

Generación de prescripciones de densidad variable a escala de lote en el sur de la provincia de Córdoba (Argentina)

Cerliani Cecilia; Esposito Gabriel; Morla Federico; Naville Rafael

Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional N°36 km 601. Río Cuarto. Córdoba. Argentina.

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

Resumen.

Una de las principales prácticas de manejo que influyen sobre el rendimiento del maíz es la selección de la densidad de siembra, ya que el rendimiento es dependiente de la misma. Esta dependencia está dada por la existencia de una estrecha relación entre el número de granos por planta (NGP) y la tasa de crecimiento individual ($TCP - g\ p^{-1}\ d^{-1}$) durante el periodo crítico de definición del rendimiento (± 15 días de R1). Debido a que la TCP depende de la disponibilidad de recursos y que estos varían espacialmente dentro de un mismo lote de producción, resulta fundamental desarrollar modelos de prescripción de densidad variable. Para lograr este objetivo se llevaron a cabo seis ensayos experimentales, durante la campaña 2013/14 en la región sur de la provincia de Córdoba (Argentina), empleando el híbrido DK 7210 VT3P, a partir de estos ensayos se determinó la relación (de tipo inversa) entre NGP y TCP en distintas condiciones ambientales, encontrándose que la misma no fue modificada al variar las condiciones ambientales, y que modificaciones en estas condiciones solo generaron cambios en la TCP. Además, se encontró que en el rango de densidades óptimas la TCP y NGP se mantuvieron en un rango estrecho, lo cual permite suponer que cuando la densidad de plantas es óptima la productividad individual se mantiene constante independientemente de las condiciones ambientales. Posteriormente con otros ensayos realizados durante la campaña 2015/16 y 2016/17 en la misma región y con el mismo genotipo, se determinó la productividad individual cuando la densidad de siembra estuviera en el rango del óptimo, encontrándose que esta variable no se modificó. A partir de esta información sería posible ajustar la densidad óptima de siembra a través de la estimación del rendimiento esperado. Finalmente, se generaron prescripciones de siembra variable a partir de mapas de rendimiento de campañas anteriores, agrupándolos según la condición hídrica del año (húmedo/seco) y estimando el rendimiento de cada fracción de lote para cada condición hídrica. Así, se obtuvieron mapas de densidad de siembra variable dependientes de la estimación del rendimiento posible de alcanzar y del genotipo según la condición de año.

Palabras clave. Maíz; Zonas de manejo; Densidad Óptima Agronómica

Introducción

El maíz es uno de los cultivos más importantes de Argentina, siendo el segundo de mayor producción a nivel nacional y el primero a nivel local en la región de Río Cuarto (Ministerio Agroindustria Argentina, 2018). Actualmente la brecha de rendimiento entre el rendimiento potencial (18644 kg ha^{-1}) y la media obtenida por los productores (5788 kg ha^{-1}) es de 12856 kg ha^{-1} (Esposito *et al.*, 2016). Si bien dicha brecha se explica en gran medida por la oferta hídrica, estos autores resaltan distintos aspectos de manejo que influyen sobre la misma destacando el rol de la correcta elección de la densidad de siembra.

Esta práctica es fundamental debido al efecto que tiene sobre el crecimiento y partición de la materia seca en la planta y por lo tanto sobre el rendimiento (Andrade *et al.*, 1996). La respuesta del maíz a la densidad de plantas es de tipo óptimo, existiendo por lo tanto un valor de densidad donde el rendimiento en grano es máximo, dicho valor se conoce como Densidad Óptima Agronómica (DOA) (Sarlungue *et al.*, 2007; Tollenar y Lee, 2011; Hernandez *et al.*, 2014).

Este tipo de respuesta está dado por la estrecha relación entre el número de granos por planta (NGP) y la tasa de crecimiento individual ($\text{TCP} - \text{g p}^{-1} \text{ d}^{-1}$) durante el periodo crítico de definición del rendimiento que se encuentra centrado en la floración (± 15 días de R1) (Andrade *et al.*, 1999).

Esta relación, de tipo inversa, depende del genotipo utilizado y se caracteriza por presentar un valor umbral de TCP por debajo del cual la planta no produce granos y valores de TCP por encima de los cuales aumentos en las mismas no implican aumentos del número de granos (Andrade *et al.*, 1999).

