

**Ministerio de Educación Superior  
Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”  
Facultad de Agronomía**



**Tesis presentada en opción al Título Académico  
Master en Ciencias Agrícolas**

*Evaluación de cultivares de caña de azúcar, en  
su adaptabilidad a diferentes localidades de  
Matanzas bajo condiciones de secano*

**Autora: Ing. Sandra Vidal Guerra**

**Matanzas**

**2013**

**Ministerio de Educación Superior**  
**Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”**  
**Facultad de Agronomía**



**Tesis presentada en opción al Título Académico**  
**Master en Ciencias Agrícolas**

**Evaluación de cultivares de caña de azúcar,**  
**en su adaptabilidad a diferentes localidades**  
**de Matanzas bajo condiciones de secano**

**Autora:** Ing. Sandra Vidal Guerra

**Tutor:** Ing. Gelasio Pérez Oramas Dr. C.

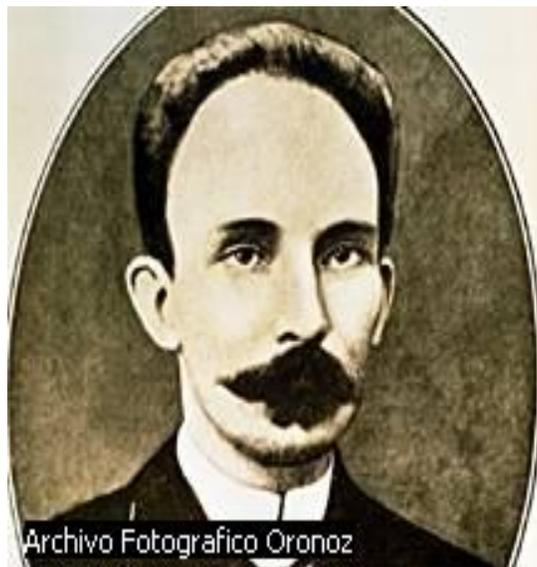
Matanzas

2013

## *Pensamiento*

*“Al progreso agrícola deben enderezarse todos los esfuerzos, [...] todas las inteligencias a prestarle ayuda”.*

*José Martí*



# *Agradecimientos*

*Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a todos los que han hecho posible la presentación de esta tesis, sin los cuales no habría podido llegar a su culminación:*

*A la Revolución cubana y en particular, a su líder Histórico Fidel Castro, por sus enseñanzas y su ejemplo.*

*A mis padres, por su esfuerzo y amor.*

*A mi esposo, por el amor, la confianza y apoyo brindado .*

*A toda mi familia, por la paciencia, la comprensión y el apoyo incondicional*

*A mi tutor, Dr. Gelasio Pérez Oramas, quien con su constante apoyo, exigencia y dedicación, me condujo a la culminación de la tesis .*

*Al Ing. Lorenzo Cabrera Miranda y al Dr. Reynaldo Rodríguez Gross, por su valiosa ayuda y dedicado empeño.*

*Al Dr. Antonio Chinae Martín, por las enseñanzas brindadas y su dedicación.*

*Al Dr. Pedro Luis Cortegaza, Dr. Héctor García Pérez, MSc. Irenaldo Delgado Moya, Ing. Camilo Torres Negrones, MSc. José Cirilo Acosta Granados, Lic. Antonio Chinae Horta y Ing. Joaquín Ruiz Traba, por el aporte brindado.*

*A mis compañeros de la Maestría, por sus valiosos consejos y solidaridad.*

*A los profesores de la Maestría, por su abnegada entrega .*

*A mis compañeras de trabajo, Marieta Díaz Guerra, Olivia Rosales Torres y Yoanni Leiva Vinaiza.*

*A María del C. Pino Alonso, Joaquín Ruíz Oropesa, Yilian Bertha Walker Bauza y Lisset Casabona Dihigo.*

*A todos los trabajadores de la EPICA de Jovellanos.*

*Para con todas las personas que de una forma u otra han participado en la realización de este trabajo, tengo una imperecedera deuda de GRACIAS.*

*Muchas Gracias*

# *Dedicatoria*

*A mis hijos Melissa y David*

## Resumen

En los últimos años debido al cambio climático, se han acentuado los eventos de sequía y el riego sólo cubre 3,7% de las áreas cañeras del País, por lo que se hace necesario realizar un adecuado manejo de los cultivares en los diferentes ambientes. Bajo estas premisas, fueron diseñados y establecidos cuatro experimentos en Bloques al Azar, en cuatro localidades de la provincia de Matanzas, donde se evaluaron 26 cultivares de caña de azúcar en la época de frío y en las cepas de caña planta y primer retoño, teniendo como objetivo, evaluar estos cultivares en condiciones de secano en estos sitios de prueba. Se utilizaron 15 variables, 3 relacionadas con el rendimiento en los genotipos estudiados, 9 variables de clima y 3 de suelo. Se aplicaron métodos uni y multivariados para evaluar ambientes y genotipos a través de los modelos AMMI y Coordenadas Principales. Se obtuvo como resultado diferencias en la caracterización de los ambientes, siendo la localidad Máximo Gómez la más contrastante. El ambiente fue el que mayor contribución tuvo a la variación fenotípica total en ambas cepas. Se pudo determinar los cultivares de mejor adaptación a cada localidad y los más estables en todos los ambientes, en las variables de cosecha evaluadas, recomendándose la incorporación de los mismos a los proyectos de cultivares de las Unidades Empresariales de Base (UEBs) Azucareras, estudiadas en la provincia de Matanzas.

---

## Índice

1. Introducción .....	1
2. Revisión bibliográfica .....	4
2.1. Origen y taxonomía de la caña de azúcar .....	4
2.1.1. Importancia del cultivo de la caña de azúcar .....	5
2.1.2. Sitios de selección del programa de mejora y destino de los cultivares.....	5
2.2. Principales suelos dedicados a caña de azúcar y áreas con estrés por sequía en Cuba .....	6
2.2.1. Factores limitantes para la producción cañera .....	7
2.3. Requerimientos hídricos de la caña de azúcar .....	8
2.3.1. El clima en Cuba y su impacto en la agricultura .....	9
2.3.2. Fisiología de las plantas en estrés por déficit hídrico .....	11
2.3.3. Mecanismos de resistencia al estrés por déficit hídrico .....	11
2.4. Mejoramiento genético de la caña de azúcar .....	12
2.4.1. Mejoramiento genético para la tolerancia a las condiciones de estrés ambiental .....	13
2.4.2. La interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la caña de azúcar .....	16
2.4.3. Caracterización y clasificación de ambientes .....	18
2.4.3.1. Herramientas estadísticas utilizadas en la evaluación de ambientes .....	19
2.4.4. Estabilidad y adaptabilidad fenotípica. Métodos estadísticos para su estimación.....	20
2.4.4.1. Modelos AMMI .....	22
3. Materiales y métodos .....	24
3.1 Caracterización de los ambientes de producción .....	24
3.2. Estudio de la interacción genotipo-ambiente .....	25
3.2.1. Modelos empleados en la determinación de las fuentes de I. GXA	27

3.3. Análisis de la adaptabilidad y estabilidad fenotípica .....	28
3.3.1. Modelo AMMI .....	28
4. Resultados y discusión .....	30
4.1. Caracterización de los ambientes de producción donde se desarrolla la caña de azúcar .....	30
4.2. Estudio de la Interacción Genotipo – Ambiente .....	33
4.3. Adaptabilidad y estabilidad fenotípica para las variables de cosecha ....	37
4.3.1. Para porcentaje de Pol en caña (PPC) .....	37
4.3.2. Para el rendimiento agrícola (TCHA) .....	39
4.3.3. Para el rendimiento en azúcar (TPHA) .....	41
5. Conclusiones .....	44
6. Recomendaciones .....	45
7. Referencias bibliográficas .....	46
8. Anexos .....	62

## 1. Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es uno de los cultivos agroindustriales más importantes a nivel mundial con un área comercial de 23, 875, 176ha, en cerca de 80 países (Patade y col., 2008; FAO-Stat., 2012). Desde el punto de vista industrial, constituye la principal fuente de obtención de azúcar y edulcorantes (alrededor del 70%) y más recientemente, ha incrementado su importancia en la elaboración de subproductos tales como el etanol, alimento animal y biocombustibles (Patade y Suprasanna, 2008).

En Cuba, la caña de azúcar representó el cultivo agrícola principal, donde llegó a ocupar hasta 1,5 millones de hectáreas, que representaron el 40% del área total cultivable. La agroindustria azucarera cubana a partir del año 2002, redujo sustancialmente el número de ingenios y el área dedicada al cultivo (Jorge y col., 2007).

Este proceso toma como base la evaluación de la aptitud física de las tierras, destinándose a la producción de caña los suelos de mayor calidad (aptos y moderadamente aptos). No obstante, aún no podrá prescindirse de áreas dentro de estas categorías con limitaciones, fundamentalmente por su excesivo drenaje, donde la acción combinada de los bajos acumulados anuales de precipitaciones y la escasa retención de humedad del suelo, producen estrés por déficit hídrico. En la provincia de Matanzas las áreas con estas características alcanzan 23,0%, lo cual influye negativamente en los rendimientos cañeros.

Desde finales de la década de los años 70 del pasado siglo, el clima mundial, registra cambios importantes como el aumento de la temperatura mínima y media del aire en 1,4 y 0,6°C, respectivamente. En Cuba los eventos de sequía meteorológica en los últimos años han sido acentuados y el 96,3% del área agrícola dedicada a caña de azúcar se encuentra bajo condiciones de secano, con rendimientos agrícolas que no superan el 60% de su potencial (MINAZ, 2009).

El estrés por déficit hídrico es uno de los factores más importantes que limitan la producción de caña de azúcar, especialmente en las áreas donde existe un periodo prolongado de sequía. En estas condiciones, el uso de cultivares tolerantes es la vía más adecuada, práctica y económica para resolver los problemas derivados de la baja pluviosidad, que se presentan actualmente a nivel mundial (Silva y col., 2007).

Las difíciles circunstancias enfrentadas por la agroindustria azucarera en Cuba durante los últimos años, motivaron un reordenamiento de las investigaciones y de los sitios de prueba de nuevos cultivares, lo cual provoca una menor correspondencia entre los ambientes de selección genética y los ambientes de destino.

Diversos estudios de la interacción genotipo-ambiente (I. GXA) en cultivares de caña de azúcar, señalan la significación de este fenómeno, lo que apunta a la necesaria evaluación multiambiental de los genotipos durante el programa de mejoramiento genético y posteriormente, en los estudios para su liberación en plantaciones comerciales. En Cuba se han llevado a cabo numerosos estudios relacionados con la evaluación de genotipos en diferentes ambientes de producción (I. GXA) y sus implicaciones en el mejoramiento de los rendimientos cañeros y azucareros, bajo condiciones normales de producción (García, 2004; Gilbert y col., 2006 y Rodríguez, 2012).

