EL MISIONERO DEL AGRO

TAMAÑO DE LA PARCELA EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

SIZE OF PLOT IN AGRICULTURAL EXPERIMENTS

Autores:
Gavilánez Luna Freddy Carlos
fgavilanez@uagraria.edu.ec

Suárez Arellano César Francisco
csuarez@uagraria.edu.ec

Andrade Alvarado Pedro José
pandrade@uagraria.edu.ec

Martillo García Juan Javier
jmartillo@uagraria.edu.ec

Morán Castro César Ernesto
cmoran@uagraria.edu.ec

Filiación:
Universidad Agraria del Ecuador

Guayaquil-Ecuador

Fecha de presentación: 17/06/2016
Fecha de aceptación: 16/03/2017

TAMAÑO DE LA PARCELA EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

SIZE OF PLOT IN AGRICULTURAL EXPERIMENTS

Autores:

Gavilánez Luna Freddy Carlos
fgavilanez@uagraria.edu.ec

Suárez Arellano César Francisco
csuarez@uagraria.edu.ec

Andrade Alvarado Pedro José
pandrade@uagraria.edu.ec

Martillo García Juan Javier
jmartillo@uagraria.edu.ec

Morán Castro César Ernesto
cmoran@uagraria.edu.ec

Filiación

Universidad Agraria del Ecuador

Fecha de presentación: 17/06/2016
Fecha de aceptación: 16/03/2017

Resumen

Definir el tamaño adecuado de parcela, desde perspectivas óptimas y de mínima variabilidad, es una de las actividades que prácticamente se deja de lado en la experimentación agrícola debido a los costos que dicha actividad implica; no obstante, podrían perderse alternativas que bien pueden mejorar la producción de los cultivos. Bajo esta premisa y recurriendo a una exhaustiva revisión bibliográfica, se ha tratado de exponer las diversas alternativas para definir el tamaño adecuado de las parcelas en los experimentos agrícolas; una actividad de la cual existe poca información al respecto, especialmente en el Ecuador. Se describen algunas metodologías que parten del uso de los llamados experimentos en blanco, que van desde técnicas gráficas hasta el uso de modelación matemático – estadística, las cuales permiten arribar a formas (ancho y largo) de parcela con criterios de optimización. En este contexto, se detallan métodos como los de máxima curvatura y los de máxima curvatura bivariada y los que utilizan modelos regresionales, ajustados a expresiones cuadráticas de segundo orden aplicables a las técnicas de superficie de respuesta.

Palabras claves: Coeficiente de variación, experimento en blanco, heterogeneidad del suelo, parcela útil.

Abstract

Define the appropriate size of plots, from excellent prospects and minimal variability, it is one of the activities that practically left out of agricultural experimentation for the costs that it produce; however, may lose alternatives that can improve the crop´s production. Whit this premise and doing an exhaustive literature´s review we have treat to expose the different alternatives for define the appropriate size of plots in agricultural experiments; especially in the Ecuador there is a little information about this. The agricultural experiments describe some methodologies that are based on the use of so-called blank experiments, that use from graphic techniques to mathematical modeling are described. This techniques allow arrive to forms (long – wide) of plots. In this context, methods such as maximum curvature and maximum curvature and bivariate regression using models, adjusted second quadratic expressions applicable to techniques order response surface are detailed.

Keywords: Coefficient of variation, blank experiment, soil heterogeneity, useful plots

Introducción

Según la FAO (2009), la población mundial para el año 2050 tendrá un incremento de 2300 millones de habitantes más, lo que implica un aumento en más de un tercio de la población actual. Este crecimiento, según esta misma fuente, propiciará la necesidad de incrementar la producción de alimentos en un 70%. Con estas perspectivas, hoy es un menester insoslayable voltear la mirada hacia el desarrollo de una agricultura eficiente.

La demanda creciente de alimentos es el impulso inexorable hacia la búsqueda de técnicas y metodologías de producción agrícola que permitan incrementar las producciones en las mismas unidades de área, antes que aumentar la frontera agrícola. Este accionar eficiente ineludiblemente tendrá su apoyo en los experimentos agrícolas, los cuales son los que a la postre, hagan posible identificar alternativas de mejoramiento productivo.

Sin embargo, este mejoramiento productivo depende del grado de sensibilidad que tenga el diseño experimental que se haya decidido implementar, para lograr detectar respuestas significativas. Este grado de sensibilidad es inversamente proporcional a la magnitud del error experimental que se presenta en todo experimento. A su vez, el éxito de tener un experimento sensible depende de cuánto control hagamos de dicho error experimental.

El error experimental, que representa a la variación no explicada que se produce en un experimento, se debe fundamentalmente a dos fuentes de variabilidad. Una de ellas corresponde al manejo no uniforme que pudiera realizarse en las unidades experimentales; y la otra, está referida básicamente a la heterogeneidad del suelo (Reyes, 1984). Si las condiciones de manejo se mantienen uniformes, como es de esperar al desarrollar un experimento y se utilizan semillas de genética certificada, la heterogeneidad del suelo es el factor que más contribuirá al incremento del error experimental (Roselló y Fernández, 1993).