Por lo tanto es necesario ajustar la DOA para cada genotipo según la disponibilidad de recursos disponibles, debido a que en densidades muy altas la competencia intraespecífica hace que disminuya la disponibilidad de recursos por planta y por ende la TCP, llegando a valores menores que el valor umbral para la producción de granos, quedando la planta estéril. En caso contrario, cuando la densidad es muy baja, la TCP es alta, pero, debido a limitaciones morfogénicas del maíz, la falta de plantas no es compensada por una mayor producción individual (Andrade *et al.*, 1999; Sarlungue *et al.*, 2007).

La región Sur de Córdoba (Argentina) se caracteriza por presentar una elevada variabilidad y heterogeneidad tanto espacial como temporal (Esposito, 2013); si bien las propiedades del suelo varían a pequeña escala, pueden encontrarse dentro de un lote zonas con características homogéneas las cuales se denominan "Zonas de Manejo", y se definen como zonas dentro de un lote que poseen una combinación homogénea de los factores limitantes del rendimiento y para la cual una única dosificación de insumo sería adecuada (Schepers *et al.*, 2004; Vrindts *et al.*, 2005; Moral *et al.*, 2010).

Por lo tanto, al variar la disponibilidad de recursos entre zonas, resulta fundamental adecuar la densidad de plantas según los recursos disponibles en cada zona de manejo. Así, al mejorar la disponibilidad de recursos se debería aumentar la cantidad de individuos para mantener la TCP constante en su punto óptimo de producción. Esto hace que ambientes con más recursos soporten una mayor densidad y viceversa (Al-Kaisi y Yin 2003; Bragachini *et al.*, 2012; Horbe *et al.*, 2013). Varios autores han demostrado que la DOA varía al cambiar de ambientes, aún dentro de un mismo lote (Shanahan *et al.*, 2004; Horbe *et al.*, 2013). La DOA se modifica con las condiciones ambientales y por lo tanto es necesario decidir la densidad en cada condición ambiental. Además, puede variar entre genotipos aún para similares condiciones ambientales (Sarlungue *et al.*, 2007).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue generar un modelo de prescripción de siembra variable para un genotipo de maíz de amplia utilización en la región Sur de Córdoba Argentina.

Materiales y Métodos

Se llevaron a cabo 13 experimentos en la región sur de la provincia de Córdoba (Argentina), durante la campaña 2013/14; 2015/16 y 2016/17, utilizando el genotipo DK 7210 VT3P de amplia utilización en la zona.

En cada experimento se sembraron 5 densidades de siembra (30000 a 150000 semillas ha⁻¹), en las cuales se determinó la TCP, para ello se midió la producción de Materia Seca en los estadios fenológicos de V13 y R3 (Ritchie y Hanway, 1982), coincidente con el periodo crítico del cultivo de maíz, la TCP se estimó según la ecuación I, propuesta por Andrade *et al.* (1999).

$$TCP = (MS R3 - MS V13)/DP \quad (I)$$

Donde: TCP= tasa de crecimiento por planta (g p⁻¹ d⁻¹). MS V13 = materia seca (g) en el estadio V13. MS R3 = materia seca (g) en R3. DP = duración en días del periodo comprendido entre V13 y R3.

A madurez de cosecha se evaluó el rendimiento y sus componentes mediante cosecha manual, en los ensayos de la campaña 2013/14. Se tomaron 4 muestras por tratamiento y repetición. En cada muestra se determinó la densidad de plantas a cosecha y se recolectaron todas las espigas que se encontraron en 5 metros lineales de los surcos centrales de cada parcela. Posteriormente se desgranaron mecánicamente y se pesó la muestra. En ese mismo momento se determinó el peso de granos, para lo cual se pesaron dos muestras de 500 granos cada una por tratamiento y repetición. El número de granos se determinó en base al peso de 1000 granos y el rendimiento según lo propuesto por Andrade *et al.* (1999).

En los ensayos de las campañas 2015/16 y 2016/17, la cosecha se realizó de manera mecánica con maquina equipada con monitor de rendimiento y gps para georreferenciación de los datos. Posteriormente los datos se analizaron mediante modelos generales con correlación espacial utilizando el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

El diseño empleado fue en bloques al azar con 4 repeticiones espaciales por tratamiento.