Las principales investigaciones relacionadas con la evaluación de cultivares a las condiciones de sequía han sido ejecutadas en zonas de las provincias de Holguín, Villa Clara y Cienfuegos, fundamentalmente en etapas iniciales e intermedias del proceso de selección de nuevos cultivares, pero estos resultados son insuficientes para complementar la evaluación y recomendación de cultivares desarrollados en otras zonas geográficas también sometidas a condiciones de estrés por sequía agrícola, por lo que:

La presente Tesis de Maestría pretende dar respuesta al siguiente:

## **Problema científico**

El insuficiente conocimiento del comportamiento de los cultivares comerciales de caña de azúcar en condiciones de secano, limita la adecuada selección y recomendación para el manejo de los genotipos en las diferentes condiciones edafoclimáticas de las unidades productoras de la provincia de Matanzas.

Con vistas a dar respuesta a la problemática anterior, se desarrolló la siguiente:

## **Hipótesis**

Si se conociera el comportamiento de los cultivares comerciales de caña de azúcar bajo condiciones de secano, se pudiera realizar una mejor recomendación de los genotipos más adaptados a las diferentes condiciones edafoclimáticas de la provincia y permitiría incrementar los resultados agroazucareros de las unidades productoras.

Para dar cumplimiento a los elementos planteados en la hipótesis anterior, fueron trazados los objetivos siguientes:

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar el comportamiento de cultivares comerciales de caña de azúcar en condiciones de secano, en diferentes localidades de la provincia Matanzas.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar los ambientes de producción cañera de diferentes zonas geográficas de la provincia Matanzas.
2. Determinar las fuentes principales de la interacción genotipo-ambiente y su contribución relativa en los sitios estudiados.
3. Evaluar la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de cultivares de caña de azúcar en condiciones de secano, para recomendar los que resulten más tolerantes.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Origen y taxonomía de la caña de azúcar

La caña de azúcar, *Saccharum spp.* (híbrido), como planta cultivada se originó en Nueva Guinea (Grassl, 1974), y en su proceso evolutivo representó un papel importante la introgresión entre los géneros *Ripidium*, *Sclerostachya* y *Miscanthus*, con un alto nivel de variación y ploidía, lo que originó un grupo de especies que componen el género *Saccharum*: *S. spontaneum*, la más variable en su número de cromosomas ( $2n= 40$  a  $128$ ) y sus formas se derivaron a *S. robustum*, *S. sinense*, *S. barberi* y *S. officinarum*, esta última fue el producto más eficiente de este proceso evolutivo (Bremer, 1925; Grassl, 1977).

La caña de azúcar cultivada actualmente es un conjunto de cultivares híbridos intergenéricos, pertenecientes al Complejo *Saccharum*, con la participación de diferentes géneros afines como *Erianthus*, *Imperata*, *Miscanthus*, *Miscanthidium*, *Narenga*, *Sclerotachya*, así como se ha señalado que también pueden lograrse híbridos, a partir de *Sorghum* y *Bambusa* (Mukherjee, 1957; Watson y Dallwitz, 2011).

Estudios detallados de Taxonomía Clásica del Género *Saccharum* fueron realizados por Daniels y Roach (1987), con el propósito de utilizarlos en hibridaciones artificiales, para mejorar los caracteres agronómicos de la caña, así como obtener resistencia a plagas de insectos, enfermedades y condiciones ambientales adversas.

La nueva clasificación APG (Angiosperm Phylogeny Group) se inició en 1998, conocida como APG-I. Luego, fue corregida en 2003 y apareció el APG -II. El APG-III es la última versión ya corregida que apareció en el año 2009 (Wikipedia, 2011).

La Taxonomía APG III, es filogenética, basada en criterios moleculares del ADN contenido en el Núcleo, Mitocondrias y Cloroplastos. La APG III es estructurada en: **1- Super-Reino:** *Eukaryota*; **2- Reino:** *Plantae*; **3.1- Clado:** *Angiospermae*; **4.2- Clado:** *Monocotyledoneae*; **5.3- Clado:** *Commelinides*; **6- Orden:** *Poales*; **7- Familia:** *Poaceae*; **8.4- Clado:** *PACCAD*: compuesto de

las Subfamilias: *Panicoideae*. *Arundinoideae*. *Chlorideae*. *Centothecoideae*. *Aristoideae* y *Danthonoideae* **9- Subfamilia:** *Panicoideae*; **10- Tribus:** *Andropogoneae*; **11- Género:** *Saccharum*; **12- Especies;** **13- Variedades y 14- Cultivares** (Arévalo y China, 2012).

### **2.1.1. Importancia del cultivo de la caña de azúcar**

La caña de azúcar es un cultivo tropical de gran importancia a nivel mundial. Su asombrosa capacidad de acumular grandes niveles de sacarosa (cerca de 0,7 M) la convierte en única dentro de las plantas cultivadas. Se cultiva en más de 23 millones de hectáreas (FAO-Stat., 2012), tanto en regiones tropicales como subtropicales, que producen más de 1,3 billones de toneladas métricas de tallos molibles (Menossi y col., 2008). Generalmente las dos terceras partes de la producción mundial se destinan a la obtención de azúcar. Sin embargo, en la actualidad la producción de etanol (derivado de la caña de azúcar) está ganando mucha atención como una fuente de biocombustible renovable. La producción de bagazo (mayor producto de desecho generado por la industria azucarera) se utiliza para la producción de energía para la propia fábrica y también se destina a la alimentación animal y la producción de papel, aumentando la eficiencia del cultivo (Menossi y col., 2008).

### **2.1.2. Sitios de selección del programa de mejora y destino de los cultivares**

Como consecuencia de la reestructuración de la industria azucarera, la red experimental del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) fue ajustada según los requerimientos y exigencias de las nuevas concepciones de la Agroindustria Cubana (Jorge y col., 2010).

Actualmente el INICA cuenta con cinco Estaciones Experimentales, ubicadas en las provincias de Matanzas, Villa Clara, Camagüey, Holguín y Santiago de Cuba, donde se desarrolla el programa completo de mejoramiento genético, mientras que la provincia de La Habana, Ciego de Ávila y Las Tunas sólo desarrollan los estudios multiambientales de cultivares. En la estación de Sancti Spiritus se llevan a cabo los estudios multiambientales de cultivares, además de desarrollar las campañas de hibridación que garantizan la semilla

botánica necesaria, para la obtención de las posturas que demanda todo el país.

La Institución cuenta además con una estación de Cuarentena en la Isla de la Juventud y una Colección de Germoplasma en la provincia de Matanzas, con dos réplicas situadas en Sancti Spiritus y Holguín. Tiene 13 bloques experimentales representativos de los principales suelos en los que se cultiva la caña de azúcar en Cuba (Jorge y col., 2010).

Como solución práctica, para zonas con estrés hídrico (sequía), se cuenta con 53 puntos en todo el país, para la Evaluación Participativa de Cultivares (Pruebas de fuego), los cuales permiten evaluar, dar respuesta rápida y familiarizar al productor con el comportamiento agroproductivo y fitosanitario de los cultivares (Jorge y col., 2005), lo que repercute en su rápida aceptación y propagación.

## **2.2. Principales suelos dedicados a caña de azúcar y áreas con estrés por sequía en Cuba**

La caña de azúcar es un cultivo poco exigente en cuanto a suelos, se ha cultivado económicamente tanto en suelos muy pesados o arcillosos, como en muy ligeros o arenosos. Sus exigencias respecto a suelos se limitan a profundidad, para desarrollar su sistema radical, aireación suficiente, por lo que deben evitarse los problemas de drenaje, tanto interno como superficial, valores de pH que no se alejen demasiado de la neutralidad, salinidad y/o alcalinidad no muy elevada, aún cuando hay diferencias marcadas entre cultivares (Mago, 1986).

Villegas y Benítez (2003), reportan que entre los principales tipos de suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar en Cuba se encuentran los Pardos sialíticos (30,3%), Vertisuelos (22,2%), Ferralítico rojo (14,0%), Ferralítico amarillento (13,2%), Fersialítico pardo (6,1%) y Fluvisol (4,5%). Además, señalan que los suelos aptos pueden, en el 30,3%, presentar estrés por sequía a causa de su excesivo drenaje, lo que en términos prácticos, se conoce como "suelos secantes".

La magnitud del estrés por sequía alcanza 29,8% del área plantada con caña en el país y de manera particular, por provincias llega a proporciones considerables en Camagüey (51,0%), Cienfuegos (47,2%), Villa Clara (42,9%), Granma (35,0% y Matanzas (23,0%).

### **2.2.1. Factores limitantes para la producción cañera**

El cultivo de la caña de azúcar en el mundo se desarrolla sobre una gama muy variada de condiciones edáficas, debido a grandes diferencias o cambios de la cubierta vegetal de los suelos, los cuales son afectados en un sentido u otro de acuerdo con la intensificación del cultivo y las prácticas culturales. Ha quedado demostrado que la caña de azúcar, reacciona sensiblemente con variaciones de la productividad y estado de desarrollo, bajo diferentes condiciones de suelo.

En las plantaciones cañeras se considera un factor limitante del suelo esencialmente, al que reduce el crecimiento y la productividad de la caña de azúcar (Shishov, 1983). Además del déficit de los elementos nutritivos y las propiedades no favorables alcalinas o ácidas, pueden encontrarse otros factores como poca profundidad del perfil del suelo, contenido de piedras, textura arenosa, formación de concreciones, laterización, agrietamiento y endurecimiento de suelos montmorilloníticos, salinización, régimen de lluvia no favorable, deficitario y muy variable, desarrollo de hidromorfismo, entre otros factores limitativos (Pineda, 2002).

En estudios sobre la evaluación de la aptitud física de las tierras dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en Cuba (Benítez y col., 2007), señalan que el factor edáfico limitante de mayor influencia en la evaluación de las tierras no aptas fue la profundidad efectiva de los suelos. Del área con esa categoría de aptitud, el 70% presenta esa limitación, la cual se manifiesta en casi todos los tipos de suelos y es la variable que determina la profundidad a la que las raíces pueden penetrar, de acuerdo con sus características botánicas, sin encontrar barreras físicas o químicas (Ponce de León y Balmaseda, 1999). Otros factores, también importantes son la salinidad, el drenaje y la pedregrosidad con 10, 8 y 5%, respectivamente.

En muchos casos, la corrección de estos factores limitantes, se realiza adicionando el elemento deficitario o modificando favorablemente el factor, lo que conlleva en ambos casos al desembolso de recursos financieros y al incremento de los costos. En este sentido, desempeña un papel importante la disponibilidad de cultivares con cierto grado de tolerancia y con ello, el mejoramiento genético (García, 2004).

### **2.3. Requerimientos hídricos de la caña de azúcar**

En el libro “Ensayo sobre el cultivo de la Caña de Azúcar” (Reynoso, 1862), se define a la caña de azúcar como una planta de regadío, resaltando las exigencias de la misma en ese sentido. Al respecto, se han desarrollado numerosas investigaciones para definir las necesidades de agua (Fonseca y García, 1987), quienes confirmaron el efecto determinante de las épocas de plantación, la evapotranspiración real y la lluvia aprovechable, en la definición de las necesidades de agua para la caña de azúcar en el occidente de Cuba.