El error experimental jamás se lo podrá eliminar, pero sí se puede reducir su magnitud llevando a cabo ciertas acciones, que a su vez, permitirán una mejor estimación de los efectos de los tratamientos que se estén investigando (Reyes, 1984). De allí que una de estas acciones que inciden sobre el control de esta fuente de variabilidad desconocida, sea el uso de tamaños y formas adecuadas de las unidades experimentales (González, 1976).

Definir la forma y el tamaño adecuado de las unidades experimentales, que en el caso de la agronomía corresponden a las medidas que deben tener las parcelas de los experimentos de campo; contribuyen con el aumento de la sensibilidad de un experimento, consecuentemente incrementan la evidencia entre las diferencias de tratamientos de entre los cuáles podrían estar algunas soluciones para mejorar la productividad agrícola.

Asimismo, tener parcelas experimentales con dimensiones adecuadas, hacen eficiente un experimento en el sentido del ahorro económico que pudiera lograrse al evitar utilizar parcelas grandes de forma

innecesaria, que lo único que harán es magnificar el efecto distorsionador de la heterogeneidad del suelo (Roselló y Fernández, 1993).

En el país, si bien existen instituciones dedicadas al mejoramiento de la producción agrícola, es incipiente lo que se ha hecho respecto de determinar el tamaño adecuado de las parcelas experimentales de acuerdo a la poca información que existe de referencia. Más bien, se recurren a criterios subjetivos que no consideran fundamentos estadísticos ni económicos; y en algunos casos, a considerar información de otras latitudes que se aplican en condiciones totalmente distintas (Chacin, 1997; citado por Barrientos, 1981), lo que puede constituirse en una pérdida de oportunidad para identificar alternativas de mejoramiento de la producción agrícola.

La carencia de información sobre esta temática es generalizada a nivel regional, las publicaciones y textos que describen sobre el tamaño óptimo de parcelas para diferentes cultivos tienen muchos años de vigencia; sin embargo, describen criterios y metodologías de uso actual en el diseño de experimentos, como es el caso de modelos regresionales y superficies de respuesta que hacen posible identificar dichos tamaños de parcela.

Bajo la perspectiva indicada en los párrafos precedentes, el presente documento se ha elaborado con el propósito de exponer información sobre los factores que inciden sobre los tamaños adecuados de parcelas experimentales, como unidades de muestreo; además de algunos criterios y metodologías que aunque aparenten un anacronismo, pueden implementarse en la actualidad para mejorar la eficiencia y la sensibilidad de los experimentos agrícolas.

Metodología

La información de sustento se ha extraído de diferentes fuentes documentales, principalmente publicadas en internet, tanto a nivel mundial como local, para lo cual se ha accedido a bases de datos de libros y artículos científicos, tales como BioOne, Ebrary, E-libro y Dialnet plus. Además del uso de buscadores como el Google Scholar.

Se ha realizado una lectura crítica de los documentos, bajo el amparo de la experiencia personal en el diseño de experimentos; aplicando un análisis de la validez de la información en cuanto a la forma de la redacción, las fuentes utilizadas y la concordancia entre metodología y resultados. Se priorizaron las fuentes primarias, tratando de dar un orden a la información bajo el uso de mapas conceptuales.

Resultados y Discusión

Uno de los parámetros muy difíciles de establecer *a priori* en la experimentación agrícola es el tamaño adecuado que deberá tener la parcela o unidad experimental, en donde se evaluará el efecto de un tratamiento aplicado. Existen múltiples factores que pueden presentar ciertas restricciones respecto de la dimensión parcelaria (De la Loma, 1966); entre estos están: el tipo de cultivo, los tratamientos que se someterán

a evaluación, las variables a medirse y fundamentalmente, la heterogeneidad del suelo en donde se llevará cabo la experiencia.

El tipo de cultivo que se utilice en la experiencia, tiene una gran influencia en la dimensión de una parcela experimental. No es lo mismo realizar un ensayo con arroz y otro con un cultivo de distanciamiento amplio como la palma africana. En el primer caso, con áreas de unos 20m2 podría ser suficiente como unidad experimental; mientras que en el segundo, para poder obtener un número suficiente de plantas en la evaluación, el tamaño de la unidad experimental es relativamente mucho más amplio (De la Loma, 1966).

En el caso de unidades experimentales con plantas de distanciamiento amplio, si éstas son escasas dentro de la parcela, la variabilidad que puede existir de una a otra planta, podría aumentar el error experimental de forma considerable (Sánchez et. al., 2006); sin embargo, existe un límite de plantas por parcela (o tamaño de parcela) a partir del cual la variabilidad es insignificante, y si se decide aumentar el área aún más allá de este número, lo único que se producirá es un encarecimiento del experimento (Morera, Phillips, Mora y Paredes, 1990).

Por otro lado, una mayor cantidad de plantas por unidad experimental, propiciará que los bloques, si es que se está utilizando un diseño de bloques completos al azar, se extiendan de manera importante dentro del campo; con lo cual, el experimento se expone a una mayor variabilidad del medio ocasionada por el incremento de la heterogeneidad que pudiera presentar el suelo (pendiente, fertilidad, humedad, etc.) (Muñoz, 1974). Bajo este argumento, se podría utilizar un diseño con doble bloqueo como el cuadrado latino, tal vez considerando sólo una planta como unidad experimental, pero teniendo en cuenta la cantidad de tratamientos y el número de réplicas que sean factibles de considerar.