Determinación de la DOA

La DOA, se determinó como la primera derivada de la función de rendimiento del maíz con relación a la densidad de plantas y posteriormente se igualo a 0 y se despejo densidad, según se indica en la ecuación II (Sarlungue *et al.*, 2007).

$$DOA = -b/2a \quad (II)$$

Donde: DOA =densidad óptima de plantas (p ha⁻¹). a y b = parámetros del modelo

Relación entre TCP y NGP

La relación entre NGP y TCP, se estimó mediante el ajuste de la función propuesta por Andrade *et al.*, (1999):

$$NGP = a - \frac{b}{TCP} \quad (III)$$

Donde: a y b = parámetros determinados mediante regresión no lineal. NGP = números de granos por plantas. TCP=Tasa de crecimiento por planta en el periodo crítico de definición del rendimiento para maíz (g d⁻¹).

Relación entre TCP y D

Para estimar esta relación se ajustó una función exponencial (Ecuación IV).

$$TCP (g d^{-1}) = a Exp^{-bD} \quad (IV)$$

Donde: TCP= Tasa de crecimiento por planta ($g\ d^{-1}$). a y b= parámetros del modelo. D = densidad de plantas a cosecha.

A partir de la DOA obtenida y la ecuación II se obtuvo el valor de TCP correspondiente con la DOA. Posteriormente a través de la Ecuación I y el valor de TCP se estimó el número de granos por planta correspondiente con la DOA.

Rendimiento individual en DOA

El rendimiento individual se estimó a partir de ensayos realizados durante la campaña 2015/16 y 2016/17, empleando el mismo genotipo. Para ello se empleó la ecuación V

$$Rto\ Ind = \frac{Rto}{DOA} \quad (V)$$

Donde: Rto ind= gramos de grano producido por planta ($g\ pl^{-1}$). Rto= Rendimiento de la densidad Optima Agronomica ($g\ ha^{-1}$). DOA=Densidad Optima Agronomica ($semilla\ ha^{-1}$).

Obtención de mapas variables

Delimitación de las zonas de manejo:

La delimitación de zonas de manejo se realizó en base a mapas de rendimiento de campañas previas (ya sean de maíz o soja), los cuales fueron previamente analizados con el programa Quantum Gis Wien 2.18.3 (Quantum GIS Development Team, 2017). Dicho procesamiento consistió, en una primera instancia, en la limpieza del mapa de rendimiento del lote completo, esto es, la eliminación de aquellos datos que por diferentes motivos generan una distorsión de los datos recolectados, es decir, que son inconsistentes o incoherentes con la realidad (Bongiovanni *et al.*, 2006). Luego, se analizó el mapa resultante a través del software "Management Zone Analyst (MZA)" (Mizzou-ARS, 2000) para obtener las zonas de manejo (ZM).

Rendimiento Objetivo según año

Para determinar el rendimiento objetivo se utilizaron mapas de rendimientos de campañas anteriores, los mismos se estandarizaron, se clasificaron y agruparon de acuerdo a las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo.

Así se agruparon en *años húmedos* cuando las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo fueron iguales o superiores a la media y en *año seco* cuando las precipitaciones fueron inferiores a la media. Posteriormente para cada Zona de Manejo se determinó el rendimiento objetivo como el rendimiento promedio para año Húmedo (utilizando los mapas de años húmedos) y para año seco (utilizando los mapas de años secos).

Mapa Variable según año

A partir de los rendimientos objetivos determinados se determinó la densidad de siembra según la ecuación VI

$$Densidad\ de\ Siembra = \frac{Rto\ Objetivo}{Rto\ Ind} \quad (VI)$$

Donde: Densidad de siembra ($semilla\ ha^{-1}$). Rto Objetivo= Rendimiento Objetivo ($kg\ ha^{-1}$). Rto Ind= Rendimiento Individual ($kg\ pl^{-1}$)

Todas las relaciones fueron ajustadas y comparadas entre sí mediante el programa estadístico GraphPad Prism version 5.00 para Windows, (GraphPad Software, San Diego California USA). Además, se realizó un ANAVA y test de comparación de medias LSD de Fisher ($\alpha= 0.05$), mediante el software estadístico INFOSTAT versión 2012 (Di Reinzo *et al.*, 2016).

Resultados

Relación entre TCP y NGP

Al evaluar la relación entre el NGP y la TCP, en cada uno de los ensayos (6 en total) y comparándolo con ecuación de ajuste de una única curva a partir de todo el set de datos, no se encontraron diferencias estadísticas entre una única curva y la curva individual generada para cada experimento ($F=6,68$; $p<0,0001$), por lo tanto, todos los datos ajustaron a una única curva para este genotipo (Figura 1).

Los parámetros de este ajuste fueron: $a=729,2\pm 16,72$ y $b=681,7\pm 47,10$, con un R^2 de 0,48. Estos valores están dentro del rango de valores encontrados por Andrade *et al.*, (2002) quien determinó esta relación para distintas condiciones de disponibilidad de agua, nitrógeno y radiación.