González y Cruz (1987), determinaron que en los suelos Ferralíticos rojos, la norma neta total y el número de riegos varía en correspondencia con el año climático y la fecha de plantación o de cosecha, además los mayores requerimientos hídricos correspondieron a la cepa de caña planta de frío, con una norma total de  $7\ 650 - 8\ 100\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , entregados en 17 – 18 riegos, en años secos medios. Hernández (2007), en la empresa mielera “El Salvador” de la provincia Guantánamo, encontró diferencias en los requerimientos hídricos del cultivo en las diferentes cepas (fríos, primaveras quedadas y retoños), reportando consumos totales por cepa de 1 420, 1 830 y 936mm/día, respectivamente.

Guntín y Tejeda (2007), en el norte de la provincia Las Tunas, señalan las diferencias en las necesidades hídricas de la caña de azúcar por tipo de suelo, con normas netas de riego de 287mm para los suelos Pardos con carbonato y 316mm para los Vertisuelos.

Ferrer y col. (2000a, 2000b), a partir de un estudio de un grupo de cultivares de alta, media y baja sensibilidad al estrés hídrico, encontraron que las variables fisiológicas y biofísicas como contenido de fibra, número de hojas activas, termoresistencia de las membranas celulares y los parámetros de fluorescencia variable de los pigmentos clorofílicos, tuvieron un papel importante en la respuesta hídrica de la caña de azúcar.

García y col., (2003), en un estudio sobre sistema de riego por goteo en dos Unidades Básicas de Producción Cooperativa (UBPC), de las provincias La Habana y Granma, en cepa de caña planta, cosechadas con 19 y 20 meses de edad, obtuvieron rendimientos de 206 a 222,8 toneladas de caña por hectárea, respectivamente.

El uso de cultivares tolerantes a la sequía, es la vía más adecuada, práctica y económica para resolver los problemas derivados por baja pluviosidad, que se presentan actualmente a nivel mundial (Singh y Reddy, 1980). De manera generalizada, estos autores coinciden en la variación que introducen en los resultados la utilización de diferentes cultivares, lo que presupone una respuesta genética, la cual puede ser mejorada, con la finalidad de obtener genotipos capaces de aportar producciones económicamente ventajosas en condiciones de estrés hídrico, lo cuál es común aún en condiciones de suelos favorables, donde estas situaciones se presentan en determinados períodos.

### **2.3.1. El clima en Cuba y su impacto en la agricultura**

El territorio cubano está situado en la zona de los climas tropicales y subtropicales, y se halla bajo la influencia de los vientos alisios. La extensión total del Archipiélago Cubano es 110 922km<sup>2</sup>, con una longitud de este a oeste de 1 200km y el ancho de la Isla varía entre 31 y 190km. La lluvia se encuentra desigualmente distribuida, tanto espacial como temporalmente; el 80% de las precipitaciones cae en el período de apenas seis meses. La diferencia en los valores de evaporación media anual totaliza más de 300mm, entre la provincia de Pinar del Río (1 700mm) y Guantánamo (2 005mm). Este comportamiento, unido al de las lluvias, determina que el clima en su conjunto sea más árido en la Región Oriental, por lo que en esa zona los efectos de la sequía y los

procesos de desertificación y salinización son mucho más acentuados que en las demás provincias (Pérez y col., 2004).

En el contexto de la agricultura, la sequía no comienza cuando cesa la lluvia, sino cuando las raíces de las plantas no pueden obtener más humedad del suelo (Centella y col., 2006). Según la Organización Meteorológica Mundial, hay sequía agrícola cuando la cantidad de precipitación y su distribución, las reservas de agua del suelo y las pérdidas debidas a la evaporación se combinan para causar disminuciones considerables del rendimiento de los cultivos y del ganado. Existen tantas definiciones de sequía como objetivos hay para definir las; sin embargo, un denominador común en todas las definiciones es la escasez de precipitaciones, con respecto a un comportamiento normal (ONS, 2008).

Desde finales de la década de los 70 del siglo pasado, el clima cubano registra cambios importantes, como es el aumento de la temperatura media del aire en 0,6°C, acompañado de una elevación del valor promedio de la mínima cercana a 1,4°C. En el caso particular de la sequía, los eventos moderados y severos se duplicaron en el período de 1961-1990, respecto al período anterior 1931-1960, con déficit en los acumulados anuales de lluvias en el orden del 10%, concentrándose esa disminución en los meses del período húmedo mayo-octubre (Lapinel y col., 2010).

La agricultura es el sector de la economía más susceptible a las variaciones del clima. Los numerosos estudios que existen indican una fuerte oscilación local y regional, tanto en el volumen de cosecha de los diferentes cultivos, como el riesgo de producción frente a los cambios climáticos (Jorge y García, 1994). El período de crecimiento en algunos cultivos se acortará en algunas regiones en 3-4 semanas, en otras se observará una prolongación. Se modificará, no sólo la fecha de cosecha, sino también el desarrollo de los estadios de crecimiento (Hartmut y col., 2001).

Los estudios científicos sobre cultivares adaptados a condiciones de estrés hídrico y salino, las tecnologías para áreas marginales, el uso del riego con

técnicas ahorradoras de agua y de energía, entre otros, ponen a Cuba en condiciones de contribuir a la mitigación por los efectos del cambio climático que se producirá sobre la agricultura.

### **2.3.2. Fisiología de las plantas en estrés por déficit hídrico**

Cuando una planta está sometida a unas condiciones significativamente diferentes de las óptimas para la vida, se dice que está sometida a estrés. La respuesta del organismo puede ser una deformación o cambio físico (rotura de membranas celulares, flujo citoplasmático, etc.) o una deformación química (cambios en la síntesis de metabolitos, según Valladares, 2004).

El estrés hídrico moderado puede tener un efecto considerable sobre el metabolismo de las plantas, dependiendo no sólo de la especie y el genotipo, sino también de la duración e intensidad (Muriel y Guerra, 1984). La pérdida de agua por transpiración es inevitable, pues la planta necesita abrir los estomas para facilitar la absorción de CO<sub>2</sub>. Esta absorción es consecuencia de la pérdida de humedad por transpiración, indicando el equilibrio de estos dos procesos, signos del estado hídrico de la planta. Cuando este equilibrio se pierde, las células y tejidos se deshidratan incrementando su temperatura (Henckel, 1964). A partir de este momento, se inicia una serie de ajustes como: cierre estomático, disminución del proceso fotosintético y transpiratorio, suspensión de la división celular y reducción del alargamiento de las células, alteración de los procesos hormonales y como consecuencia, la reducción del crecimiento (Bennett y col., 1987).

### **2.3.3. Mecanismos de resistencia al estrés por déficit hídrico**

El conocimiento de los mecanismos de resistencia al estrés permiten comprender los procesos evolutivos implicados en la adaptación de las plantas a un ambiente adverso y predecir hasta cierto punto, la respuesta vegetal al incremento de la adversidad (Valladares, 2004). La resistencia a la sequía es conferida a las plantas por alguno o por la combinación de cuatro mecanismos: escape, evasión, tolerancia y recuperación. Cada uno de ellos incluye varios caracteres que pueden ser manejados por los mejoradores de plantas (Arrandea, 1989).

**Escape:** Capacidad fisiológica de la planta para escapar al efecto de la sequía, completando su ciclo vegetativo antes de que se presente el estrés de humedad.

**Evasión:** Propiedad genético-fisiológica de la planta para evitar los efectos de la sequía por dos vías importantes: mantener el nivel de hidratación de los tejidos a causa del desarrollo de sus raíces profundas y reducción del flujo de agua de los tejidos, tallos y hojas; disminuir la pérdida de agua debido al cierre rápido de los estomas y enrollamiento de sus hojas, lo que disminuye la superficie evaporativa, ayudado por la plasticidad y serosidad de las cutículas de las mismas.

**Tolerancia:** Habilidad del citoplasma de las células para sobrevivir y funcionar normalmente, aunque los tejidos de la planta se dessequen o tengan potenciales de agua reducidos, a fin de poder soportar el déficit de presión y difusión de la misma. Es la resultante de interacciones fisiológicas complejas que involucran procesos de osmoregulación.

**Recuperación:** Consiste en la habilidad genético-fisiológica de las plantas para reanudar su desarrollo fenológico, después de un período de carencia de humedad del suelo; la velocidad con que se presenta está asociada al mayor contenido de agua o potencial hídrico (Bhattachargee y col., 1971).

#### **2.4. Mejoramiento genético de la caña de azúcar**

Los cultivares comerciales de caña de azúcar son híbridos originados de progenies procedentes de cruces entre cañas “nobles” (*S. officinarum* L.) y silvestres (*S. spontaneum* L., *S. sinense* Roxb., *S. barberi* Jesw.), que fueron retrocruzados con *S. officinarum* en un proceso llamado “nobilización” (Edme y col., 2005).

En los principales cultivos de los Estados Unidos de América se ha estimado la contribución del mejoramiento genético, en el incremento de los rendimientos, en alrededor de 50% (Duvick, 1992; Frisvold y col., 1999). Por su parte, Baver (1963) y Hogarth (1976) en Hawaii y Australia, respectivamente, atribuyeron el

50 y 75% del incremento de los rendimientos de la caña de azúcar al mejoramiento genético.

Los trabajos de mejora genética en Cuba se iniciaron en 1905, en el Jardín Botánico de la Universidad de Harvard, en el antiguo central Soledad, actualmente Pepito Tey, en la provincia de Cienfuegos (Abrantes, 1986 ). Hasta 1953, no hubo un programa de mejora bien organizado para la caña de azúcar, realizándose cruzamientos en diferentes regiones del país .

Con la creación del INICA, en 1964 por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, el resultado más relevante se ha obtenido en el mejoramiento del rendimiento en caña. Esto se ha visto reflejado en el incremento de los cultivares obtenidos por el programa nacional de mejoramiento genético , en la composición de cultivares del país; en 1943 sólo el 2% del área cañera nacional estaba ocupada por cultivares cubanos, en 1979 era el 36% (Bernal y col., 1997) y al cierre del año 2011, estas ocupan el 84,6% (INICA, 2012).

Otra línea del mejoramiento genético de la caña de azúcar en el país, ha sido la obtención de cultivares de alto contenido azucarero, siendo reportada como una tecnología con incidencia relevante en el incremento de la rentabilidad, productividad y sostenibilidad de la producción azucarera (González y col., 2001). También se ha trabajado en la obtención de cultivares para la producción de biomasa, ya sea para ser utilizadas como alimento animal (Milanes y col., 1997; Jorge y col., 2003) o para la producción de energía (Campo y col., 1998) y se dan los primeros pasos para dar respuesta a las áreas afectadas por sequía, salinidad y mal drenaje (Cruz, 2000; García, 2004).

