

## **Haciendo Realidad la Agricultura de Precisión en el Ingenio San Carlos**

Egbert Spaans<sup>1</sup> y Oscar Nuñez<sup>2</sup>

Presentado en el VI Congreso de ATALAC, Guayaquil, 11-15 septiembre, 2006

### **Resumen**

En el Ingenio San Carlos (ISC) se ha implementado Agricultura de Precisión (AP) para optimizar el manejo de las plantaciones de caña azúcar, porque el manejo uniforme no podía responder adecuadamente a la variabilidad que existe en el campo. El primer paso fue la subdivisión de los canteros en lotes para disminuir el tamaño de las unidades de manejo y así aumentar la probabilidad que estas sean homogéneas. Luego se adquirieron datos agronómicos por lote y con base en las condiciones específicas de cada lote, se diseñó un manejo que optimiza el uso de los recursos para maximizar la rentabilidad de la actividad agrícola en cada lote. El manejo por lote permite renovar y sembrar solamente aquellas áreas que lo ameritan, evitando que se incluyan áreas que todavía producen bien pero cuyo valor de producción reportado es más bajo que lo real por estar promediado con valores de áreas de baja producción. Se encontró una preparación excesiva de suelo ya que todos los suelos fueron subsolados, cuando las evaluaciones en campo indicaban que solamente unas pocas áreas sufren de compactación del suelo. Bajo el concepto AP se diseña una labranza óptima según las condiciones físicas del suelo en cada lote. El plan de fertilización cambió de tres dosis estándares para todo el ISC a un plan dinámico por lote que considera, entre otros, la fertilidad del suelo en cada lote y la variedad de caña. Así, casi el mismo volumen de fertilizante está mejor distribuido entre los lotes según sus necesidades individuales. La AP es una realidad en el ISC ya que ha logrado un manejo en campo más eficiente y ha sido adoptada por toda la cadena de profesionales.

---

<sup>1</sup> Presidente de ALIA2 y asesor del Ingenio San Carlos, Guayaquil, Ecuador; [espaans@alia2xti.com](mailto:espaans@alia2xti.com)

<sup>2</sup> Jefe Agronomía Ingenio San Carlos, San Carlos, Ecuador; [onunez@isc.com.ec](mailto:onunez@isc.com.ec)

## 1. Introducción

En el año 2003 el Ingenio San Carlos (ISC) de Ecuador decidió implementar Agricultura de Precisión (AP) para optimizar el uso de los recursos en el manejo de los 17,000 ha de caña azúcar. Inspirados por la literatura existente sobre AP, en años previos se había investigado asuntos como SPG (Sistema de Posicionamiento Global; GPS en inglés), SIG (Sistemas de Información Geográfica), fotos satelitales y su interpretación, sin embargo con estas herramientas no se logró concretizar la implementación de AP.

La razón fue que la AP fue desarrollada inicialmente para cereales, sistemas de producción muy diferentes a los encontrados en América Tropical, inclusive el de caña azúcar. Por tanto, para una implementación exitosa de AP es importante conocer sus principios y con base en la realidad del sistema bajo consideración, ir modificando el manejo del cultivo y capacitando al personal de manera simultanea y sincronizada<sup>3</sup>.

El principio de AP es optimizar el uso de los recursos (naturales, humanos y económicos) para maximizar las utilidades que genera la actividad agrícola o agropecuaria. Optimizar implica eficiencia y hacer exactamente lo necesario, ni más ni menos. Si se hace más, los excesos se acumulan en el sistema o más bien pueden salir del sistema (caso de fertilizantes sintéticos) contaminando el medio ambiente y generando gastos innecesarios. En caso que se hace menos de lo necesario, la producción es suboptimal y se pierde la oportunidad de generar más ganancias.

Debido a que los recursos naturales varían de un lugar al otro (variabilidad espacial), es poco probable que un solo manejo, basado en un promedio, optimice el potencial productivo que tiene cada área. Así que la palabra *precisión* significa considerar esa variabilidad a través de la finca y manejar los recursos según sus necesidades específicas, resultando en un manejo diferenciado o también se utiliza el término *manejo por sitio específico*.