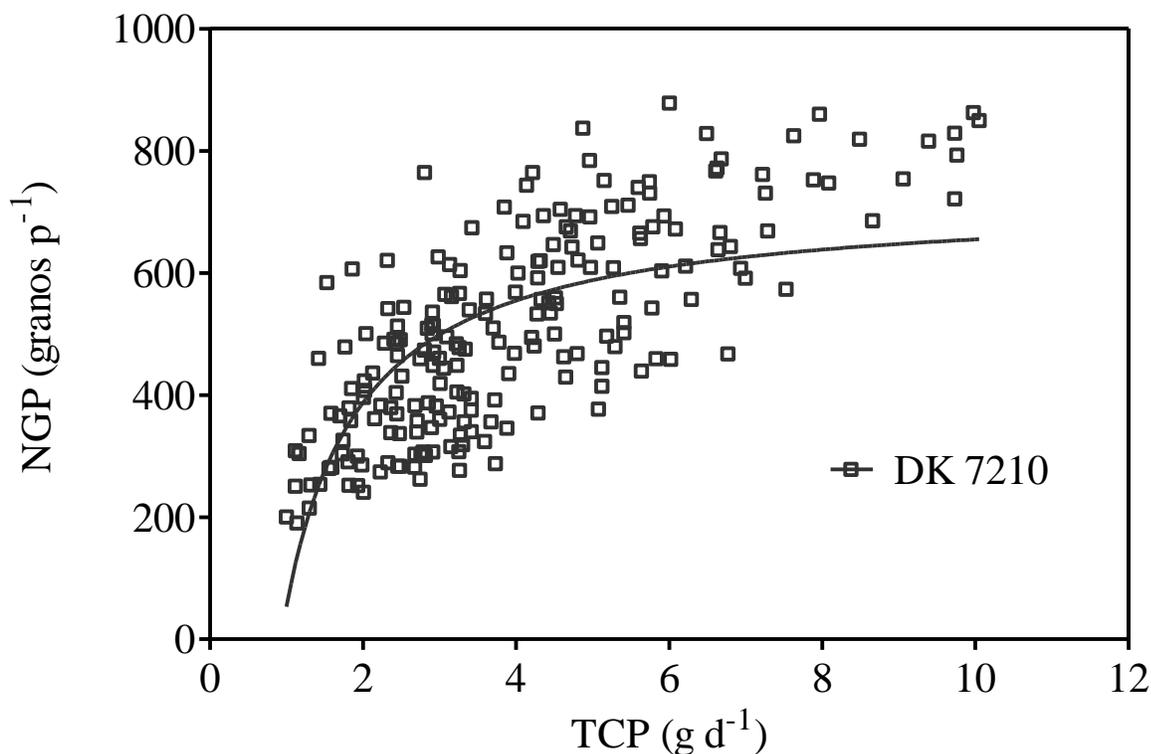


Figura 1. Relación entre el número de granos por planta (granos p⁻¹) y tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico (g d⁻¹), para el híbrido DK 7210 VT3P en todos los experimentos realizados.

Estos resultados demostraron que esta relación no fue modificada al cambiar de ambiente, ya que cada experimento representó condiciones ambientales distintas, por ubicarse en distintas localidades, zonas dentro de un lote y/o sembrarse en distinto momento. Los cambios en el ambiente solo generaron cambios en la TCP, coincidiendo con Andrade *et al.*, (2002).

Al evaluar el NGP y TCP que se relaciona con la DOA se encontró, que ambos parámetros se mantuvieron en un rango estrecho de valores. En el caso de TCP el rango fue desde 3,07 hasta 4,81 g MS p⁻¹ D⁻¹ mientras que el NGP varió entre 507 y 594 granos p⁻¹, mientras que la producción individual se mantuvo constante debido al efecto de compensación generado por el peso de los granos.

Producción Individual

En el rango de la DOA, la producción individual del genotipo bajo estudio no difirió estadísticamente entre los ensayos ($p=0.0524$), presentando un valor medio de $115,5 \pm 13,5 \text{ g p}^{-1}$ (Figura 2).