#### **2.4.1. Mejoramiento genético para la tolerancia a las condiciones de estrés ambiental**

La resistencia ante condiciones ambientales adversas constituye uno de los principales objetivos del mejoramiento genético actual. Su naturaleza es generalmente de origen poligénico y los métodos para su obtención son muy diversos (Cornide y col., 1985).

Según Hall (1990), las respuestas de las plantas al estrés ambiental se debe a caracteres que se expresan en los cuatro niveles de organización: desarrollo, estructural, fisiológico y metabólico; de ese modo, mientras unas plantas presentan una gran plasticidad fenotípica, en otras la tolerancia muestra claramente una base genética que parece depender de varios genes con caracteres aditivos y dominantes.

La eficiencia de la selección, en un grupo de ambientes bajo estrés, es una función de la repetibilidad o heredabilidad en sentido amplio, del carácter medido en el ambiente de selección y de la correlación genética con el rendimiento bajo estrés en el grupo de ambientes (Atlin y Frey, 1990). En el cultivo del arroz, los mayores esfuerzos han sido dirigidos sobre el análisis genético de caracteres tales como arquitectura del sistema de raíces, potencial de agua en las hojas, ajuste osmótico y contenido relativo de agua (Jongdee y col., 2002; Pantuwan y col., 2002; Toorchi y col., 2003). Sin embargo, esos caracteres carecen de una alta heredabilidad, en condiciones de estrés por déficit hídrico (Atlin y Lafitte, 2002).

En la evolución de los mecanismos de resistencia o tolerancia de las plantas a los diferentes agentes estresantes, puede observarse la existencia de grados de susceptibilidad y de resistencia muy diferentes, lo cual depende de la diversidad de mecanismos que han desarrollado las plantas a través de su curso evolutivo (Iglesias, 1994a).

En los últimos años, la resistencia a las altas y bajas temperaturas está siendo obtenida para algunos cultivos como la papa (Estévez y col., 1994), arroz (García y González, 1997; Bernier y col., 2007), soya (Ortiz y col., 2000; Samarah y col., 2006), tomate (Iglesias, 1995; Martínez y col., 2000; Florido y col., 2000), trigo (González y col., 2005) y la caña de azúcar no ha quedado al margen de esa dirección del mejoramiento genético. Al respecto, Jorge y col. (2000), al hacer un análisis del Programa de Mejoramiento para los suelos de mal drenaje iniciado por el INICA en 1996, señalan que el mismo ha liberado siete nuevos cultivares que alcanzan más de 20 mil ha en el país, todos los cuales presentan una buena adaptación a los ciclos largos de cosecha, que es

uno de los manejos principales en estas zonas. Por otra parte, Cruz y col. (2000), con referencia a las perspectivas del mejoramiento de la caña para las condiciones de estrés hidrosalino de la provincia Holguín, mencionaron que los métodos de mejora convencionales tienen amplias posibilidades en el mejoramiento de la tolerancia de la caña de azúcar a la sequía y la salinidad.

Los avances en el conocimiento de los aspectos fisiológicos y genéticos de la resistencia a la sequía, auguran una amplia aplicación en el mejoramiento de la caña de azúcar. Cruz (2001), señala que en Mauricio durante la última década se han fortalecido los trabajos de mejora para la adaptación específica, esto le ha permitido recomendar dos cultivares tolerantes a la sequía.

Aunque se han reportado adaptaciones morfológicas de la caña de azúcar para resistir la sequía, se plantea que la tolerancia radica fundamentalmente a nivel celular (Gómez y col., 1981a). De los genes que se expresan durante las condiciones de estrés abiótico, los que mejor han sido caracterizados son los implicados en la respuesta al calor (Iglesias, 1994b).

Cuando las temperaturas ambientales alcanzan un cierto nivel en la naturaleza, se dispara un mecanismo de aclimatación, lo cual conduce a un incremento de la tolerancia al calor y le permite a las plantas lograr un proceso de endurecimiento más severo ante este estrés, entonces la selección para la resistencia a la sequía debe realizarse más bien por la adaptabilidad al calor, que por los niveles de preaclimatación (Iglesias, 1994a).

Otra de las reacciones defensivas de la planta frente al déficit de agua radica en la producción de grandes cantidades de ácido abscísico, que reduce los procesos de crecimiento, afectando las concentraciones normales de pigmentos en las hojas. Desde el punto de vista molecular, la respuesta puede estar dada por la inducción de proteínas "heat shock" (HSP), las que están codificadas por familias multigénicas, se expresan de forma coordinada y muestran diferencias sustanciales en cuanto a tamaño y peso (Gómez y col., 1981b).

Del análisis de los aspectos tratados hasta aquí, con referencia a la mejora para las condiciones de sequía, resulta obvio que la resistencia a la sequía está presente en las plantas y su mayor o menor expresión obedece a la presencia de sustancias hidrofílicas en el protoplasma y en la habilidad de sintetizar ciertas proteínas. Estas son fabricadas por la planta durante su desarrollo bajo la influencia del déficit de agua, por lo que no están involucradas en la tolerancia innata a una sequía inesperada y súbita (De Armas y col., 1988).

#### **2.4.2. La interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la caña de azúcar**

El fenotipo de un individuo es determinado por el genotipo y por el ambiente, estos dos efectos no siempre son aditivos, lo cual indica que las interacciones genotipo-ambiente (I. GXA) están presentes. El resultado de esta interacción es la inconsistencia en el comportamiento de los genotipos a través de los ambientes (Magari y Kang, 1993; Martín, 2004).

Campbell y Jones (2005) definen la I. GXA como la respuesta diferencial de un genotipo o cultivar para un carácter dado, a través de diferentes ambientes y es un fenómeno natural que forma parte de la evolución de las especies. Sus efectos permiten el cruzamiento de genotipos aptos a un ambiente específico, así como de comportamiento general, aptos a varios ambientes (Lavoranti, 2003).

Este fenómeno es una de las preocupaciones principales de los mejoradores, por dos razones: primero, porque reduce el progreso de selección (Cooper y Delacy, 1994; Delacy y col., 1996; Kang y Magari, 1996) y segundo, porque hace imposible interpretar los efectos principales (debidos, exclusivamente, a los genotipos o al ambiente). Bajo estas condiciones, individuos o poblaciones que exhiben características promisorias en un ambiente determinado, pueden resultar inadecuados en otros, siendo un importante efecto de la I. GXA, el de reducir las correlaciones entre el genotipo y el fenotipo (Falconer, 1970 y Gálvez, 1978).

La evaluación de genotipos a través de distintos ambientes, principalmente aquellos más contrastantes, es una de las prácticas más usuales para la

recomendación de nuevos cultivares a los productores de una región o zona específica (Gordón y col., 2006). La ocurrencia a menudo de I. GXA en ensayos multiambientales exige la realización de estudios adicionales, con el propósito de precisar la selección de individuos con adaptabilidad general y específica (Alejos y col., 2006).

Bidinger y col., (1996) y Kang (1998), al referirse a las causas que determinan la existencia de I. GXA, plantearon que la mayor interacción puede esperarse cuando por una parte existe una amplia variabilidad entre los genotipos, para caracteres morfofisiológicos, que confieren la resistencia (o susceptibilidad) a uno o más tipos de estrés, y por otra, cuando es apreciable una amplia variación entre los ambientes, para la incidencia de los mismos tipos de estrés (determinados por el clima, el suelo, factores bióticos y factores de manejo).

En Cuba, durante las últimas tres décadas, se han realizado numerosos estudios relacionados con el tema de la I. GXA y sus implicaciones en el mejoramiento de los rendimientos cañeros y azucareros, los que han abarcado diferentes regiones y provincias, fundamentalmente, en etapas finales del proceso de selección de cultivares. En la región occidental, se destaca el trabajo de Gálvez (1978); en la zona central, los de López (1986), Jorge (1996) y García (2004), y en la oriental, los trabajos de Bernal (1986), Castro (1991), González (1995), Rodríguez y col., (2010) y Rodríguez (2012), los cuáles revelan una elevada proporción del componente ambiental, superior para el rendimiento agrícola, con relación al industrial, y la importancia de la repetición de los estudios en tiempo y espacio, para explotar de manera conveniente, la I. GXA existente. No obstante, el estudio de este aspecto no ha sido abordado con amplitud en los últimos 15 años, a pesar de los grandes cambios producidos en la Industria Azucarera Cubana.

García (2004), en la región central del país, en un estudio bajo condiciones de estrés hídrico, señaló la no existencia de solapamientos entre los diferentes ambientes estudiados, y una mayor magnitud de la contribución del ambiente respecto a otros reportes. Esto hace suponer que en estas condiciones de sequía su efecto se acentúa, lo que sugiere que la selección para este tipo de

estrés solo será efectiva bajo tales condiciones. Este mismo autor, al tener en cuenta las variables hidrofísicas del suelo y fisiológicas, que se asociaron con el estrés por sequía, recomienda que los trabajos de mejora deberán encaminarse hacia la búsqueda de genotipos con sistemas radicales capaces de aprovechar el agua muy eficientemente, así como, de masa foliar provista de mecanismos que le permitan atenuar el desbalance entre la lluvia y la evapotranspiración.

Resulta común en todos los estudios realizados, con excepción de García (2004), que los mismos fueron desarrollados en condiciones normales, sin estrés, y si en algún caso estuvieron presentes, no fueron considerados como tales, por lo que reviste gran importancia la evaluación de este fenómeno bajo niveles contrastantes, como los que están presentes actualmente en más del 30,3% de las áreas cultivadas del país. Por tanto, la revisión del significado del ambiente, el genotipo y la interacción genotipo -ambiente en cultivares que se liberan a las áreas de producción, es importante no sólo para la verificación de los resultados del programa de mejora, sino para la elección de los cultivares por parte de los productores (Gilbert y col., 2006).

#### **2.4.3. Caracterización y clasificación de ambientes**

Numerosas investigaciones reportan que los efectos ambientales en el rendimiento de la caña de azúcar, pueden deberse a múltiples causas: deficiencia de los nutrientes (Anderson y col., 1995), presión de las enfermedades (Magarey y Mewing, 1994) o diferencias en la combinación suelo-clima (Bernal, 1986; Castro, 1991; Gilbert y col., 2006). Bajo estas condiciones, la magnitud I. GXA resulta importante, por lo que puede fracasar la diferenciación de la respuesta de los genotipos a través de los ambientes (Collaku y col., 2002).

En tal sentido, los principales programas de fitomejoramiento del mundo cañero, han prestado atención a la clasificación de los ambientes de prueba con el objetivo de verificar las similitudes y disimilitudes entre los mismos y cuál es el origen de las mismas (Collaku y col., 2002; Glaz y Kang, 2008).