Otro de los factores importantes que definen el tamaño de las parcelas experimentales tiene que ver con el factor de estudio o los correspondientes tratamientos, debido a las diferencias que se pudieran presentar en los efectos. Cuando se trata de experimentos sobre plagas, debido a lo estocástico que puede ser el ataque de la misma, necesariamente deben utilizarse parcelas con un tamaño relativamente grande, aun si la evaluación se hace preventivamente utilizando variables indirectas como el rendimiento del cultivo (Álvarez, Soto y Gómez, 1986). Cuando los tratamientos representan sustancias inertes como los fertilizantes, el tamaño de la parcela es relativamente pequeño; dado que su efecto, si la aplicación se realiza con el suficiente cuidado, es relativamente más homogéneo. Experimentos de cruce genético, debido a la gran cantidad de variedades que se utilizan y muchas veces a la escasez de semillas que se tienen en estos casos, utilizan parcelas de tamaño reducido. En otros casos podrían requerirse tamaños de parcelas grandes no tanto por la variabilidad de la respuesta, sino por la forma como se aplican los tratamientos; bajo esta consideración se encuentran por ejemplo los métodos de preparación de suelos, en donde se utilizan máquinas, las cuales evidentemente necesitan de áreas grandes para desarrollar

su labor (De La Loma, 1966).

En el caso de las variables de respuesta que se miden en las parcelas experimentales, éstas a su vez tienen relación exclusiva con los tratamientos en estudio (Álvarez, Soto y Gómez, 1986), definen también el tamaño que debe tener una parcela experimental (Sánchez, et al., 2006). Así por ejemplo, si la única variable de respuesta es el rendimiento del cultivo, ésta podrá evaluarse en áreas de parcela relativamente pequeña. No obstante, variables como el ataque de un hongo, deberán considerarse parcelas experimentales grandes, de tal forma que se pueda evaluar el nivel de infestación; la cual como toda respuesta de un organismo vivo, la presencia en el cultivo nunca será de forma uniforme, lo que a su vez incurre en la obligación de considerar la dispersión de la plaga (Cámara Procultivos ANDI, 2015).

La heterogeneidad del suelo es el factor restricto, tal vez más importante que incide, no solo sobre el tamaño de las parcelas (Roselló y Fernández, 1993), sino también en el tipo de diseño experimental que debe implementarse. Esta heterogeneidad puede estar determinada por características físicas, químicas y hasta microbiológicas del suelo; las que si no son tomadas en cuenta, pueden llevar al traste los resultados de un experimento y consiguientemente, incurrir en el error tipo I de la estadística. Además de estas características, la variabilidad que presente un suelo puede estar influenciado por ciertas actividades agrícolas como la del uso de agroquímicos, la quema de residuos de cosechas, la distribución de las malezas y los cambios en los niveles de la freática por las cercanías de los canales de riego y drenaje (Escobar, 1982).

La determinación del grado de heterogeneidad de los suelos puede realizarse mediante el empleo del coeficiente de correlación *(r)*. Para este propósito, se utilizan los llamados experimentos en blanco; en donde se siembra un cultivo anual (por ejemplo maíz) de semilla certificada, dándole los cuidados respectivos de riego, control de malezas, fertilización y demás labores, de forma lo más homogéneamente posible. Para esta práctica, se divide el campo en donde se pretende evaluar la heterogeneidad, en un suficiente número de parcelas del mismo tamaño y forma (De La Loma, 1966).

Para determinar el coeficiente de correlación, se enumeran las parcelas. Luego se deberán establecer dos grupos de parcelas contiguas; uno formado por las parcelas impares (1, 3, 5, 7, 9,…) y el otro por las parcelas pares (2, 4, 6, 8,…), de manera que las parcelas 1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, etc., se correspondan. Como será deducible, el número de parcelas en que se ha dividido el campo debe ser un número par para tener el mismo número de parejas correlacionadas. Una vez llegado el momento, se procede a la cosecha de cada parcela, cuyos datos son correlacionados mediante la expresión 1, la cual se indica a continuación: (1)

$$r = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Donde *X* es el grupo de las parcelas impares y *Y* es el grupo de las parcelas pares; mientras que n es el número de parejas formadas.

Como se recordará, el valor de r puede variar en el rango de +1 a -1. Mientras este

valor se acerca a la unidad, sea positiva o negativa, la correlación es más importante; por otro lado, si este valor es o se aproxima a 0, la correlación es inexistente. La verificación de significancia del valor de r puede realizarse mediante una prueba de hipótesis, utilizando la distribución t de Student. En este caso, el estadístico de prueba está dado mediante la expresión siguiente: (2)

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Para la cual, si la hipótesis nula (*Ho*) es verdadera, sigue la distribución t de Student, con n-2 grados de libertad.

Finalmente, si el coeficiente de correlación resulta significativo (próximo a +1 o a -1), el suelo es heterogéneo. Caso contrario, cuando el coeficiente de correlación no registra significancia o éste tiende a 0, el suelo es relativamente homogéneo.