El reto del manejo diferenciado es saber cómo optimizar el manejo en cada sitio específico. Solamente se puede optimizar lo que se conoce, entonces la optimización requiere un

---

<sup>3</sup> Spaans, E. and L. Quiros. 2002. Precision agriculture as a basis for better management decisions and on-farm research. Proceedings of the Second International Workshop on Mycosphaerella Leaf Spot Diseases of Bananas, CORBANA-EARTH-INIBAP-CATIE, San José, Costa Rica, 20-23 of May, 2002. Disponible en [http://www.inibap.org/pdf/IN030306\\_en.pdf](http://www.inibap.org/pdf/IN030306_en.pdf)

monitoreo intensivo y continuo de las variables productivas en el campo. Esta adquisición de datos se complementa con un programa de investigación para saber, una vez que se conoce el estado de los recursos en un lugar específico, cuál es lo mejor bajo las condiciones del lugar. Este segundo principio básico de AP procura transformar un manejo estático, basado en promedios y recetas, a un manejo dinámico que continuamente ajuste y afine las prácticas agrícolas con base en datos actuales de campo y resultados de investigación. El resultado es un sistema productivo más eficiente y rentable.

El objetivo de esta exposición es presentar cómo hemos implementado estos principios de AP en el ISC, paso por paso incluyendo algunos resultados. Esperamos que sirva como estímulo y orientación para otros ingenios que han considerado la AP como una alternativa para manejar sus recursos.

## **2. La implementación de AP en el ISC**

El ISC está situado 80 km Este de Guayaquil, Ecuador (2°13'14" Sur, 79°24'32" Oeste y 36 m.s.n.m.) y tiene 17,000 ha de área propia, la cual está dividida en 350 unidades de manejo que se llaman canteros.

Entre los recursos naturales, la principal variabilidad está en los suelos. Los suelos en el ISC son aluviales y debido a la dinámica de los ríos, se encuentra desde suelos arenosos (Psamment) hasta suelos arcillosos (Vertisol), una situación muy típica para las zonas del Pacífico de América Latina. En el ISC, la fertilización y la labranza se hacía según un paquete estándar ("la pianola") que no considera el tipo suelo ni la variedad. Caso contrario sucede con el riego que sí se maneja con cierta precisión considerando el tipo suelo, donde se reconoce un riego diferenciado para los tres tipos de suelos (basado en la textura; arenoso, franco y arcilloso).

En conclusión, para el ISC la AP es una excelente alternativa para optimizar el uso de sus recursos, principalmente con respecto al manejo del suelo que es el recurso natural que más varía a través de las plantaciones.

### **2.1 Manejar la Variabilidad de los Recursos Naturales**

El fundamento de AP es que las decisiones deben ser tomadas para áreas homogéneas en cuanto a los parámetros que afectan la producción del cultivo. A estas áreas se les llaman unidades de manejo, y dentro de una unidad de manejo se puede esperar que una práctica agrícola realizada uniformemente a través de esa unidad, resulte en una respuesta uniforme del cultivo.

El primer paso en la implementación de AP en fincas donde los recursos naturales tienen variabilidad espacial, es definir las unidades de manejo. Los recursos naturales cuya variabilidad más se consideran son suelos, topografía (por el manejo de riego, drenaje y erosión) y clima. Una forma de manejar variabilidad de recursos es erradicar la variabilidad, en caso de suelos mediante un movimiento de capas de tierras, por ejemplo, o en caso de clima con invernaderos. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas productivos no resulta rentable homogenizar los recursos. Más bien, lo recomendable es dividir una finca heterogénea en unidades de manejo ("mini-fincas homogéneas"), y luego administrar cada unidad de manejo de manera personalizada.

Lo ideal es contar con un mapa planimétrico, un mapa de suelos, un mapa altimétrico, un mapa de uso de tierra y un conocimiento en la distribución de los parámetros climáticos a través de la finca. Estos mapas se superponen, y cada área que posea las mismas características en cuanto a suelo, pendiente, uso y clima, se puede considerar una unidad de manejo.