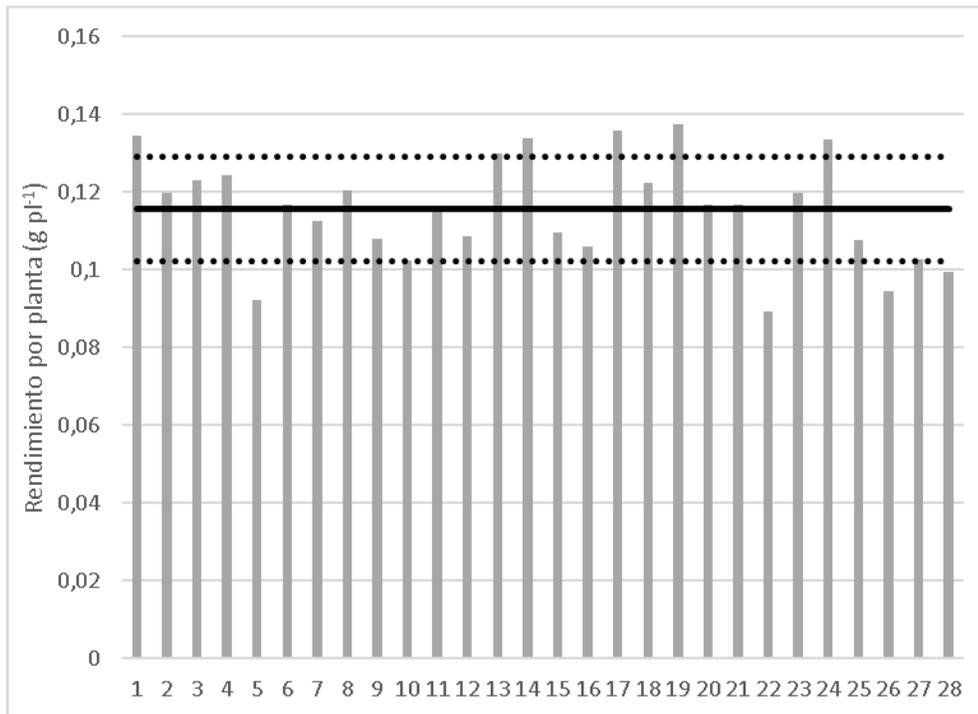


Figura 2. Rendimiento individual (g p^{-1}) del híbrido DK 7210VT3P en los distintos ensayos y bloques. La línea llana es el valor medio y las líneas punteadas el desvío estándar.

Generación de Prescripciones Variables

Ambientación

En la Figura 3 ilustra sobre la ambientación realizada en el Lote 14 de un establecimiento localizado en cercanías de la localidad de Chajan (Córdoba, Argentina), en el mismo se identificó la presencia de dos zonas de manejo: AP y BP. La primera zona se caracterizó por presentar un rendimiento un 8 % superior a la media del lote, abarcando las áreas de relieves más bajas y presentando un suelo Haplustol Udorthentico; mientras que la zona BP se ubico en las zonas mas altas del relieve, presentando un suelo Haplustol Entico con menor capacidad de retencion hídrica que el de AP, en esta zona el rendimiento fue un 9 % inferior a la media.