Otra de las alternativas para determinar la heterogeneidad de un suelo mucho más afectiva (Meneses, et al., 2005) es la denominada ley de varianzas de Smith (Smith, 1938), autor que determinó que existe una relación empírica entre el logaritmo de la varianza entre las parcelas de un tamaño determinado y el logaritmo del tamaño de la parcela; esto es: (3)

$$V_x = \frac{V_i}{X^b}$$

Donde Vx es la varianza del rendimiento entre parcelas por unidad de área básica, Vi es la varianza entre unidades básicas, X es el área de parcelas en las diferentes combinaciones de unidades básicas y b se conoce como coeficiente de heterogeneidad de Smith.

La expresión 3 se linealiza aplicando logaritmos, con lo que se tiene la nueva función lineal: (4)

$$Log(V)_x = Log(V_i) - bLog(X)$$

Desde esta función, b es la pendiente que toma valores entre 0 y 1; que al igual que el coeficiente de correlación, para valores que tienden hacia el 0 las parcelas se definen como relativamente homogéneas, mientras que valores que tiendan hacia el 1, se definen como heterogéneas. Sin embargo, en ciertos casos b puede presentar valores mayores a 1, lo que complica su interpretación (Mayor, Blair y Muñoz; 2012). Por esta causa, autores como Federer (1963) citado por Mayor, Blair y Muñoz (2012), recomienda estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo ponderando los logaritmos de las varianzas por los grados de libertad asociados de cada combinación de la siguiente forma: (5)

$$b = \frac{\sum(G_L Q_i B_i) - \sum(G_L Q_i) \cdot \frac{\sum(G_L B_i)}{\sum G_L}}{\sum(G_L B_i^2) - \frac{\sum(G_L B_i)^2}{\sum G_L}}$$

Siendo G_L los grados de libertad asociados a la varianza de los distintos tamaños de parcela (combinaciones de unidades básicas), definido como n-1; Q_i es el logaritmo de la varianza de rendimiento entre parcelas por unidad de área básica y B_i es el logaritmo del número de unidades básicas en cada tamaño de parcela.

El coeficiente de correlación y el coeficiente

de heterogeneidad de Smith, sólo son indicativos de la idoneidad de un campo para llevar a cabo los experimentos de interés, ya que permiten conocer si la heterogeneidad del suelo es importante, incluso como para decidir buscar otro campo experimental menos heterogéneo. No obstante, una alternativa trascendente que permite en cierta medida decidir el tamaño y la forma como deben distribuirse las parcelas, es a partir de la información que se presenta en un mapa de heterogeneidad de suelo.

Mapa de heterogeneidad de suelo

Los mapas de heterogeneidad se elaboran igualmente a partir de los experimentos en blanco o también llamados de uniformidad. Para esto se selecciona un cultivo, el mismo que es sembrado en el área de interés; el cual previamente se dividirá en un determinado número de unidades básicas. Todas las labores culturales (control de malezas, riego, fertilización, control de plagas, etc.) deben realizarse en igualdad de condiciones en cada una de las unidades básicas en que se dividió el terreno. Llegado el momento, se hace la cosecha y el rendimiento que se obtiene en cada una de estas unidades experimentales se toman de referencia (cotas), para interpolar y elaborar las curvas de igual valor, que en este caso corresponderá a las curvas de igual fertilidad. Los puntos que se unen con las isolíneas en el plano, son los centros geométricos de cada parcela que se hacen coincidir con los rendimientos obtenidos en cada una de ellas (De La Loma, 1966). Este es un trabajo análogo al de obtener curvas de igual nivel en altimetría.

En la figura 1 se expone un esquema de un mapa de heterogeneidad, indicando las respectivas isolíneas de fertilidad, obtenidas a partir de los datos de rendimiento cosechados en cada unidad de muestreo. En este punto, es preciso indicar que todas las investigaciones que se realizan para determinar el tamaño adecuado de parcela, determinan el tamaño de la unidad de muestreo (mal llamada parcela útil), lo que se define en el documento como parcela; sin embargo, una vez definida ésta, se tendrá que considerar el efecto de borde en cada una de ellas. Una unidad de muestreo, como se verá más adelante, está compuesta de varias unidades básicas en que se divide el área del experimento en blanco, cuyo número va a depender de la magnitud de variabilidad que se establezca como adecuada.

Cuando las isolíneas se muestran muy juntas, la variabilidad (pendiente) de la fertilidad es marcada; mientras que líneas más separadas indican una mayor homogeneidad, debido a que la pendiente de fertilidad es mínima. Bajo estas condiciones, aproximadamente pueden establecerse las dimensiones de las parcelas.

Asimismo, otro de los aportes que brindan los mapas de heterogeneidad es cómo deberá realizarse el control local de un experimento. La poca pendiente que pueda observarse a través de las isolíneas, pueden permitir decidir escoger el diseño completamente al azar, el cual es una alternativa para utilizarse en ambientes homogéneos. La intensidad de la variabilidad de fertilidad que muestre el campo y la dirección que se evidencie, harán posible identificar la posición de cómo deberán colocarse los bloques para cuando sea necesario utilizar una distribución de bloques completos al azar; o incluso utilizar una distribución

en cuadro latino, si el campo muestra dos direcciones ortogonales de fertilidad (Muñoz, 1974).

Otra opción de elaborar los mapas de heterogeneidad es mediante la medición de variables físicas o químicas del propio suelo, en vez de realizar medidas de rendimientos de cultivos cuando se recurre a los experimentos en blanco. En estos casos, el campo para ensayos también se divide en unidades básicas y desde la cual se extraen muestras para evaluar la humedad, contenidos de materia orgánica o contenidos de nutrientes como nitrógeno, fósforo o potasio De La Loma, 1966).

