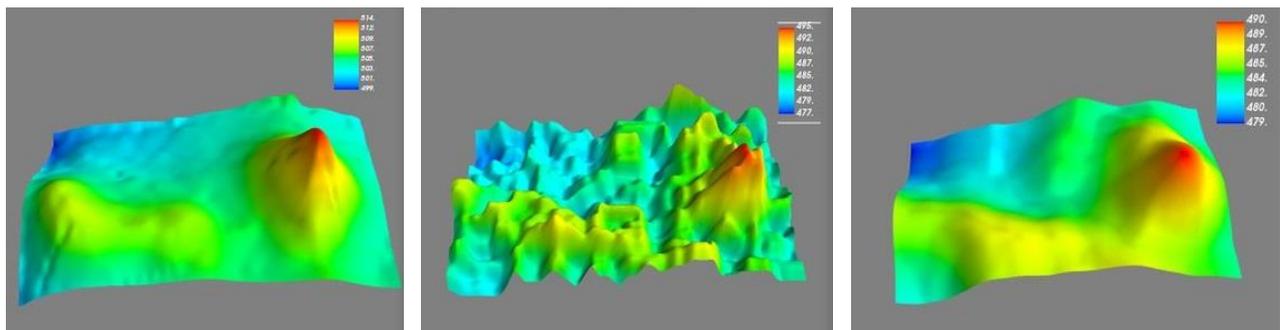


Figura 3. Comparación entre MDE/DGPS (Izquierda), el MDE SRTM IGN sin filtrar (Centro) y el MDEfilt (Derecha).

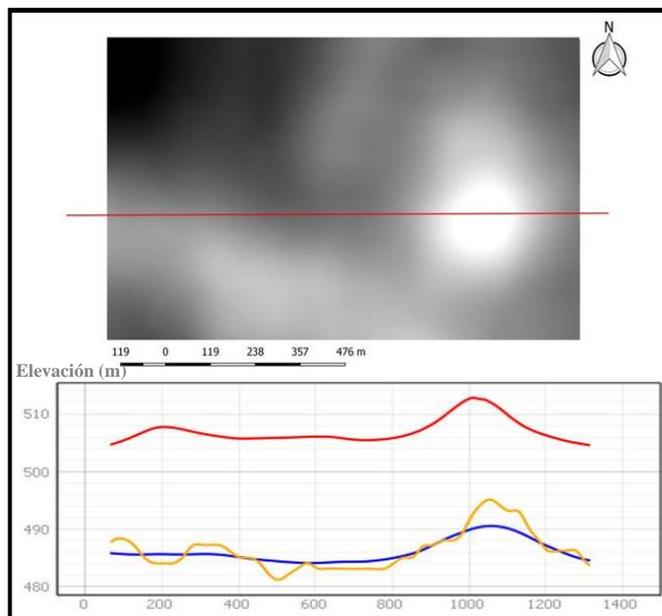


Figura 4. Transecta sobre uno de los MDE (Línea roja sobre MDE obtenido con DGPS). Las líneas en el gráfico muestran el MDE/DGPS (Línea Roja), el MDE SRTM IGN sin filtrar (Anaranjado) y el MDEfilt (Azul).

Según lo expuesto por diversos autores, estas discrepancias entre la elevación de MDE/DGPS y la elevación expresada por los MDEfilt se encuentran asociadas fundamentalmente al ángulo de incidencia local (Ludwig & Schneider, 2006), al grado y dirección de las pendientes (Zielinski & Chmiel, 2007) , áreas montañosas (Díaz et al., 2010) y a la presencia de vegetación arbórea en el área de estudio (Shortridge & Messina, 2011). Al igual que lo expuesto por Galvan et al., (s.f) la presencia de vegetación en el área de los experimentos es escasa por lo que no se puede atribuir los errores a esta causa.

El CTI obtenido a través de MDEfilt muestra una disminución en el ajuste del coeficiente de determinación en comparación con los ajustes obtenidos en la evaluación de elevaciones de los MDE. Esto puede deberse a que pequeños cambios en la distribución vertical de alturas en un MDE producen cambios mayores en los productos topográficos derivados como el CTI. Sin embargo los valores del RMSE varían entre 0.59 y 0.88 lo que significa un cambio muy bajo en términos relativos del CTI. Si bien las diferencias de elevaciones entre los modelos de referencia y los modelos filtrados son considerables, estas no tienen implicancias en el cálculo del CTI, ya que este considera la diferencia en los valores de los pixeles vecinos y no los valores de elevación en términos absolutos.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de comparación entre mapas de CTI derivados de MDE de referencia y un MDE SRTM IGN