En la práctica, sin embargo, rara vez se encuentra toda esa información disponible. En el caso del ISC, la plantación estaba dividida en 350 canteros, mediante obras de infraestructura como caminos, canales de riego y drenaje. El cantero, con un tamaño promedio de 47 ha, era considerado la unidad de manejo y las decisiones fueron tomadas a nivel de cantero. Se contaba con un mapa planimétrico que demostraba los límites de los canteros. No había un mapa de suelo detallado, aunque sí existían datos de la textura del suelo (0-30 cm) por cantero.

Las tierras son bastante planas y niveladas que permite el riego por gravedad, entonces la variabilidad topográfica es mínima. Los cambios climáticos son tan graduales que a nivel de cantero se puede considerar homogéneo el clima.

Durante la zafra 2003, se hizo un estudio de la variabilidad en producción (TCH = toneladas de caña por ha) dentro del cantero, y se encontró que 71% de los canteros tenía diferencias internas mayores a 10% (calculada con  $[TCH_{max} - TCH_{min}] / TCH_{promedio}$  de los lotes del cantero), y 41% de los canteros tenían diferencias internas mayores a 30%. Esto indica claramente las diferentes condiciones que existen para el crecimiento de la caña dentro de un mismo cantero, y consecuentemente un solo manejo dentro del cantero no satisface las diferentes necesidades que existen. Generalmente se decide renovar y sembrar un cantero cuando la producción de un cantero haya caído por debajo de un nivel umbral. Hubo canteros cuyos producciones estaban por debajo del nivel umbral, pero los datos más *precisos* indicaban que era solamente una parte del cantero con una producción muy baja y la otra parte con una producción aceptable. Bajo el manejo convencional se hubiera decidido renovar todo el cantero, sin embargo bajo el manejo más preciso se decidió renovar solamente las partes con baja producción, ahorrando dinero porque la renovación es una labor cara.

También se estudió la variabilidad en textura del suelo dentro del cantero, y resultó que solamente 43% de los canteros tenían suelo con una textura uniforme, mientras que el 57% de los canteros tenían suelos de dos o más clases texturales. Eso puede explicar parte de la variabilidad encontrada en la producción, porque no se puede esperar una respuesta uniforme de diferentes suelos a una misma programación de riego y un mismo paquete de fertilización.

Convencido de que los canteros no eran lo suficiente homogéneo para ser considerados unidades de manejo, el ISC decidió en el 2003 subdividir los canteros en lotes. En la subdivisión de los canteros, o “lotización”, fue importante balancear criterios prácticas con criterios científicos. Para optimizar las labores mecanizadas, por ejemplo, es importante que se mantenga los límites de los lotes lo más regular posible, cuando el criterio científico quiere utilizar las divisiones entre diferentes tipos suelos para separar los lotes. Sin embargo, límites entre suelos casi nunca son líneas rectas. Así mismo, la ciencia de geoestadística explica que la variabilidad en la naturaleza aumenta con la distancia, entonces según esta ciencia los lotes deben ser lo más pequeño posible. Sin embargo, la complejidad de la logística en campo aumenta con el número de lotes y la eficiencia de las prácticas agrícolas disminuye cuando se reduce el tamaño del lote. Finalmente, contabilidad y sistemas también tienen que participar para que la cantidad de cuentas contables y datos sean manejables.

Después de un proceso participativo logramos el consenso de subdividir los 350 canteros en 1310 lotes (ejemplo en Figura 1), con un promedio de 3.7 lotes por cantero y 12.6 ha por lote. Los criterios utilizados fueron:

1. El rango de tamaño del lote es de 2 a 20 ha.
2. Usar infraestructura existente como líneas divisorias entre lotes, aunque en ocasiones se crearon nuevos caminos o canales para ayudar en la división.
3. Crear lotes lo más cuadrado posible para minimizar las dimensiones en todas direcciones dentro del lote, para respetar la ley geoestadística que la variabilidad aumenta con la distancia.
4. Dividir los lotes lo más cerca posible a las líneas divisorias entre las texturas de suelo, considerando el conocimiento que el personal de campo tenía sobre la textura dentro de los canteros.