La identificación de la dispersión de la heterogeneidad en un campo experimental, por lo general, se mantiene en el tiempo; de allí que una vez identificado la dirección de fertilidad, se constituirá en una norma para ese suelo el tipo de diseño y/o la dirección de cómo deberá bloquearse un experimento (Mayor, Blair y Muñoz; 2012). Por otro lado, existe la recomendación de utilizar parcelas cuadradas cuando no se tenga una definición del gradiente de variación de un campo; sin embargo, cuando este gradiente está identificado, la recomendación es utilizar parcelas rectangulares con el lado más largo paralelo a dicho gradiente (De La Loma, 1966).

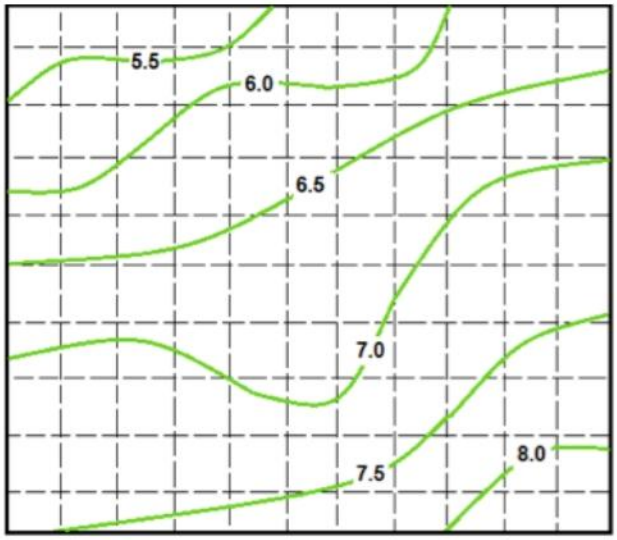

Figura 1. Esquema de líneas de igual fertilidad en un mapa de heterogeneidad de suelo.

Métodos analíticos para establecer el tamaño de las unidades de muestreo

Para determinar los tamaños de las unidades de muestreo se recurre generalmente al uso del coeficiente de variación que presente el campo entre los datos recogidos en cada una de las parcelas o unidades básicas en que se dividió el mismo. Esto es, el tamaño de las unidades de muestreo está supeditado a la variabilidad que existe en el suelo, para lo cual debe existir una combinación de dimensiones (ancho y largo) en la que dicha variabilidad defina el tamaño óptimo de parcela (Barrientos, 1981; Bueso, 1985; Vargas y Navarro, 2014).

La obtención del tamaño adecuado de las unidades de muestreo inicia en un experimento en blanco, y cómo ya se lo mencionó, va a depender del tipo de cultivo con el cual se desarrollarán los experimentos

subsecuentes y de las variables de respuesta que se evaluaran. Se siembra una semilla de pureza certificada en áreas que bien pueden ir desde los 20 m x 20 m hasta los 50 m x 50 m (Muñoz, 1974). Posteriormente se inicia seleccionando como ancho de la unidad básica una o dos hileras del cultivo por 1 m de longitud, luego se realizan distintas combinaciones de dimensiones que podrían llegar hasta unidades de muestreo de 10 m x 10 m.

Método de máxima curvatura

Una opción para establecer el tamaño de parcela óptimo es definiendo una gráfica que relacione la variabilidad y el rendimiento obtenido en las diferentes combinaciones de unidades básicas de muestreo. Para cada combinación de dimensiones de parcela se obtiene el respectivo coeficiente de variación, con los cuales puede realizarse una gráfica de tendencia y a partir de allí seleccionar el tamaño de parcela que registre la menor variación (Vargas y Navarro, 2014). Esta metodología, en donde se selecciona el tamaño de parcela con la variabilidad en el punto de mayor inflexión, es decir en donde la variación es mínima mientras se aumenta el tamaño de la parcela, se conoce como el de máxima curvatura (Mamani, 1971; Álvarez, Soto y Gómez, 1986).

En la figura 2 se presenta un esquema, elaborado por los autores, de la relación entre el coeficiente de variación obtenido para cada dimensión de parcela en que se consideró el campo; fundamentado, según algunos estudios realizados por varios investigadores, en donde se ha establecido que existe una disminución menos que proporcionalmente del valor de CV a medida que las parcelas tienen dimensiones relativamente mayores (Tineo y Villasmil, 1988; Vargas y Navarro, 2014; De La Loma, 1966).

Para mejorar la objetividad del método de máxima curvatura, puede aplicarse la prueba F de Fisher utilizando las varianzas de las distintas combinaciones de unidades básicas; con la cual puede identificarse el tamaño de parcela en donde la variabilidad resulte no significativa (Vargas y Navarro, 2014).