Sitios	R ²	RMSE	EAM	DSE
L1	0.67	0.88	0.32	0.82
L2	0.69	0.59	0.35	0.47
L3	0.71	0.81	0.43	0.68
L4	0.59	0.84	0.41	0.73

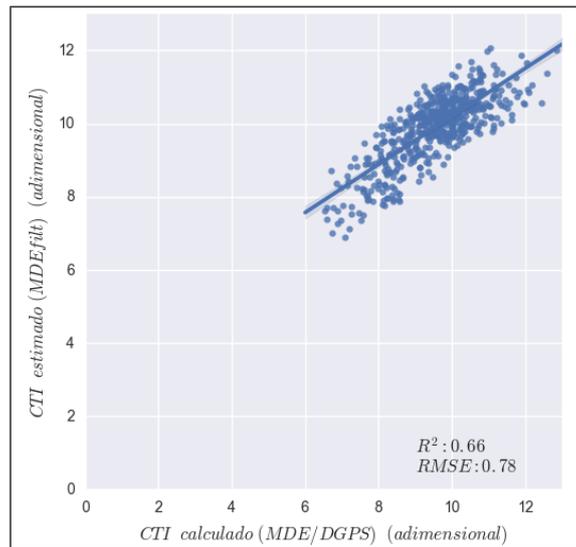


Grafico 1. Diagrama de dispersión de valores de CTI calculado entre los datos del MDE/DGPS y el MDEfit.

La aplicación del modelo en los cuatro experimentos arrojó valores de dosis de fertilizante nitrogenado de entre 91,55 kg.ha⁻¹ y 117 kg.ha⁻¹ para el año húmedo y de 1,3 kg.ha⁻¹ a 40,05 kg.ha⁻¹ para el año neutro. Para el año seco el modelo recomendó no aplicar fertilizante nitrogenado. Esto concuerda con lo expuesto por varios autores donde en años secos la dosis de fertilizante era nula en todo el experimento y solo se recomendaba en áreas bajas donde el CTI tenía valores demasiado elevados y podría existir una cantidad determinada de humedad del suelo necesaria para aprovechar el fertilizante (Balboa, 2014). Por su parte Espósito (2013) plantea que en años secos, la respuesta en rendimiento al agregado de N es baja o nula, mientras que en años húmedos se obtienen las mayores producciones por fertilización nitrogenada.

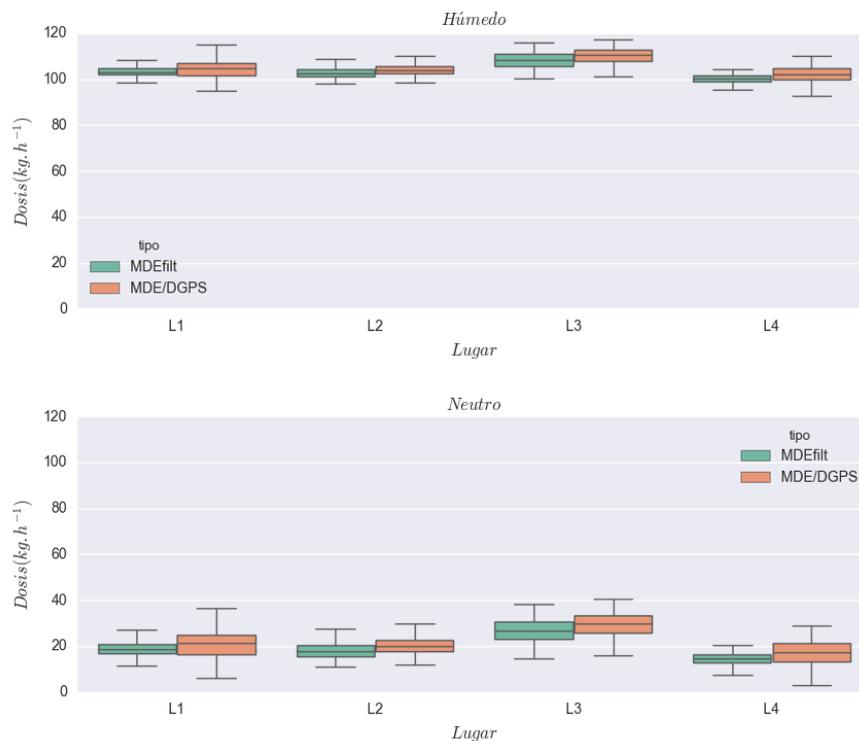


Grafico 2. Diagrama de cajas de las dosis de nitrógeno recomendadas por MEME en un año húmedo y uno neutro para los cuatro experimentos comparando según el tipo de dato de entrada al modelo.