Con estos criterios, obviamente, no logramos lotes totalmente homogéneos, sin embargo al disminuir el tamaño se aumenta, estadísticamente, la probabilidad de homogeneidad. Y en cuanto más homogéneo, más se justifica un manejo uniforme.

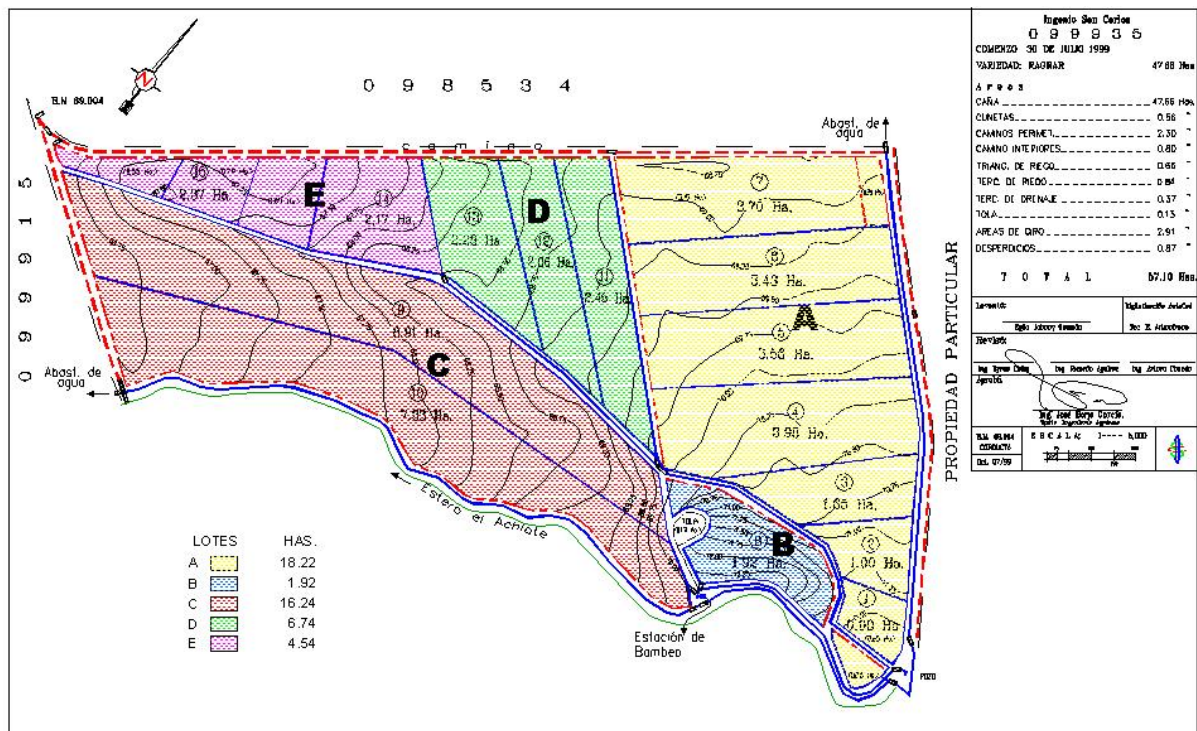


Figura 1. Plano de un cantero y su nueva subdivisión en 5 lotes (A, B, C, D y E).

La nueva subdivisión de las tierras del ISC requería un nuevo levantamiento planimétrico. Evaluando las diferentes opciones, se decidió utilizar K-GPS (Kinematic Global Positioning System) y en 8 meses se levantaron 70,000 puntos georreferenciados en campo con 2 cm de exactitud, a un costo mucho menor comparado con un levantamiento con nivel ingeniero<sup>4</sup>. Los puntos se ingresaron en un SIG para poder presentar información espacial en forma de mapas temáticos.