Los resultados prácticos posibles a obtener serían la reducción de aquellos ambientes con similares poderes de discriminación de los genotipos, o la adopción de los más ventajosos, de acuerdo a las posibilidades prácticas de conducir los estudios en los mismos. Para este último objetivo, se tendría en cuenta la evaluación, en cada uno de los parámetros genético -estadísticos y de esta forma, seleccionar aquellos ambientes donde su magnitud sea mayor y por consiguiente, mayor será también la eficiencia de la selección (Hamdi, 2009).

#### **2.4.3.1. Herramientas estadísticas utilizadas en la evaluación de ambientes**

El Análisis de Componentes Principales (ACP) ha sido la técnica estadística multivariada de más amplio uso en la clasificación de ambientes, por su capacidad de reducción de las variables originales suficientemente bien correlacionadas, en unos pocos factores o componentes no correlacionados, capaces de explicar en gran medida la variabilidad de la muestra original (Annicchiariaco, 2002). Bernal (1986), señaló que el ACP resultó efectivo para diferenciar los ambientes (localidades, cepas y ciclos) y consideró que debe ser complementado con el Análisis de Clasificación Automática (ACA), para conocer cómo se asocian los ambientes, tomando las variables más importantes obtenidas mediante el ACP.

Por su parte, López (1986), logró determinar las variables más importantes en su efecto, para los caracteres principales de producción (toneladas de caña por hectárea, Pol en caña y toneladas de Pol por hectárea) y sobre ésta base, aplicó el análisis discriminante, logrando una clara definición de los ambientes estudiados. Asimismo, García (2004) y Rodríguez (2012), aplicando ACP lograron caracterizar y clasificar los sitios de pruebas en la etapa final del proceso de selección de cultivares, en las regiones del centro y el oriente de Cuba, que se encuentran bajo estrés por sequía y mal drenaje, donde se incluyeron variables de rendimiento, hidrofísicas y climáticas de las localidades. Castro (1991), mediante el ACA, y a partir de los residuos de la I. GXA logró clasificar los ambientes de acuerdo al comportamiento relativo de los genotipos en cada una de las variables analizadas (toneladas de caña por hectárea y Pol

en caña) y considera este análisis, como complemento de otros análisis para la evaluación de cultivares y ambientes.

Otras técnicas multivariadas han sido utilizadas en el empeño de clasificar los ambientes de prueba, como el Análisis Factorial de Correspondencia Simple (Milanés y col., 1986 y 1988), Correspondencia Múltiple (Jorge y col., 1989) y el Análisis Discriminante (Estévez y col., 1988). Se han utilizado también otros métodos estadísticos multivariados, empleados para clasificar ambientes como los modelos AMMI (Modelo Efectos Principales Aditivos e Interacciones Multiplicativas), según Gauch, 1988).

#### **2.4.4. Estabilidad y adaptabilidad fenotípica. Métodos estadísticos para su estimación**

Bilbro y Ray (1976), señalaron que para obtener éxito en un programa de mejoramiento genético, este debe enfocar sus esfuerzos sobre el rendimiento del genotipo (la media de rendimiento comparado con el testigo), su adaptación (en qué ambiente el genotipo responde mejor) y su estabilidad (consistencia del rendimiento del genotipo comparado con otros).

Finlay y Wilkinson (1963), definieron la estabilidad media de una forma dinámica, para caracterizar un cultivar cuya producción varía de acuerdo con la capacidad de los ambientes. Para Eberhart y Russel (1966) y Mariotti y col., (1976), la adaptabilidad se refiere a la capacidad de los genotipos de aprovechar ventajosamente los estímulos del ambiente.

Por su parte, Vencovsky y Torres (1988) apuntaron dos tipos de estabilidad: una estabilidad espacial y una estabilidad temporal, enfatizando que la primera es sinónimo de adaptabilidad. Fox y col., (1997), siguiendo esa misma línea de conceptos, usaron los términos de adaptabilidad y estabilidad para referirse a las dimensiones espacial y temporal, respectivamente.

En la literatura científica se manejan muchos conceptos de adaptabilidad y estabilidad, pero de manera general se emplean los términos de Finlay y Wilkinson (1963) y Eberhart y Russel (1966) o modificaciones de los mismos.

Algunas de ellas coinciden en plantear que un genotipo es estable cuando cultivado en diferentes ambientes presenta pocas variaciones para un carácter dado.

Dentro de los métodos propuestos para estudiar la estabilidad y adaptabilidad fenotípica, se encuentran los procedimientos basados en los estimados de la varianza de la I. GXA (Plaisted y Pertenson, 1959; Wricke, 1962; Tai, 1971; Shukla, 1972; Wricke y Weber, 1986; Magari y Kang, 1997), la regresión lineal simple (Yates y Cochran, 1938; Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966; Bilbro y Ray, 1976 y la regresión múltiple (Verma y col., 1978, Silva y Barreto, 1986; Cruz y col., 1989; Storck y Vencovsky, 1994).

Se encuentran otros métodos multivariados como el Análisis de Componentes Principales (Crossa, 1990), Análisis de Agrupamiento (Hanson, 1994), Análisis de Coordenadas Principales (Westcott, 1987); y métodos que integran el análisis de varianza (método univariado), con el Análisis de Componentes Principales (método multivariado), como el modelo AMMI y el modelo de Regresión de Sitios.

De todos estos métodos, la Regresión Lineal (Eberhart y Russell, 1966) ha sido el más usado en Cuba (Gálvez, 1978; López, 1986; Castro, 1991 y González, 1995), teniendo como limitaciones fundamentales, que en algunos casos la respuesta de los cultivares no se presenta de manera lineal y tratan de explicar la interacción, a partir de un solo término multiplicativo, lo cual en muchos casos resulta insuficiente (Varela y Castillo, 2005), así como la dependencia al grupo de genotipos estudiados, pues el índice ambiental responde al promedio de todos, en cada ambiente evaluado (Gálvez, 1978).

También, hay que señalar el Método No Paramétrico de Hühn (1979), empleado en Cuba en caña de azúcar por Vega (1993), basado en los rangos de los genotipos en cada ambiente, considerando  $i$  genotipos y  $j$  ambientes. Asimismo, se ha utilizado la Cartografía de los Residuos Individuales como complemento a los análisis clásicos de adaptabilidad y estabilidad de Eberhart y Russell (1966).

Castro (1991) fue el primero en emplear este método en Cuba. Posteriormente, González (1995) incursionó en éste análisis, indicando con exactitud, los ambientes donde los genotipos producen acorde a lo que puede esperarse de estos y por ende, donde sus resultados son estables y dónde hay desviaciones tanto por encima como por debajo de los rendimientos.

La aplicación de técnicas multivariadas al estudio de la I. GXA, ha mostrado ventajas como el enfoque global y la interpretación complementada con elementos gráficos. En este contexto y basado en el Análisis de Coordenadas Principales, Westcott (1987) propuso un nuevo método de estabilidad. Este análisis es una generalización del Análisis de Componentes Principales, usándose cualquier medida de similitud entre los individuos (Ibáñez y col., 2001 y Martín, 2004).

#### **2.4.4.1. Modelos AMMI**

Los Modelos de Efectos Principales Aditivos e Interacciones Multiplicativas (AMMI), combinan el Análisis de Varianza regular (ANOVA), para los efectos principales aditivos, con la descomposición en valores y vectores o Análisis de Componentes Principales (ACP), para la estructura multiplicativa de la interacción (Gauch, 2007). Estos modelos tienen como objetivo explicar la interacción asociada a un ANOVA bifactorial, a partir de una representación **biplot** de filas (genotipos) y columnas (ambientes), y dan la posibilidad de estudiar el grado de estabilidad de los genotipos, al ser probados en diferentes ambientes (Varela y Castillo, 2005).

También, son efectivos para varios propósitos: (1) comprensión de la I. GXA, incluyendo la clasificación de los ambientes, (2) mejoramiento de la precisión en el rendimiento estimado, lo cual incrementa la probabilidad de éxito de selección de genotipos con altos rendimientos, (3) estimar datos faltantes, (4) incremento de la flexibilidad y eficiencia de los diseños experimentales (Gauch, 1992; Gauch y Zobel, 1996).

La descomposición en valores y vectores de la interacción permite obtener una representación **biplot** (Gabriel, 1971), en la que van a ser ploteados

simultáneamente los marcadores de genotipos y ambientes. Para obtener los llamados “marcadores”, es necesario multiplicar el valor singular  $\lambda$  a los resultados de los vectores de genotipo ( $\mathbf{u}_g$ ) y/o el ambiente ( $\mathbf{v}_e$ ), según Gauch y col., 2008). En la literatura prevalecen tres métodos:  $\lambda^{0.5}\mathbf{u}_g$  y  $\lambda^{0.5}\mathbf{v}_e$  (escala simétrica),  $\lambda\mathbf{u}_g$  y  $\mathbf{v}_e$  (conserva la medida de los genotipos), y  $\mathbf{u}_g$  y  $\lambda\mathbf{v}_e$  (conserva la medida de los ambientes).

Una propiedad interesante y la más importante del **biplot**, es que cada valor de la interacción genotipo-ambiente, puede ser estimado y visualizado por los marcadores de genotipos y ambientes que presenta el **biplot** (Yan, 2001). En dicha representación, proximidades entre genotipos y ambientes indica una interacción positiva; en caso contrario, es decir, genotipos y ambientes distantes es sinónimo de interacción negativa, y genotipos próximos al origen de coordenadas indica estabilidad (Varela y Castillo, 2005).

Este modelo ha demostrado ser más eficiente que otras técnicas tradicionales de análisis donde es imprescindible discernir en detalle sobre las características de la I. GXA (Nachit y col., 1992; Yan, 1995). Los modelos AMMI y el Efecto de la Interacción Genotipo-Ambiente (GGE) han sido extensamente aplicados, principalmente en cereales y oleaginosas (Crossa y col., 2002; Brancourt y Lecomte, 2003; Casanoves y col., 2005; Fan y col., 2007; Gauch, 1988; Holland y col., 2002; Kang y col., 2005; Nayak y col., 2008; Otoo y Asiedu, 2008); plantas forrajeras (Ebdon y Gauch, 2002; Annicchiarico, 2002; algodón (Naveed y col., 2007) y caña de azúcar (Blanche y Myers, 2006; Quemé, 2007; Chavanne y col., 2007; Glaz y Kang, 2008; Hamdi, 2009; Rodríguez y col., 2010 y Rodríguez, 2012).

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1 Caracterización de los ambientes de producción

Los estudios se desarrollaron en el período comprendido entre septiembre de 2006 y marzo de 2009, en cuatro localidades de diferentes Unidades Empresariales de Base (UEBs) de la provincia de Matanzas. Las localidades y los tipos de suelos (Hernández y col., 1999), se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Localidades, suelos y cepas utilizados en el estudio.