Tabla 3. Parámetros estadísticos de ajuste para las DOEN obtenidas a través de mapas de CTI derivados de MDE/DGPS y el MDEFilt.

Año	Experimento	R ²	RMSE (kg.ha ⁻¹)	EAM (kg.ha ⁻¹)	DSE (kg.ha ⁻¹)
Húmedo	L1	0.66	3.38	-1.06	3.21
	L2	0.69	2.44	-1.46	1.92
	L3	0.71	3.31	1,79	2.78
	L4	0.60	3.44	1.68	3
Neutro	L1	0.66	5.14	1.611	4.88
	L2	0.69	3.7	2.22	2.96
	L3	0.71	5.03	-2.72	4.23
	L4	0.60	5.23	2.55	4.56

En relación a lo expuesto en el gráfico 2, la utilización del MDEFilt subestimó la dosis nitrogenada en los cuatro experimentos en 1,49 kg ha⁻¹ para el año húmedo y en 5,28 kg ha⁻¹ para el año neutro en términos medios en comparación con la utilización del MDE de referencia. Una mayor diferencia entre la aplicación de un MDE u otro estuvo a favor de los años considerados neutros. Esto determina en cada MDE que por cada punto de aumento en el valor de CTI la dosis se reduce en 4,09 kg ha⁻¹ para el año húmedo y 6,20 kg ha⁻¹ para el año considerado neutro.

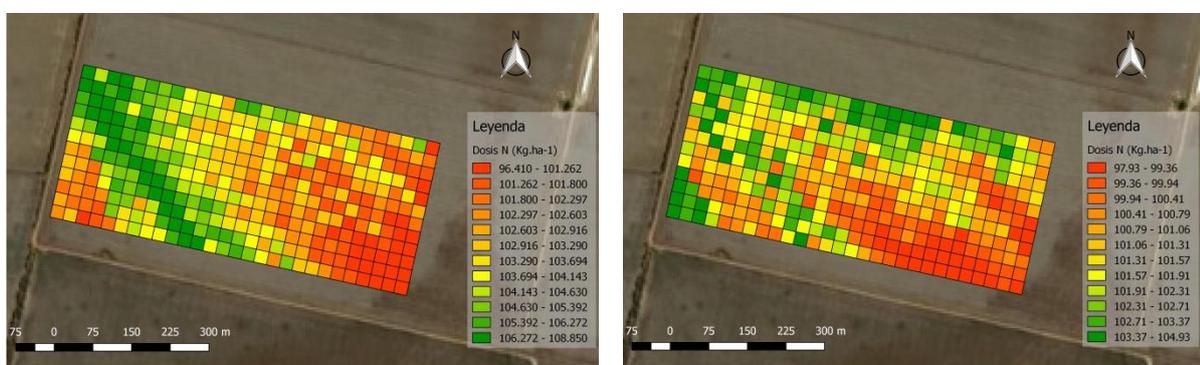


Figura 5. Mapa de prescripción para un año húmedo a través de un MDE/DGPS (Derecha) y un MDE SRTM IGN filtrado (Izquierda)

Conclusión

La utilización de MDE como fuente de datos de elevación generados por el sensor SRTM provistos por un instituto público nacional en forma gratuita y libre para el territorio de Argentina admite ser una gran alternativa. Sin embargo la precisión de esta fuente de datos puede variar y estar reducida en distintas áreas por diversos errores. La presencia de estos errores hace necesario un procesamiento casi obligatorio de los MDE derivados de SAR para poder aumentar la precisión de los MDE. La presencia de rugosidad en la superficie ocasionada por diversos factores puede ser mejorada a través de un suavizado de la superficie del MDE. Este resultado se puede lograr a través de la implementación de un filtro gaussiano. Este tipo de filtros crea un suavizado minimizando las asperezas de la superficie. El análisis visual y analítico de los MDE a través de diferentes parámetros estadísticos indicó la eficacia de los procesamientos aplicados. Esto es importante ya que de mantenerse los errores, estos se pueden propagar y magnificar en los parámetros topográficos derivados de los MDE, perdiendo precisión en índices topográficos como el CTI.

La utilización de este tipo de índices permitió conocer que sectores de un área de determinada tendrán mayor captación de agua y cuales tendrán una mayor evacuación de las precipitaciones, por lo que tendrán una oferta hídrica diferencial. La importancia del beneficio de este índice reside en considerar las fuentes de aporte hídrico como las precipitaciones, el aporte subterráneo y el aporte superficial como las principales fuentes de agua para los cultivos.