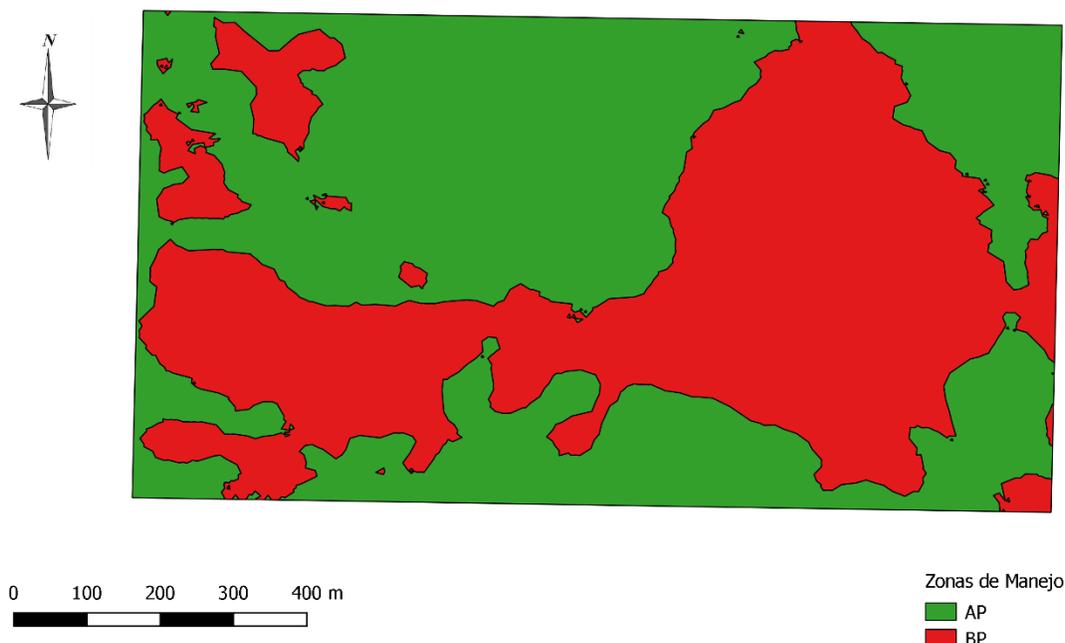


Figura 3. Zonas delimitadas en un lote de producción.

Determinación de densidad según Zona de Manejo.

De acuerdo al ciclo, según Índice de precipitación, y a mapas de rendimientos anteriores, sumado al conocimiento de un experto se determinó para cada zona un rendimiento objetivo, con el cual se obtuvo la densidad de acuerdo a la producción individual (Tabla 1 ; Figura 4 y 5).

Tabla 1. Rendimiento Objetivo (kg ha^{-1}) y densidad de siembra (semillas ha^{-1}), para cada zona en cada año

Zona	Rendimiento Objetivo (kg ha^{-1})		Densidad de Siembra (semillas ha^{-1})	
	Año Húmedo	Año Seco	Año Húmedo	Año Seco
AP	8489	7428	73500	64310
BP	7687	5990	66556	51861

El mayor rendimiento objetivo se plantea para un año húmedo en la zona de AP, mientras que el menor rendimiento objetivo se espera en la zona de menor productividad en un año seco. Además, puede observarse que las mayores diferencias en cuanto a la densidad de siembra se dan en los años secos y en la zona de baja productividad, lo cual se explica por el hecho de que la principal limitante productiva para este lote es el agua, por lo tanto en años húmedos donde la oferta hídrica es mayor la diferencia entre Zonas se estrecha, mientras que en años secos la zona con mayor capacidad de retención hídrica (AP) aumentan su productividad en tanto las zonas con baja capacidad de retención, la disminuyen.