<sup>4</sup> Spaans, E. and L. Estrada. 2004. Sense and non-sense of satellite navigation for precision agriculture in the tropics. European Journal of Navigation 2(3): 71-76. Copias digitales disponible de [espaans@gye.satnet.net](mailto:espaans@gye.satnet.net)

## 2.2. Transformar un manejo estático a un manejo dinámico

El manejo por lote fue puesto en práctica de manera rápida y fue aceptado sin mayores complicaciones. Hoy por hoy los datos de campo se adquieren por lote y las decisiones se toman por lote, así que el concepto del lote está totalmente adoptado. El próximo paso en la AP es ir de un manejo uniforme y estático a un manejo diferenciado y dinámico, respetando la variabilidad espacial (de uniforme a diferenciado) y temporal (de estático a dinámico). Queremos ilustrar este concepto mediante tres labores de campo que estamos realizando bajo el concepto de AP en el ISC; la siembra, la preparación de suelo y la fertilización.

### *La siembra*

La siembra es una labor costosa y considerando la variabilidad de producción encontrada dentro de los canteros, merece atención especial. Bajo el sistema tradicional, la decisión de sembrar fue a nivel de cantero, entonces existía un cierto nivel de diferenciación. Sin embargo, el conocimiento del estado de los factores de campo y la producción por lote permite diferenciar aún más. En la Tabla 1 se ve como el porcentaje de siembra parcial aumenta a través de los años a partir de la implementación del proyecto AP e indica que la decisión de sembrar o no, está tomado cada año más a nivel de lote, es decir, cada año es más diferenciado o más *preciso*.

Canteros sembrados	Zafra						
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<b>totalmente:</b>	92%	95%	87%	85%	57%	64%	22%
<b>parcialmente:</b>	8%	5%	13%	15%	43%	36%	78%

Tabla 1. El porcentaje del número de canteros sembrados totalmente (todos los lotes del cantero) o parcialmente (no todos los lotes del cantero). La lotización sucedió en el 2003.

### *La preparación de suelo*

La preparación de suelo en el ISC consistía de 5 pasos básicos, entre ellos un paso de disco 36” para voltear la cepa, una rastra con 32”, un paso con subsolador para descompactar el



suelo y finalmente dos rastras (32”y 26”) para disminuir el tamaño de los terrones y así facilitar la emergencia de la caña.

Aplicando los conceptos de AP, que procura un manejo dinámico que responda a las condiciones actuales del suelo en cada sitio específico (= el lote) en lugar de una receta estándar para todo, hicimos un estudio intensivo del grado de compactación de los suelos del ISC. Mediante mediciones de la densidad aparente detalladamente a través de todo el perfil del suelo en más de 80 calicatas, rara vez se encontró valores superiores a los considerados tolerables por el cultivo caña. Las mediciones siempre se hacían en el surco donde pasan los camiones de cosecha, que representa el peor caso<sup>5</sup>. Concluimos que la compactación no es un fenómeno que afecta, de manera generalizado, los suelos del ISC. Eso es de esperar porque la zafra es durante el verano cuando los suelos están secos y por tanto sostienen la presión ocasionado por los equipos de cosecha sin compactarse.

Hoy por hoy, se mide la densidad aparente del suelo y solamente si el valor es mayor a 1.44 g/cm<sup>3</sup> en suelos arcillosos, 1.54 g/cm<sup>3</sup> en suelos francos y 1.64 g/cm<sup>3</sup> en suelos arenosos, se subsola<sup>6</sup>. La medición de la densidad aparente es rápida y se hace con un barreno tubular con un diámetro conocido (2.0 cm). Así en el año 2004, solamente 14 de los 57 lotes sembrados fueron subsolados, no solamente ahorrando dinero sino también preservando la estructura y el nivel de materia orgánica del suelo por la fuerza física y la inyección de oxígeno que causa el subsolador. Hemos dado seguimiento a los lotes que no han sido subsolados, y no se ha encontrado ninguna reducción en producción.

En otra investigación estamos eliminando pasos con discos para reducir la preparación de suelos. Figura 2 demuestra que la distribución del tamaño de los terrones en tres diferentes tratamientos es la misma, con más de 80% de la superficie cubierta con terrones con un tamaño entre 2 y 5 cm y 10 a 20% cubierta con terrones con un tamaño entre 5 y 10 cm.