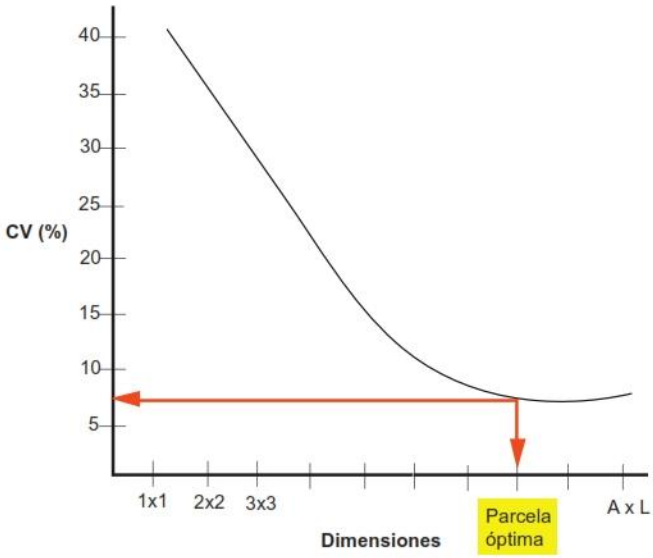

Figura 2. Relación entre el coeficiente de variación y las dimensiones (ancho x largo) de las unidades de muestreo.

El método de máxima curvatura permite identificar el tamaño de parcela experimental adecuado en forma conjunta; es decir, es un método con el cual no es posible definir el ancho y el largo (forma de la parcela) de la unidad experimental de forma optimizada. Para este propósito se utilizan modelos multivariados como los de regresión múltiple, alternativas que se exponen a continuación.

Métodos multivariados en la definición de los tamaños de parcela

Para obviar el uso de la gráfica indicada en la figura 2 y definir la forma (ancho y largo) de parcela adecuada, una vez que se tienen los coeficientes de variación para distintas combinaciones de dimensión de parcela, se puede obtener un modelo de regresión múltiple como un polinomio de segundo orden que exprese una superficie de respuesta, en cuya concavidad se hace posible identificar el tamaño de óptimo de parcela con la menor variación (Tineo y Villasmil, 1988).

La expresión matemática del modelo de regresión que se aplica en estos casos se representa mediante la expresión, cuyo planteamiento es el siguiente: (6)

$$Y=\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_{11} X_1^2+\beta_{22} X_2^2+\beta_{12} X_1 X_2+\varepsilon$$

Donde Y es el coeficiente de variación, β_0 es el intercepto, β_1 y β_2 son los coeficientes lineales, β_{11} y β_{22} son los efectos cuadráticos o de curvatura del modelo, β_{12} es el efecto de interacción y ε es el error experimental. La variable independiente está dado por el ancho de la parcela (X_1) y el largo de las mismas (X_2).

Este polinomio (expresión 6) permite obtener las dimensiones de las unidades de muestreo definiendo dos puntos importantes dentro del modelo. Con el primer punto se puede identificar a la combinación (ancho y largo) que genera el punto de máxima curvatura que tiene un sentido económico; esto es, el punto a partir del cual cualquier incremento en las dimensiones de la parcela no justifica económicamente la mínima reducción que se logra en el coeficiente de variación. Este punto de máxima curvatura se obtiene aplicando derivadas parciales al modelo obtenido e igualando a -1, el cual define al punto de máxima curvatura; de allí que a la izquierda de este punto la reducción del CV sea importante con respecto al incremento de las dimensiones de la parcela, mientras que a la derecha la reducción del CV a un mayor aumento del tamaño de parcela sea insignificante (Barrientos, 1981).

El otro punto que permite definir un modelo como el de la expresión antes indicada, es el que está referido a determinar la dimensión de parcela para el mínimo coeficiente de variación; es decir, el tamaño de parcela en donde se tiene la mínima variabilidad del área de ensayo. Este punto también se obtiene de derivadas parciales del modelo, considerando una pendiente igual a cero (Barrientos, 1981).

Las derivadas parciales con las cuales se obtienen estos puntos son:

$$\beta_1+2\beta_{11} X_1+\beta_{12} X_2=K \qquad (7)$$
$$\beta_2+2\beta_{22} X_2+\beta_{12} X_1=K \qquad (8)$$

Para resolver estos sistemas de ecuaciones, si se trata de hallar el punto de máxima

curvatura, K deberá reemplazarse por -1; y si lo que se busca es obtener el punto de mínima variabilidad, el valor a reemplazar en K es 0. La resolución permitirá determinar el ancho (X_1) y el largo (X_2) de parcela en donde se optimiza (para $K=-1$) o minimiza (para $K=0$) la variabilidad que presente un suelo experimental.

Otra de las metodologías para determinar el tamaño de parcela óptima es la propuesta por Barrientos (1981), conocida como **método de máxima curvatura bivariada**; el cual es una modificación al método de máxima curvatura, en donde sólo se relacionaban dos variables: el tamaño de la parcela y el coeficiente de variación. En este caso, la máxima curvatura bivariada relaciona el CV con el ancho y el largo de las parcelas, convirtiéndose en un modelo logarítmico múltiple, definido mediante la siguiente expresión:

$$Y=\beta 0\, X_1^{\beta 1}\, X_2^{\beta 2}\, \varepsilon \qquad (9)$$

Donde Y representa al coeficiente de variación; β_0 , β_1 , β_2 son parámetros de regresión desconocidos; X_1 y X_2 son el ancho y el largo de parcela, respectivamente; y ε es el error experimental.