Mapa de prescripción

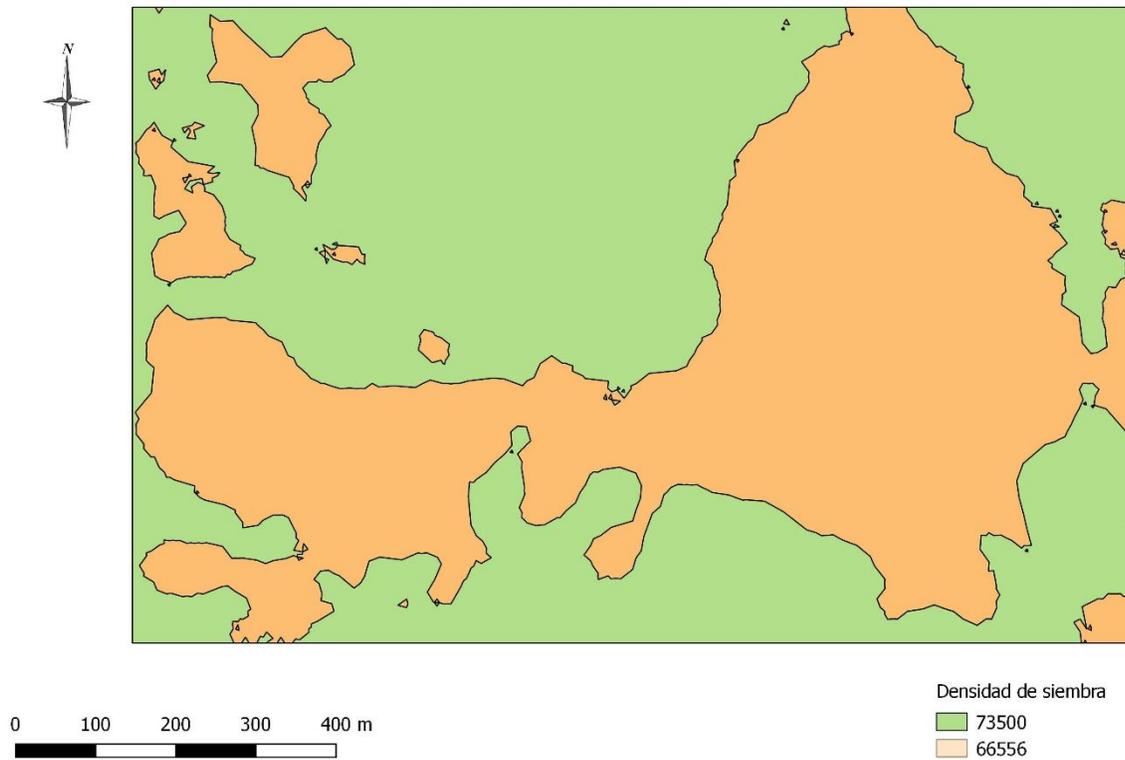


Figura 4. Mapa de prescripción de densidad de siembra para un año húmedo.

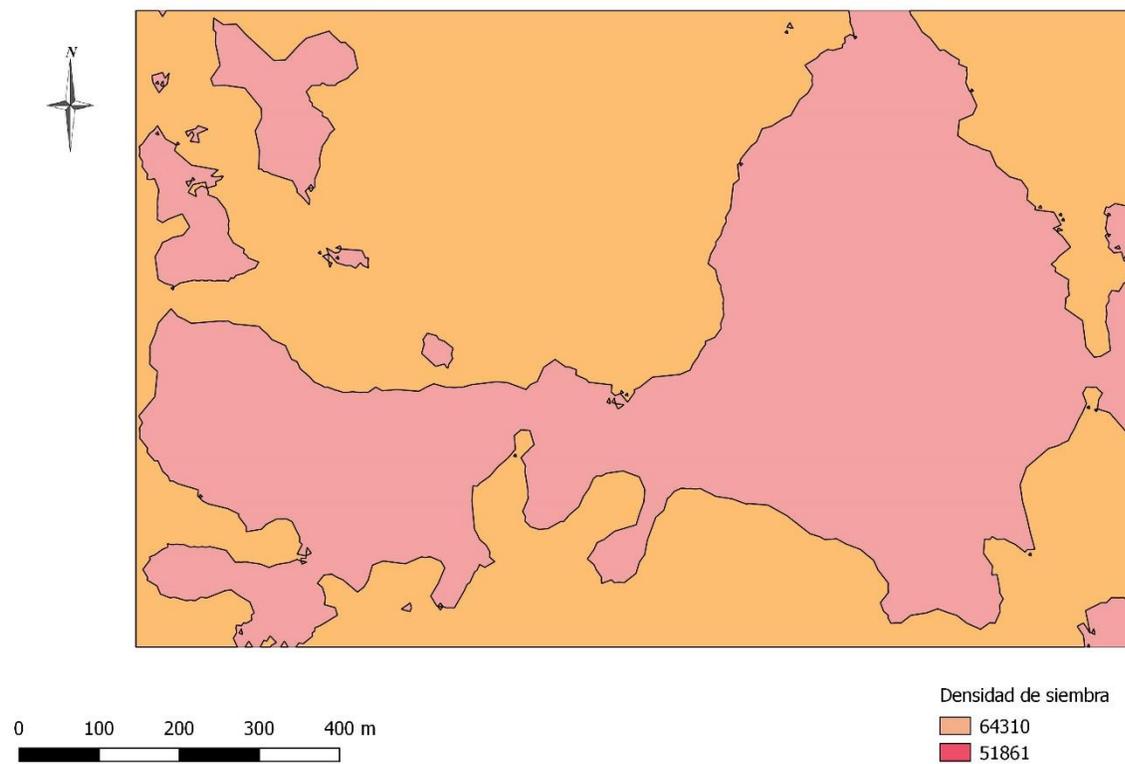


Figura 5. Mapa de prescripción de densidad de siembra para un año seco.