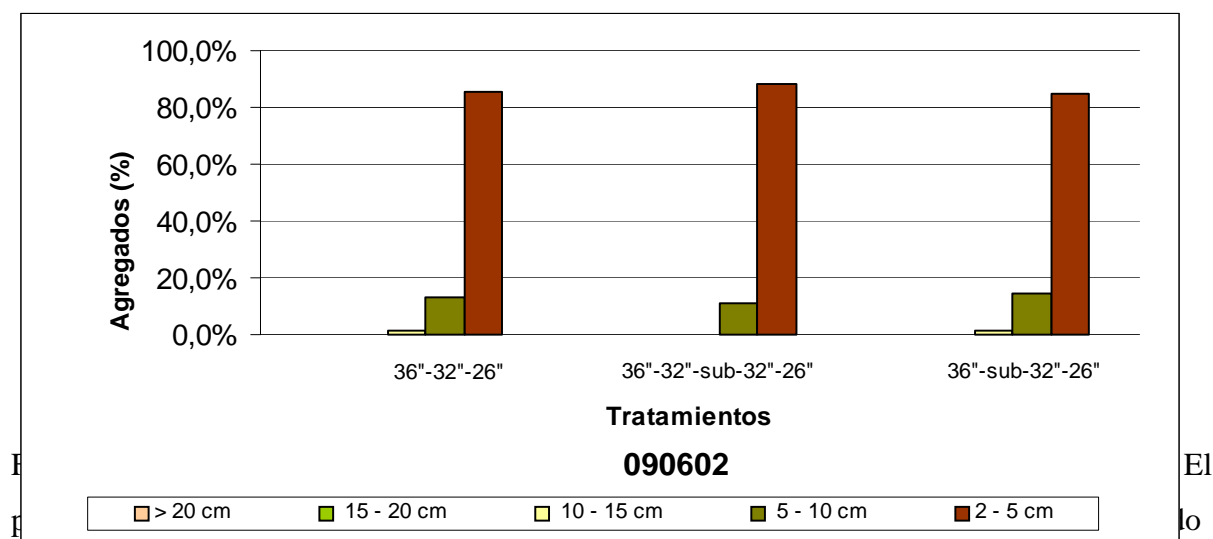
Luego se evaluó la tapada de semilla, la emergencia de rebrotes y la producción al final de zafra y no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Seguimos investigando este

---

<sup>5</sup> McGarry, D., M.V. Braunack, G. Cunningham, N. Halpin, M. Sallaway, D. Waters, and B.T. Egan. 1997. Comparison of soil physical properties of row and interrow; basis for control traffic in cane. Proc. Sugarcane Tech. Aust. Soc. Conf., BSES, Queensland, Australia. pp 263-269.

<sup>6</sup> Trowse, A. and Humbert, R. 1961. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. Soil Science 91(3): 208-217.

aspecto porque la meta es definir la labranza óptima para cada lote individualmente, minimizando costos y preservando la estructura del suelo.



tratamiento es el testigo con los 5 pasos estándares, y el tercer tratamiento se subsoló inmediatamente después de la rastra 36'', eliminando una rastra 32''.

### ***Fertilización de suelo***

La fertilización de suelo en el ISC se hacía básicamente con tres tipos de fertilización: 120 – 206 – 78 (kg de N - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – K<sub>2</sub>O por ha por año) para caña planta, 120 – 0 – 78 para caña soca y 120 – 0 – 0 para un área que recibe aguas residuales de la fábrica enriquecidas con cachaza y vinaza (subproducto de la producción de alcohol y rico en K). Ciertos ajustes en la fertilización se hacían basados en análisis foliares y producción del año anterior (Crop-log), parámetros que al final reflejan el estado de fertilidad del suelo, pero los ajustes fueron ocasionales y leves.

En el año 2003 empezamos a realizar análisis de suelo para cada lote por año y encontramos, por ejemplo, que el promedio de K en el suelo en todo el ISC es suficiente (0.37 meq/100 g). Sin embargo, solamente un 55% de los lotes tienen un contenido de K en el suelo en el rango suficiente (0.2 a 0.4 meq/100 g), mientras un 14% tiene deficiencia (<0.2 meq/100 g) y un 31% tiene exceso (>0.4 meq/100g). Muchos de los lotes con exceso de K se encuentran en el área que recibe vinaza que no recibía fertilización de K, entonces existía un manejo

diferenciado, sin embargo el análisis de suelo por lote permite un manejo mucho más diferenciado y específico por lote.