En este sentido la frecuencia de las precipitaciones pueden ser estimadas de acuerdo al pronóstico ENSO liberado en el mes de agosto permitiendo realizar una planificación del cultivo de maíz de una forma más deliberada. Esto presenta una gran importancia ya que en éste, uno

de los manejos agronómicos más importantes a planificar es la fertilización nitrogenada, debido a que este nutriente es uno de los más importantes para el crecimiento y el desarrollo del mismo. En base a lo anterior, la utilización de modelos que tengan en cuenta tanto la condición hídrica como la posición topográfica ubicada en el terreno son muy importantes para la recomendación y la eficiencia con que se capte el fertilizante aplicado. El modelo MEME cumple con estas características. En el área de estudio arrojó ajustes aceptables para poder realizar mapas de prescripciones nitrogenadas en el cultivo de maíz constituyendo una fuente de información a la hora de realizar una recomendación de fertilizantes nitrogenados.

Bibliografía

- Balboa, G. (2014). *Comparación agronómica de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba*. (Tesis de maestría). Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina”
- Beven, K., & Kirkby, M. (1979). A physically-based variable contributing area model of basin. *Hydrol. Sci. Bull.*, (24), 43–49.
- Chen, C., & Li, Y. (2012). A robust method of thin plate spline and its application to DEM construction. *Computers and Geosciences*, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.018>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., ... Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Díaz, G. M., Gómez, M. F., Deccechis, F., Lencinas, J. D., & del Valle, H. F. (2010). Evaluación de los Modelos Digitales de elevación SRTM-C / X y ASTER GDEM y su relación con los errores planimétricos de datos pancromáticos QuickBird ortorrectificados. *XIV Simposio Internacional SELPER*.
- Domingos, D., Ricardo, E., & Sauleda, E. (2014). Modelo digital de elevaciones de una zona urbana para la simulación hidrológica. *ING. HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, XXXV(2), 123–137.
- Domingos, D., Ricardo, E., & Sauleda, E. (2017). Análisis de Fourier para mejorar un MDE destinado a simulaciones hidrológicas e hidráulicas. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, XXXVIII(3), 65–77.
- Erdogan, S. (2009). A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, <https://doi.org/10.1002/esp>
- Espósito, G. P. (2013). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto (MEME)*. (Tesis Doctoral) Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Espósito, G., Robledo, W., Bongiovanni, R., Ruffo, M., & Balboa, G. (2012). Dosificación variable de nitrógeno en maíz según el índice topográfico compuesto. In proceedings XIX Congreso Latinoamericano - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: “Latinoamérica unida protegiendo a sus suelos”. Mar del Plata, Argentina. AACCS-SLCS.
- Galvan, M. J., Bonzano, C. A., & Mas, G. E. (s.f.). COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN OBTENIDOS A PARTIR DE IMÁGENES DE RADAR SRTM Y CARTAS TOPOGRÁFICAS DEL IGN. http://www.isnsc.com.ar/assets/eje_09_05_galvan_bonzano_mas_comparacion_entre_modelos_digitales_de_elevacion_obtenidos_a_partir_de_imagenes_de_radar_stm.pdf
- IGN. (2016a). MDE-Ar. *Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina*. <http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Introduccion>
- Kravchenko, A. N., & Bullock, D. G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, doi:10.2134/agronj2000.92175x.
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., & Matějková, Š. (2011). The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9221-x>

- Lencinas, J. D., & Diaz, G. M. (2011). Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM- C/X y ASTER GDEM. *Geo Focusfocus*, 11, 431–454.
- Ludwig, R., & Schneider, P. (2006). Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5), <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.05.003>
- Milledge, D. G., Lane, S. N., & Warburton, J. (2009). The potential of digital filtering of generic topographic data for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(May 2008), 155–161. <https://doi.org/10.1002/esp>
- QGIS v2.16.1 Nodebo, Development Team (2016). QGIS Geographic Information System. Essen, Germany.
- Reuter, H. I., Hengl, T., Gessler, P., & Soille, P. (2009). Preparation of DEMs for geomorpometric analysis. *Developments in Soil Science*, [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00004-4).
- Ruffo, M. L., Bollero, G. A., Bullock, D. S., & Bullock, D. G. (2006). Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agriculture*, <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9016-7>
- Schmidt, F., & Persson, A. (2003). Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture*, <https://doi.org/10.1023/A:1024509322709>
- Shortridge, A., & Messina, J. (2011). Spatial structure and landscape associations of SRTM error. *Remote Sensing of Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.017>
- Stevenson, J. A., Sun, X., & Mitchell, N. C. (2010). Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm. *Geomorphology*, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.006>
- Wahba, G. (1990). *Spline models for observational data*. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin
- Zielinski, R., & Chmiel, J. (2007). Vertical accuracy assessment of SRTM C-band DEM data for different terrain characteristics. *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, <https://doi.org/isbn:978-90-5966-053-3>