UEB	Localidad	Cepa	Abreviatura	Suelo
México	UBPC Neda	Planta	N1	Pardo con carbonato típico
		Retoño	N2	
Jesús Rabí	CPA 28 de Enero	Planta	E1	Ferralítico rojo hidratado
		Retoño	E2	
México	CPA Gerardo Álvarez	Planta	GA1	Pardo con carbonato plastogénico
		Retoño	GA2	
España Republicana	UBPC Máximo Gómez	Planta	MG1	Ferralítico rojo compactado
		Retoño	MG2	

En la caracterización edafoclimática de las localidades estudiadas, se utilizaron las informaciones existentes de las precipitaciones registradas por las redes pluviométricas del Instituto de Recursos Hidráulicos, ubicadas en cada localidad durante el periodo en que se llevaron a cabo los estudios, así como los valores medios históricos de cada una de estas localidades. Las variables climáticas (temperatura, evaporación y humedad relativa) fueron tomadas de los registros de la Red Meteorológica Nacional. De la Estación 329 (Indio Hatuey) para la localidad UBPC Máximo Gómez y Estación 332 (Colón) para UBPC Neda, CPA Gerardo Álvarez y CPA 28 de Enero.

Las principales características físico-químicas de los suelos evaluados se reflejan en el Anexo 1 (Pineda, 2002).

Con las variables utilizadas en la caracterización de las localidades (Tabla 2) se conformó una base de datos que incluyó variables de clima (9), suelo (3) y rendimiento (3), para un total de 15 variables.

Tabla 2. Variables utilizadas en la caracterización de los ambientes de producción

No	Variable	No	Variable
<b>Variables de Clima</b>		<b>Variables de suelo</b>	
1	Temp. máxima (TMAX)	1	Potasio (K <sub>2</sub> O)
2	Temp. mínima (TMIN)	2	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
3	Temp. media (TMED)	3	Materia orgánica (MO)
4	Hum. relativa máx. (HRMAX)	<b>Variables de cosecha</b>	
5	Hum. relativa mín. (HRMIN)	1	Toneladas de caña por hectárea (TCHA)
6	Hum. relativa media (HRMED)	2	Porcentaje de Pol en caña (PPC)
7	Lluvia total (LLT)	3	Toneladas de Pol por hectárea (TPHA)
8	Lluvia noviembre-abril (LLNA)		
9	Lluvia mayo-octubre (LLMO)		

La técnica estadística utilizada fue el Análisis Multivariado de Componentes Principales (ACP), aplicado a los datos de los grupos de variables, con su representación en el plano de coordenadas de cada ambiente (Milanés y López, 1986; Jorge y col., 1989; Hamdi, 2009 y Rodríguez, 2012).

### 3.2. Estudio de la interacción genotipo -ambiente

Fueron plantados cuatro experimentos, uno en cada localidad en estudio; en cada caso se evaluaron 25 cultivares (Tabla 3). El diseño utilizado fue Bloques al Azar, con tres réplicas en parcelas de 48m<sup>2</sup> (4 surcos con 7,5m), bajo condiciones de secano. Los cultivares utilizados como testigos fueron C323-68 y C86-12, por ser los empleados en los estudios regionales de cultivares, así como por su amplia distribución en la Provincia, y su buen comportamiento demostrado en estas condiciones.

Tabla 3. Cultivares evaluados y sus progenitores en cada localidad

No.	Cultivares	Progenitores	No.	Cultivares	Progenitores
G1	C266-70	Co281 x POJ2878	G14	C90-647	C389-52 x Mex60-1459
G2	C90-530	My5514 x Co421	G15	C90-105	C8-76 x ?
G3	C89-176	NCo310 x C187-68	G16	C86-12 (T)	Desconocidos
G4	C89-148	B6368 x CP70-1143	G17	C88-381	C389-52 x C227-59
G5	C1051-73	B42231 x C431-62	G18	C91-115	C1616-75 x Ja64-19
G6	SP70-1284	CB41-76 x ?	G19	C89-147	C236-51 x B45181
G7	C439-72	C236-51 x B42231	G20	C85-102	My5514 x C227-59
G8	Ja64-19	Ja55-663 x Ja54-309	G21	C86-156	C16-56 x C87-51
G9	C323-68 (T)	B4362 x C87-51	G22	C86-165	B42231 x C227-59
G10	Q68	POJ2878 x Co290	G23	C90-469	C87-51 x Ja60-5
G11	Co997	Co683 x C63-32	G24	C86-56	NCo310 x C187-68
G12	C90-501	C266-70 x Ja60-5	G25	C88-380	B7542 x B63118
G13	C294-70	B42231 x C87-51			T: testigos

Las evaluaciones se realizaron en la cepa caña planta, con edades de 17 meses (febrero 2008) y en primer retoño, con 13 meses (marzo 2009). Cada experimento fue conducido y evaluado, según las Normas y Procedimientos del Programa de Fitomejoramiento de la Caña de Azúcar en Cuba (Jorge y col., 2002 y 2011).

Las variables de cosecha evaluadas fueron: toneladas de caña por hectárea (TCHA), porcentaje de Pol en caña (PPC) y toneladas de Pol por hectárea (TPHA).

#### **- Determinación del rendimiento agrícola (TCHA)**

Las cosechas se realizaron por estimación, contándose el total de tallos por parcela, a partir del pesaje de una muestra de 1m de surco cada una, tomadas al azar en cada réplica, para determinar el peso promedio de cada cultivar, con lo cual se determinó las toneladas de caña por hectárea.

#### **- Determinación del porcentaje de Pol en caña (PPC)**

Esta determinación se realizó por el Método Schmitz-Horne, según metodología descrita por Pérez y col. (2006), para lo cual:

Se agitó la muestra de jugo compuesta y preservada con Acetato Básico de Plomo (II) (subacetato de Plomo) y se tomó 100mL. Fue filtrada, pasando el volumen total de la solución por un embudo provisto de papel de filtro. Las lecturas sacaramétrica se realizaron en un sacarímetro ATAGO POLAX 2L.

Con la lectura sacarimétrica y el Brix corregido se determinó la Pol de la muestra en la tabla 10 del Manual analítico para azúcar crudo.

#### **- Determinación de las toneladas de Pol por hectárea (TPHA)**

Esta determinación se realizó calculando:

$$TPHA = \frac{\text{Rendimiento Agrícola (TCHA)} \times \text{Porcentaje de Pol en Caña (PPC)}}{100}$$

### 3.2.1. Modelos empleados en la determinación de las fuentes de I. GXA

Los datos originales de las variables de cosecha, fueron evaluados respecto a su normalidad y homogeneidad de varianza, mediante pruebas de Chí cuadrado y Bartlett-Box F. En ningún caso se hizo necesaria su transformación. Se realizaron análisis de varianza de clasificación doble, para conocer la varianza y la contribución de cada uno de los factores y sus interacciones a la varianza fenotípica total. Para esto se tomaron como factores los genotipos y localidades (ambos como efectos aleatorios), de acuerdo al modelo de Cochran y Cox (1965), el que se denominó “Modelo Reducido” de descomposición de la varianza y fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + j + (G)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:  $Y_{ijk}$ . Es la observación k en la localidad j del genotipo i

$\mu$ . Media general

$G_i$ . Efecto del i-ésimo genotipo

$j$ . Efecto de la j-ésima localidad

$(G)_{ij}$ . Efecto del i-ésimo genotipo en la j-ésima localidad

$e_{ijk}$ . Error asociado a la k-ésima observación en la j-ésima localidad sobre el i-ésimo genotipo

Se empleó el modelo de análisis de varianza trifactorial que incluyó, además de los factores genotipos y localidades, a las cepas, denominándose “Modelo Completo” de descomposición de la varianza. Todos estos factores fueron considerados de efectos aleatorios con la siguiente relación:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + j + (G)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:  $Y_{ijk}$ . Es la observación k en la localidad j del genotipo i

$\mu$ . Media general

$G_i$ . Efecto del i-ésimo genotipo

$j$ . Efecto de la j-ésima localidad

$(G)_{ij}$ . Efecto del i-ésimo genotipo en la j-ésima localidad

$e_{ijk}$ . Error asociado a la k-ésima observación en la j-ésima localidad sobre el i-ésimo genotipo

$e_{ijkl}$ . Error asociado a la l-ésima observación de la j-ésima localidad del i-ésimo genotipo de la k-ésima cepa

Los estimados de heredabilidad en sentido ancho ( $h^2_e$ ), fueron calculados a partir de los componentes de varianza (Hogarth, 1968 y Milligan y col., 1990). El error estándar aproximado se obtuvo conforme a Anderson y Bancroft (1952) y Becker (1988) y el coeficiente genético de variación (CGV), según Falconer (1970).

### 3.3. Análisis de la adaptabilidad y estabilidad fenotípica

Para el estudio de la estabilidad y la adaptabilidad fenotípica se utilizó el método estadístico multivariado, Modelo de Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativa (AMMI).

#### 3.3.1. Modelo AMMI

Los modelos de Efectos Principales Aditivos e Interacciones Multiplicativas (AMMI), combinan el análisis de varianza (ANOVA) para los efectos principales aditivos, con la descomposición en valores y vectores singulares (DVVS) o Análisis de Componentes Principales (ACP), para la estructura multiplicativa de la interacción (Gauch, 2007).

En este contexto, se considera la I. GXA un diseño bifactorial con  $Y_{ij}$  el rendimiento del genotipo  $i$  en el ambiente  $j$ . Se llamará modelo AMMI de orden  $M$  a la expresión:

$$AMMI_M : E_{(Y_{ij})} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sum_{m=1}^M \lambda_m u_{mi} v_{mj} + e_{ij}$$

Donde:  $Y_{ij}$ : observación correspondiente a la combinación de niveles  $ij$ ;  $\mu$ : media general,  $\alpha_i$ : efecto del genotipo  $i$ ;  $\beta_j$ : efecto del ambiente  $j$ ;  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$ : efectos principales para genotipos y ambientes respectivamente;  $\lambda_m$ : corresponde al valor singular de orden  $m$ ;  $u_{mi}$ : coordenada  $i$ -ésima del vector singular asociado a  $\lambda_m$ ;  $v_{mj}$ : coordenada  $j$ -ésima del vector singular asociado a  $\lambda_m$ ;  $e_{ij}$ : residuo.

Para el estudio de la estabilidad se confeccionó una representación gráfica (Biplot AMMI<sub>1</sub>) con la media general y los efectos principales de genotipos y ambientes (eje de la abscisas) y el primer componente del modelo AMMI (eje de las ordenas). Se elaboró un gráfico Biplot AMMI<sub>2</sub> para el estudio de la adaptabilidad con los dos primeros componentes de este modelo , utilizándose la escala simétrica.

En todos los casos, los paquetes estadísticos empleados en el procesamiento de los datos fueron: STATISTICA v.8 (StatSoft, 2007) y Biplot v1.1 (Smith, 2002).

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Caracterización de los ambientes de producción donde se desarrolla la caña de azúcar

En el Análisis de Componentes Principales (ACP) de las variables estudiadas (Tabla 3), se observa que las dos primeras componentes extrajeron el 70,45% de la variabilidad, lo que indica que reflejan el mayor porcentaje de la variación total.