En este modelo, cuyos parámetros se obtienen aplicando logaritmos a las distintas dimensiones de ancho y largo de parcela, igual que en el caso de regresión múltiple (expresión 6), también se obtiene el tamaño de parcela óptimo cuando las derivadas parciales se igualan a -1. Esto es, la pendiente -1 define la máxima curvatura a partir de la cual la variabilidad es insignificante comparada con el aumento del tamaño de parcela. Las dimensiones (ancho y largo) de parcela óptima, en función del modelo de máxima curvatura bivariada, se define resolviendo el sistema de ecuaciones formado con las expresiones:

$$\beta_0\, \beta_1\, X_1^{\beta 1-1}\, X_2^{\beta 2}=-1 \qquad (10)$$
$$\beta_0\, \beta_2\, X_1^{\beta 1}\, X_2^{\beta 2-1}=-1 \qquad (11)$$

Una vez obtenidos los valores de X_1 y X_2, se podrá estimar el valor de CV de parcela óptima para una situación específica, reemplazando estos valores en el modelo de la expresión 9.

Una alternativa que combina el tamaño óptimo de la unidad de muestreo con la magnitud de diferencias que se quiere detectar entre tratamientos (precisión) y con el número de repeticiones necesarias, se conoce como el **método de Hatheway**. Es un método que combina la ley de varianzas de Smith y la fórmula de Cochran y Cox establecida para calcular el número de repeticiones en un experimento (Escobar, 1982); definiendo una dependencia del tamaño óptimo con las repeticiones. La relación que se establece permite deducir que si se reduce el tamaño de parcela, para mantener un mismo grado de precisión, necesariamente se tiene que aumentar el número de repeticiones. La desventaja de esta alternativa radica en la definición subjetiva de las diferencias que se quieren detectar, lo que en algunas ocasiones puede reportar tamaños de áreas de muestreo fuera de la aplicación práctica.

De las metodologías indicadas, la poca información que existe sobre experiencias para determinar las dimensione de las áreas de muestreo, revelan que el método de regresión múltiple es la alternativa más utilizada. Esta información es la que se indica en la tabla 1, en donde se detallan

áreas y dimensiones de parcela para algunos cultivos optimizadas bajo el criterio de mínima variabilidad. Son resultados referenciales, dado que la heterogeneidad de los suelos es una variable que depende del lugar en donde se desarrollará el ensayo.

Tabla 1. Dimensiones y tamaño de parcela (unidad de muestreo)*.

Cultivo	Ancho de parcela (m)	Longitud de parcela (m)	Área de parcela (m2)	Metodología	Autor (es)
Arroz			16 a 20	Curvatura máxima	Vargas J. y Navarro J. (2014)
Fréjol caupí	3.6 m (6 surcos a 0.6 m entre ellos)	5 m (a 0.10 m entre plantas)		Regresión múltiple	Escobar C., Buitrago I. y Jaramillo J. (1990)
Fréjol negro	1.2 m (2 surcos a 0.6 m entre ellos)	3.0 m		Regresión múltiple	Mamani L. (1971)
Papa	3.6 a 5.4 m (4 a 6 surcos a 0.9 m entre ellos)	3.3 a 4.8 m (a 0.3 m entre plantas)		Máxima curvatura bivariada/Regresión múltiple	Hernández A. (1982)
Sorgo			9.11	Curvatura máxima	Lechado I. y Rivera J. (1989)
Maíz			4.47	Curvatura máxima	Avilés F. (1971)
	4.0 a 5.0 m (4 a 5 surcos)	5 a 8 m	20 a 40	Máxima curvatura bivariada/Regresión múltiple	Barrientos M. (1981)
Yuca	1.0 a 4.0 m (1 a 4 hileras)	12.0 a 9.6 m (a 0.8 m entre plantas)		Regresión múltiple	Tineo J. y Villasmil J. (1988)
Ajonjolí	3.0 a 4.0 m (4 a 5 surcos)	4.0 a 8.0 m	12.0 a 32	Máxima curvatura bivariada/Regresión múltiple	Barrientos M. (1981)
Tomate	3.6 a 4.5 m (4 a 5 surcos)	6.0 a 6.5 m	24.0 a 30.0	Máxima curvatura bivariada/Regresión múltiple	Bueso M. (1985)
Melón	5.4 m a 10.8 m (3 a 6 surcos)	5.0 a 7.0 m	27.0 a 75.6	Máxima curvatura bivariada/Regresión múltiple	Bueso M. (1985)

*Elaborada por los autores.

Conclusiones y Recomendaciones

La heterogeneidad del suelo es una de las fuentes de variabilidad que inciden mayoritariamente en el error experimental, la cual puede definirse gráficamente, a través de los mapas de heterogeneidad o mediante parámetros de correlación y de varianzas unitarias versus áreas de prueba; desde lo cual se decide el tipo de diseño a utilizar o comparar campos experimentales, respectivamente.

Existen algunas alternativas para establecer el tamaño óptimo y de mínima variabilidad de parcela, cuyo éxito radica en el cuidado extremo de las causas del error experimental, con fundamento estadístico y económico que reside en la modelación matemática como los métodos de regresión múltiple.

Los tamaños adecuados de las parcelas experimentales se definen a partir de múltiples factores, entre los cuales la heterogeneidad del suelo y la condición climática, hacen que esta definición no tenga una aplicación generalizada para los campos experimentales; más bien, es una tarea cuyos resultados están circunscritos a unas condiciones específicas de suelos y zonas climáticas.