También hemos encontrado diferencias en la cantidad de nutrientes que extraen las variedades sembradas en el ISC. Por cada TMC de caña cosechada, la variedad Ragnar extrae 1.05 kg N cuando la CR74250 extrae solamente 0.79 kg N. Fertilizando estas dos variedades con iguales cantidades de N podría afectarse la maduración de la CR74250.

Finalmente, suelos arenosos tienen mayor potencial para lixiviar nutrientes que suelos arcillosos, entonces en estos suelos se debe fertilizar más, particularmente los lotes arenosos que se cosechan a finales de la zafra, cerca del invierno.

Para sistematizar nuestros conocimientos en cuanto a nutrición y fertilización en las diferentes condiciones existentes en el ISC y también para facilitar los cálculos, hemos creado un modelo sencillo que calcula la dosis de N - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - K<sub>2</sub>O considerando el tipo de suelo y su fertilidad, la variedad, la producción, la época de cosecha y la edad del cultivo. La idea es seguir mejorando el modelo con base en los resultados de campo (comercial y experimental) para optimizar el uso de los recursos suelo y fertilizante. La Figura 3 demuestra como el nivel de diferenciación en las dosis de fertilizantes que se aplican ha aumentado desde que se implementó la AP en el 2003. Vale aclarar que el volumen total de fertilizantes aplicados en el ISC ha sido similar a través de los años.

Para poder aplicar tantas diferentes mezclas de fertilizantes, hemos desarrollado una planta propia para mezclar fertilizantes como urea, DAP y KCl en las proporciones y cantidades requeridas por cada lote.