Tabla 3. Análisis de componentes principales. Valores y vectores propios

Componentes	1	2
Valores propios	8,32	2,25
Valor propio (%)	55,47	14,99
Valor acumulado	8,32	10,57
Acumulado (%)	55,45	70,45
Toneladas de caña por hectárea (TCHA)	<b>0,59</b>	0,46
Porcentaje de Pol en caña (PPC)	-0,09	<b>0,76</b>
Toneladas de Pol por hectárea (TPHA)	<b>0,60</b>	0,38
Lluvia total (LLT)	<b>0,83</b>	0,22
Lluvia noviembre-abril (LLNA)	-0,12	<b>-0,73</b>
Lluvia mayo-octubre (LLMO)	<b>0,71</b>	0,06
Temperatura máxima (TMAX)	<b>-0,76</b>	-0,30
Temperatura mínima (TMIN)	<b>0,98</b>	-0,06
Temperatura media (TMED)	<b>0,91</b>	0,13
Humedad relativa máxima (HRMAX)	<b>-0,97</b>	0,19
Humedad relativa mínima (HRMIN)	<b>-0,73</b>	0,52
Humedad relativa media (HRMED)	<b>-0,93</b>	0,32
Potasio asimilable (K <sub>2</sub> O)	<b>-0,97</b>	0,01
Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	-0,20	-0,22
Materia orgánica (MO)	<b>0,84</b>	-0,42

Resaltadas las variables de mayor contribución en cada componente

En la primera componente, las variables de mayor importancia resultaron la lluvia total (LLT), la lluvia de mayo-octubre (LLMO), la materia orgánica (MO) y las temperaturas mínimas y medias (TMIN y TMED), las cuales tuvieron una fuerte relación positiva con las variables del rendimiento (TCHA y TPHA). En sentido contrario, resultaron importantes las variables humedad relativa mínima, máxima y media (HRMIN, HRMAX y HRMED), así como la temperatura máxima (TMAX) y el contenido de potasio en el suelo (K).

En la segunda componente, las variables de mayor peso fueron el porcentaje de Pol en caña (PPC) y en sentido contrario, la lluvia de noviembre-abril (LLNA).

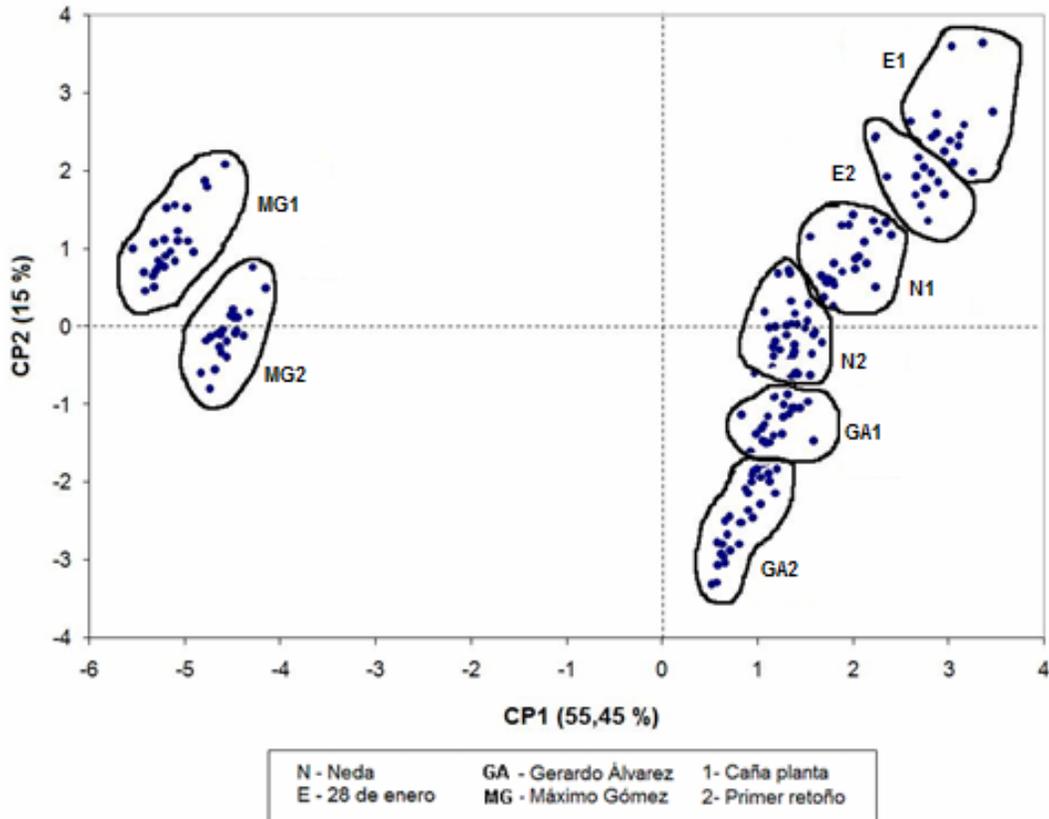


Figura 1. Representación de los ambientes en el plano de las dos primeras componentes principales

Al representar la serie de datos de cada localidad en las dos primeras componentes (Figura 1), se aprecia una diferenciación de los ambientes asociados con sus cepas; la localidad UBPC Máximo Gómez (MG1 y MG2) resultó de mayor contraste que el resto de las localidades estudiadas, debido a sus características edáficas y climáticas, es decir, suelo ferralítico rojo compactado, de baja retención de humedad y sometido además a un régimen pluviométrico inferior, con solo 53,96% en el periodo seco y 38,65% en el húmedo, comparado con la media histórica de la zona para una serie de 50 años (Anexo 2).

Los climogramas confeccionados a partir de los registros de lluvia durante el desarrollo del estudio para las diferentes localidades, definen el inicio y final de los periodos secos y húmedos (Figura 2); se aprecia que la localidad UBPC Máximo Gómez se comporta durante todo el periodo con niveles de humedad inferiores al 50% de la evaporación, razón por la cual resulta más vulnerable al estrés por déficit hídrico y resulta más factible para seleccionar genotipos por su tolerancia a la sequía.

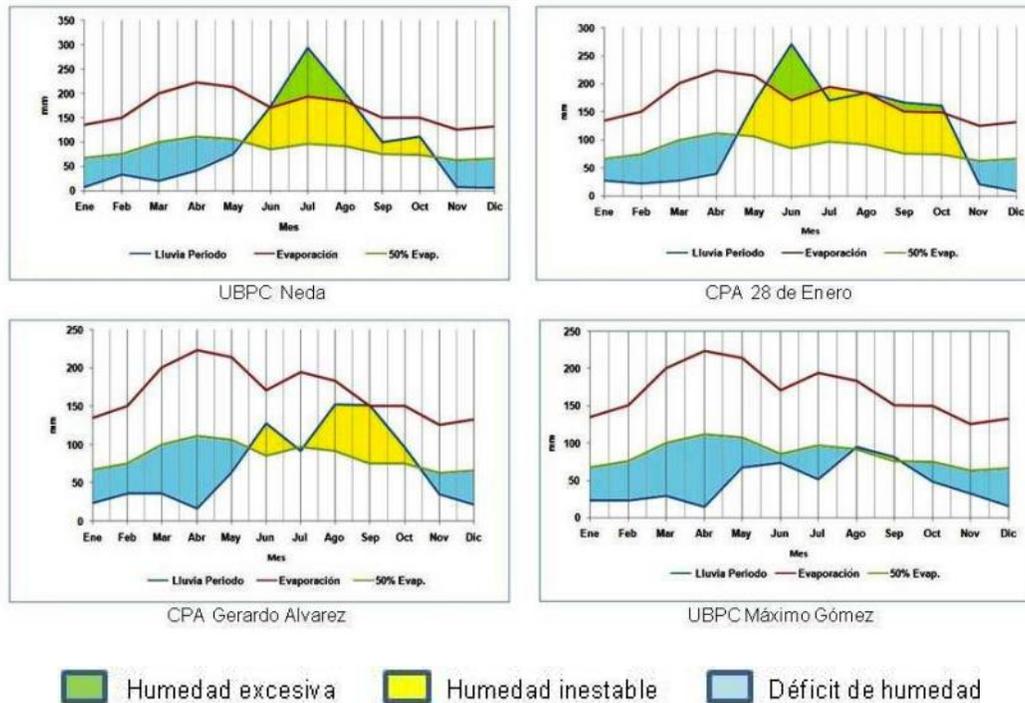


Figura 2. Comportamiento de la evaporación y la lluvia de las localidades estudiadas

Las localidades UBPC Neda (N1 y N2) y CPA Gerardo Álvarez (GA1 y GA2) se encuentran más asociadas, ya que las características de sus suelos son similares, así como el comportamiento de la lluvia, lo que hace suponer la similitud entre las mismas y la posible adopción de estrategias similares para el manejo de los cultivos.

Los resultados obtenidos en la investigación, manifiestan que la intensidad del estrés por déficit hídrico no puede analizarse por la influencia aislada de cada variable edafoclimática, sino por su efecto integrado; cuestión esta también señalada por García (2004) y Rodríguez (2012). En un estudio en caña de

azúcar en la región central del país bajo estrés por déficit hídrico, García (2004), utilizó variables hidrofísicas del suelo y climáticas, para caracterizar y clasificar los ambientes estudiados. Hamdi (2009) en Irán, obtuvo éxito en el estudio y selección de cultivares de caña de azúcar al emplear variables edafoclimáticas, de calidad del agua y de rendimiento agroindustrial para caracterizar y clasificar los ambientes donde se desarrolla la caña de azúcar, agrupándose las localidades en cuatro grandes macro-ambientes.

Bernal (1986), en un estudio de clasificación de ambientes en cinco localidades de las provincias Granma, Holguín y Las Tunas, destacó como variables importantes en la clasificación y caracterización de los ambientes estudiados, el tipo de suelo y la distribución de las lluvias del período julio -septiembre. Por su parte, Castro (1991), empleando variables de suelo, clima y de manejo para clasificar nueve localidades de la provincia Holguín, reveló la importancia de las lluvias del período mayo-octubre y las lluvias anuales sobre el rendimiento agrícola, así como el efecto negativo de las lluvias precosecha sobre el rendimiento industrial.

#### **4.2. Estudio de la Interacción Genotipo – Ambiente**

En la tabla 4 se reflejan los componentes del Análisis de Varianza por cosechas individuales (Modelo Reducido), donde se aprecia que la varianza de la interacción genotipo-ambiente representa el mayor porcentaje de la varianza fenotípica total, superior a la de los genotipos en las variables toneladas de caña por hectárea (TCHA) y toneladas de Pol por hectárea (TPHA), en ambas cosechas y sólo en la cepa de primer retoño, para el porcentaje de Pol en caña (PPC). Estos resultados evidencian el peso de las diferencias encontradas en la caracterización de los ambientes y que persisten en el tiempo, por lo que es de esperar respuestas puntuales de los genotipos a través de cada sitio.