Resumen y conclusiones

El maíz es uno de los cultivos más importantes de Argentina. Una de las principales prácticas de manejo que influyen sobre la producción de granos del maíz es la selección de la densidad óptima de siembra, ya que el rendimiento es dependiente de la misma, entre otras decisiones de manejo. Esta dependencia con la densidad está dada por la existencia de una estrecha relación entre el número de granos por planta (NGP) y la tasa de crecimiento individual ($TCP - g\ p^{-1}\ d^{-1}$) durante el periodo crítico de definición del rendimiento que se encuentra centrado en la floración (± 15 días de R1). Debido a que la TCP depende de la disponibilidad de recursos y que estos varían espacialmente dentro de un mismo lote de producción, resulta fundamental desarrollar modelos de prescripción de densidad variable. Para lograr este objetivo se llevaron a cabo seis ensayos experimentales, durante la campaña 2013/14 en la región sur de la provincia de Córdoba (Argentina), empleando el híbrido DK 7210 VT3P de amplia utilización en la zona, a partir de estos ensayos se determinó la relación (de tipo inversa) entre NGP y TCP en distintas condiciones ambientales, encontrándose que la misma no fue modificada al variar las condiciones ambientales, y que modificaciones en estas condiciones solo generaron cambios en la TCP. Además, se encontró que en el rango de densidades óptimas la TCP y NGP se mantuvieron en un rango estrecho, lo cual permite suponer que cuando la densidad de plantas es óptima la productividad individual se mantiene constante independientemente de las condiciones ambientales. Posteriormente con una serie de ensayos realizados durante la campaña 2015/16 y 2016/17 en la misma región y con el mismo genotipo, se determinó la productividad individual cuando la densidad de siembra estuviera en el rango del óptimo, encontrándose que esta variable no se modifica, independientemente de la condición ambiental. A partir de esta información sería posible ajustar la densidad óptima de siembra a través de la estimación del rendimiento esperado. Finalmente, se podrían generar prescripciones de siembra variable a partir de mapas de rendimiento de campañas anteriores, agrupándolos según la condición hídrica del año (húmedo/seco) y estimando el rendimiento de cada fracción de lote para cada condición hídrica. Así, se pueden obtener mapas de densidad de siembra variable dependientes del rendimiento posible de alcanzar y del genotipo según la condición de año. En los próximos años se realizará la validación de las prescripciones generadas en este trabajo. Es importante resaltar la necesidad de determinar la productividad individual para un mayor número de genotipos, ya que este atributo puede cambiar con el genotipo. Además, sería importante desarrollar otros métodos de cálculo de rendimiento objetivo como por ejemplo a través del uso de modelos de simulación.

Referencias

- Andrade, F.H., Cirilo, A., Uhart, S., & Otegui, M. (1996). Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa. EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp
- Andrade, F. H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., & Valentinuz, O. (1999). Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39(2), 453-459.
- Andrade, F. H., Echarte, L., Rizzalli, R., Della Maggiora, A., & Casanovas, M. (2002). Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science*, 42(4), 1173-1179.
- Al-Kaisi, M. M., & Yin, X. (2003). Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agronomy journal*, 95(6), 1475-1482.
- Bragachini, M., Méndez, A., Scaramuzza, F., Villarroel, D. & Vélez, J.P. (2012) Ensayo de larga duración de manejo de insumos en forma variable. INTA. En: <http://inta.gov.ar/documentos/ensayo-de-larga-duracion-de-manejo-deinsumos-en-forma-variable/>
- Bongiovanni, R., Mantovani, E., Best, S., & Roel, Á. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Prociur/IICA.

- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez L., Tablada M., & Robledo, C.W. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Espósito, G. P. (2013). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Tesis para optar al grado de Doctor en la UNC. Córdoba. Argentina.
- Esposito, G., Cerliani, C., Balboa, G., & Naville, R.(2016) Fertilización balanceada, agua y radiación, definen la brecha de producción en maíz. En XXV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Río Cuarto. Córdoba. Argentina. AACCS.
- Hernández, F., Amelong, A., & Borrás, L. (2014). Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal*, 106(6), 2316-2324.
- Hörbe, T. A. N., Amado, T. J. C., Ferreira, A. D. O., & Alba, P. J. (2013). Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*, 14(4), 450-465.
- Ministerio de Agroindustria Argentina (2018). Estimaciones Agrícolas. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Accedido el 20 de marzo de 2018.
- Moral, F. J., Terrón, J. M., & Da Silva, J. M. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 335-343.
- Sarlangue, T., Andrade, F. H., Calviño, P. A., & Purcell, L. C. (2007). Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density?. *Agronomy Journal*, 99(4), 984-991.
- Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., & Luchiari, A. (2004). Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal*, 96(1), 195-203.
- Shanahan, J. F., Doerge, T. A., Johnson, J. J., & Vigil, M. F. (2004). Feasibility of site-specific management of corn hybrids and plant densities in the Great Plains. *Precision Agriculture*, 5(3), 207-225.
- Vrindts, E., Mouazen, A. M., Reyniers, M., Maertens, K., Maleki, M. R., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2005). Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. *Biosystems Engineering*, 92(4), 419-428.
- Tollenaar, M., & Lee, E. A. (2011). 2 Strategies for Enhancing Grain Yield in Maize. *Plant breeding reviews*, 34, 37.