Si bien el desarrollo de los experimentos de uniformidad consumen una gran cantidad de tiempo y dinero, al menos en los campos experimentales sería recomendable realizar muestreos de características físicas como el contenido de humedad, que son mediciones rápidas y relativamente no tan costosas que puede servir para elaborar al menos un mapa de heterogeneidad; de tal forma que se pueda definir el tipo de diseño, la dirección del bloqueo y de forma aproximada, el tamaño de parcela.

Literatura citada

Álvarez R., Soto M. y Gómez H., 1986. Tamaño de parcela y número de repeticiones para estimar una población de Spodoptera frugiperda (Smith) y su daño en maíz. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Colombia; 39(2), 5 – 16.

Avilés F., 1971. Determinación del tamaño óptimo de la parcela experimental en maíz (Zea mays) (Tesis para optar por el grado de ingeniero agrónomo). Escuela Nacional de Agricultura y Ganadería, Managua – Nicaragua.

Barrientos M., 1981. Evaluación de cuatro métodos para la determinación del tamaño y forma óptimos de parcela para experimentación agrícola (Tesis de grado para optar por el título de Licenciado agrícola). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Bueso M., 1985. Determinación del tamaño óptimo de parcela experimental en melón (Cucumis melo) para el departamento de Chiquimula, y en tomate (Licopersicum sculentum) para el valle de la Fragua, Zacapa (Tesis de grado para optar por el título de Licenciado agrícola). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Cámara Procultivos ANDI, 2015. Manual para elaboración de protocolos para ensayos de eficacia con PQUA. Instituto Colombiano Agropecuario. Recuperado de http://www.andi.com.co/es/PC/SobProANDI/Documents/Ensayo/Manual%20protocolos%20ensayos%20eficacia%20PQUA.pdf

De La Loma J., (1966). Experimentación agrícola (2da ed.). México: Unión Tipográfica editorial Hispanoamericana UTEHA.

Escobar C., Buitrago I. y Jaramillo J., (1990). Tamaño de parcela y número de repeticiones para ensayos de rendimiento con caupí Vigna unguiculata (L) Walp. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Colombia; 43(1 y 2), 73 – 91.

Escobar J., 1982. La heterogeneidad del suelo y los ensayos de uniformidad. Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

FAO, 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Foro de expertos de alto nivel: Roma – Italia. Recuperado: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf

González G., (1985). Métodos estadísticos y principios de diseño experimental (2da. ed.). Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Hernández A., 1982. Determinación de tamaño óptimo de parcela para estudios experimentales en dos variedades de papa (Solanum tuberosum L.) en el altiplano central de Guatemala (Tesis para optar por el grado de ingeniero agrónomo). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Lechado I. y Rivera J., 1989. Determinación del tamaño óptimo de la parcela

experimental en el cultivo de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) (Tesis para optar por el grado de ingeniero agrónomo). Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias (ISCA), Managua – Nicaragua.

Mamani L., 1971. Determinación del tamaño, repetición y forma de la parcela para ensayos de rendimiento en frijol (Phaseolus vulgaris L.) (Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Turrialba – Costa Rica.

Mayor V., Blair M. y Muñoz J, 2012. Metodología para determinar el coeficiente de heterogeneidad del suelo, el número de repeticiones y el tamaño de parcela en investigaciones con frijol (Phaseolus vulgaris L.). Acta Agronómica, 61 (1), 32 – 39.

Meneses I., Villanueva C., Mejía J., Molina J. y Miranda S., 2005. Tamaño óptimo de parcela en calabaza asociada con maíz. Chapingo – serie horticultura; 12(1), 27 – 31.

Morera J., Phillips W, Mora A. y Paredes A., Experiencia del CATIE en el uso de diseños de metodologías estadísticas sobre cacao. En Rafle A., Corven J. y Villanueva G. (Eds.), Seminario Regional Diseños experimentales y Metodologías estadísticas en cacao. Honduras: Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola (CIDIA). Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=LjxtAAAAIAAJ&pg=PA25&dq=tama%C3%B1os+de+parcela+experimental&hl=es-419&sa=X&redir_v=onepage&q=tama%C3%B1os%20de%20parcela%20experimental&f=false

Muñoz A., 1974. Tamaño de la parcela, Diseño y uso de los factoriales en la experimentación agrícola. México: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Folleto misceláneo N° 25.

Reyes P., (1984). Diseño de experimentos aplicados (2da. ed.). México: Editorial Trillas.

Roselló E. y Fernández M., 1993. Guía técnica para el ensayo de variedades de campo. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal: Roma – Italia. Disponible: https://books.google.com.ec/books?id=sBUfbReUJqQC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false

Smith H., 1938. An empirical low describing heterogeneity in the yield of agricultura crops. J. Agric. Sci. 28: 1 – 23.

Tineo J. y Villasmil J., 1988. Determinación del tamaño óptimo de parcela experimental en yuca (Manihot esculenta Crantz). Revista de la Facultad de Agronomía, Venezuela; 7(2), 116 – 126.

Vargas J. y Navarro., 2014. Determinación de un tamaño adecuado de unidad experimental, utilizando el método de curvatura máxima, para ensayos de arroz (Oryza sativa), en Bagaces, Guanacaste. Revista de las Sedes Regionales, 15 (31), 128 – 144.