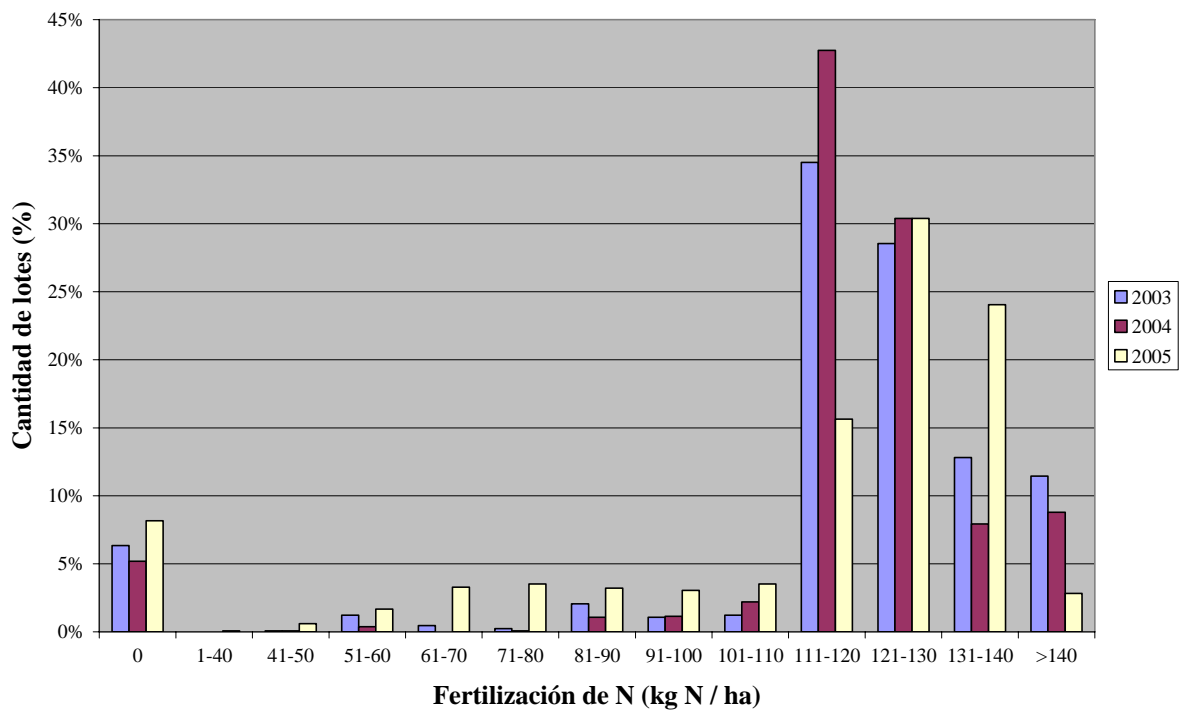
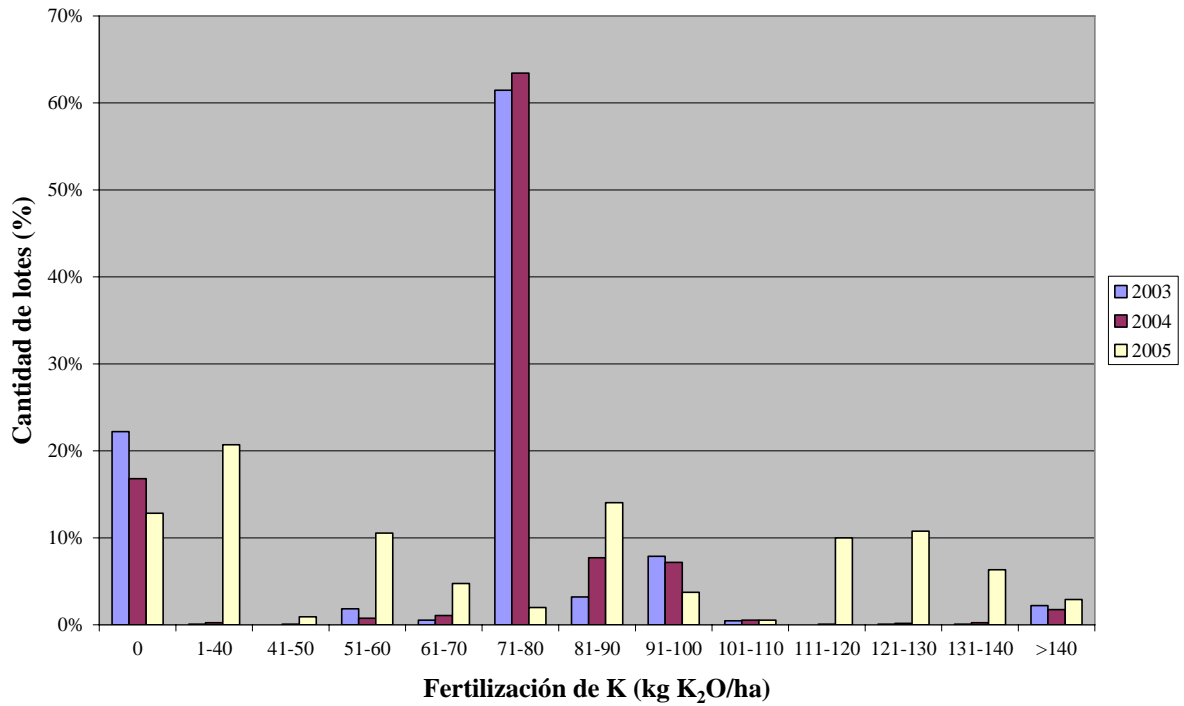


Figura 3. La distribución de frecuencia de la cantidad de lotes que reciben una cierta cantidad de fertilizante potásico (arriba) o nitrogenado (abajo) al suelo, para los años 2003, 2004 y 2005.

### **3. Conclusiones**

La implementación de Agricultura de Precisión en el ISC ha sido un proceso participativo y paulatino. Hemos optado por un concepto muy práctico donde la sofisticación está en la sencillez, la aplicación creativa y sistemática de conocimientos y la participación de toda la cadena de profesionales. Más que un producto final, la AP es un proceso que primero busca una estrategia para manejar la variabilidad en el campo, y luego diseña un manejo agronómico específico considerando las condiciones actuales y el potencial de cada área. El costo que tienen la adquisición e interpretación de información, la capacitación del personal y el manejo diferenciado, se recupera con un uso más racional de recursos (eficiencia) y una optimización de la producción, que maximiza la rentabilidad del sistema productivo.