En ambas cepas, y para las tres variables evaluadas, se obtuvo que la mayor contribución a la varianza fenotípica total corresponde a los efectos ambientales, con valores entre 49,32 y 72,41%. De éstos efectos, la localidad fue la principal fuente de variación, demostrándose la influencia de ese factor

complejo del ambiente, cuando se utilizan localidades muy contrastantes con diferentes condiciones edafoclimáticas.

Para el porcentaje de Pol en caña en ambas cepas, los efectos ambientales fueron inferiores a los obtenidos en el resto de las variables, con una mayor contribución de los genotipos a la varianza fenotípica total (28,63% en caña planta y 18,34% en retoño). Estos resultados se corresponden con los obtenidos en Cuba por Castro (1991), González (1995), Jorge (1996), García (2004) y Rodríguez (2012); estos dos últimos autores realizaron estudios bajo condiciones de déficit hídrico, similares a las del presente trabajo.

En la cepa de retoño, aunque se mantuvo el predominio del componente de varianza ambiental, se denota una reducción de este efecto en todas las variables, respecto a la cosecha de caña planta, excepto para porcentaje de Pol en caña. Este resultado coincide con lo reportado por Abrantes (1986), González (1995), Ojeda (1995), Jorge (1996), García (2004) y Rodríguez (2012), quienes atribuyeron dicho comportamiento a una mejor adaptación de la caña de azúcar al medio, después de la primera cosecha, y a la mayor uniformidad de los tallos.

En las variables evaluadas, los mayores estimados de heredabilidad se alcanzaron en el porcentaje de Pol en caña, en ambas cepas (0,29 y 0,18), debido a una mayor contribución del componente de varianza genética total y una disminución de la varianza ambiental, ya reportada por Hogarth (1968), Gálvez y col. (1983) y Castro (1991).

Los resultados antes expuestos justifican la búsqueda de cultivares de adaptación específica para cada uno de los ambientes. En este sentido, reviste gran importancia la replicación de los ensayos en más de una localidad y cosecha, para aprovechar, eficientemente, la interacción GXA, como también lo han señalado Bernal (1986), López (1986), Milanés y col. (1988), Vega (1993), González (1995), García (2004) y Rodríguez (2012).

Tabla 4. Componentes de varianza y parámetros genéticos. “Modelo Reducido”

Fuente de variación y estadígrafos	Caña planta					Primer retoño				
	$\sigma^2$		ES		PVT	$\sigma^2$		ES		PVT
<b>Porcentaje de Pol en caña (PPC)</b>										
$\sigma^2g$	0,35	±	0,13	*	28,63	0,19	±	0,07	*	18,34
$\sigma^2l$	0,07	±	0,05		5,27	0,42	±	0,27		40,00
$\sigma^2gxl$	0,27	±	0,08	*	22,05	0,22	±	0,05	*	21,01
$\sigma^2e$	0,54	±	0,04	*	44,05	0,22	±	0,02	*	20,65
VA	0,61			*	49,32	0,63			*	60,65
Media	17,61					18,11				
$h_e^2$	0,29	±	0,21			0,18	±	0,14		
CVG (%)	3,38					2,42				
<b>Toneladas de caña por hectárea (TCHA)</b>										
$\sigma^2g$	184,77	±	79,23	*	10,31	132,37	±	54,76	*	13,67
$\sigma^2l$	1083,43	±	694,86		60,45	505,82	±	326,15		52,25
$\sigma^2gxl$	309,69	±	63,06	*	17,28	205,08	±	40,77	*	21,18
$\sigma^2e$	214,29	±	15,08	*	11,96	124,83	±	8,78	*	12,89
VA	1297,72			*	72,41	630,65			*	65,14
Media	86,65					75,08				
$h_e^2$	0,10	±	0,09			0,14	±	0,11		
CVG (%)	16,81					15,32				
<b>Toneladas de Pol por hectárea (TPHA)</b>										
$\sigma^2g$	4,55	±	2,17	*	8,87	3,26	±	1,43	*	12,31
$\sigma^2l$	29,70	±	19,09		57,84	13,36	±	8,63		50,44
$\sigma^2gxl$	9,88	±	2,03	*	19,24	5,68	±	1,17	*	21,43
$\sigma^2e$	7,22	±	0,51	*	14,06	4,19	±	0,29	*	15,82
VA	36,91			*	71,89	17,55			*	66,26
Media	14,77					13,48				
$h_e^2$	0,09	±	0,08			0,12	±	0,11		
CVG (%)	14,45					13,40				

$\sigma^2$ . Componente de varianza g. genotipos l. localidades gxl. Interacción genotipo x localidad e. error experimental VA. Varianza ambiental ES. Error estándar PVT. Porcentaje de la varianza total

\*. Estimado preciso ( $2\sigma^2$ )  $h_e^2$ . Heredabilidad CVG. Coeficiente Genético de Variación.

El empleo del “Modelo Completo” confirmó la existencia de interacción de los genotipos con el ambiente, expresado como  $\sigma^2gxl + \sigma^2gxc + \sigma^2gxlxc$  (Tabla 5). La descomposición de las varianzas reafirmó la magnitud del componente ambiental, 67,16% para el contenido azucarero, 70,64% en el rendimiento agrícola y 67,07% para las toneladas de Pol por hectárea. De las variables evaluadas, correspondió al porcentaje de Pol en caña la mayor expresión genética (14,97%) en la contribución a la varianza fenotípica total y el mayor estimado de heredabilidad, con 0,15.

Tabla 5. Componentes de varianza y parámetros genéticos. “Modelo Completo”

Fuente de variación y estadígrafos	$\sigma^2$		ES		PVT
<b>Porcentaje de Pol en caña (PPC)</b>					
$\sigma^2g$	0,24	±	0,09	*	14,97
$\sigma^2l$	0,09	±	0,12		5,56
$\sigma^2c$	0,44	±	0,39		27,80
$\sigma^2gxl$	0,12	±	0,05	*	0,05
$\sigma^2gxc$	0,04	±	0,03		2,30
$\sigma^2lxc$	0,15	±	0,10		9,73
$\sigma^2gxlc$	0,13	±	0,04	*	8,22
$\sigma^2e$	8,22	±	0,02	*	24,07
VA	1,06				67,16
Media	17,61				
$h_e^2$	0,15	±	0,11		
CVG (%)	2,80				
<b>Toneladas de caña por hectárea (TCHA)</b>					
$\sigma^2g$	144,60	±	58,01	*	10,83
$\sigma^2l$	170,17	±	369,30		12,74
$\sigma^2c$	0,00	±	114,02		0,00
$\sigma^2gxl$	101,68	±	38,36	*	7,61
$\sigma^2gxc$	13,97	±	20,53		1,05
$\sigma^2lxc$	624,46	±	400,31		46,75
$\sigma^2gxlc$	131,96	±	35,35	*	9,88
$\sigma^2e$	240,82	±	12,01	*	18,03
VA	943,56				70,64
Media	80,87				
$h_e^2$	0,11	±	0,09		
CVG (%)	14,90				
<b>Toneladas de Pol por hectárea (TPHA)</b>					
$\sigma^2g$	3,47	±	1,52		9,77
$\sigma^2l$	4,76	±	10,04		13,43
$\sigma^2c$	0,00	±	2,78		0,00
$\sigma^2gxl$	2,98	±	1,18		8,40
$\sigma^2gxc$	0,44	±	0,65		1,24
$\sigma^2lxc$	16,76	±	10,77		47,25
$\sigma^2gxlc$	4,80	±	1,11		13,52
$\sigma^2e$	5,70	±	0,28		16,08
VA	23,80				67,07
Media	14,12				
$h_e^2$	0,10	±	0,09		
CVG (%)	13,20				

$\sigma^2$ . Componente de varianza g. genotipos l. localidades gxc. Interacción genotipos x cepas gxl. Interacción genotipo x localidad lxc. Interacción localidad x cepas gxlc. Interacción genotipos x localidad x cepas e. error experimental VA. Varianza ambiental ES. Error estándar PVT. Porcentaje de la varianza total \*. Estimado preciso ( $2\sigma^2$ )  $h_e^2$ . Heredabilidad CVG. Coeficiente Genético de Variación.

Los resultados demuestran que las diferencias encontradas en las localidades y las cepas, originan en los cultivares un patrón de comportamiento diferenciado en la producción cañera y azucarera. La significación de las interacciones de primer y segundo orden de los genotipos con el ambiente ,

pone de manifiesto la capacidad discriminatoria de las localidades y cepas. De tal forma, los mayores avances en la selección podrían lograrse cuando sea aprovechado, eficientemente, el efecto que produce la replicación de los estudios de selección, en tiempo y espacio (Milanés y col., 1992; Jorge y García, 1994; Jorge, 1996, Beltrán y col., 2004 y Rodríguez, 2012) .

### **4.3. Adaptabilidad y estabilidad fenotípica para las variables de cosecha**

#### **4.3.1. Para porcentaje de Pol en caña (PPC)**

En la Figura 3, se presenta la representación bidimensional con las dos primeras componentes del modelo AMMI<sub>2</sub> para el contenido azucarero. Estos componentes, en su conjunto, explican 57,6% de la variabilidad total de la interacción genotipo-ambiente (I. GXA). Obsérvese que los ambientes generan diferentes patrones de I. GXA, como se demostró anteriormente.

En esta figura se observa la localidad CPA 28 de Enero (E1) en la cepa caña planta, con la mayor separación del resto de los ambientes (dado por la longitud de su vector); en esta localidad, los cultivares que mayor interactuaron con esta fueron: C90-501 (G12), C91-115 (G18), Co997 (G11), C1051-73 (G5) y C266-70 (G1), los cuales presentaron elevado contenido azucarero. Por el contrario, las localidades CPA Gerardo Álvarez (GA2) y UBPC Neda (N2), en la cepa primer retoño, presentaron interacción negativa con la localidad CPA 28 de Enero (E1) en caña planta.

En la localidad CPA Gerardo Álvarez, en la cepa primer retoño (GA2), los cultivares que presentaron mayor contenido azucarero fueron C89 -147 (G19) y C89-148 (G4), mientras que en la localidad UBPC Neda en esta misma cepa (N2), resultaron los cultivares C90-105 (G15), C89-176 (G3) y C88-380 (G25).

Por otra parte, obsérvese las localidades UBPC Neda en caña planta (N1), UBPC Máximo Gómez en caña planta y primer retoño (MG1 y MG2), con interacciones positivas entre estas; es decir, generaron patrones similares de I. GXA, para la variable contenido azucarero. En este grupo de ambientes, los cultivares que mostraron mejor adaptación fueron, fundamentalmente, C86-165 (G22) y C86-56 (G24), mientras que estos genotipos interactuaron,

negativamente, con las localidades CPA Gerardo Álvarez en caña planta (GA1) y CPA 28 de Enero en retoño (E2), donde presentaron contenido azucarero bajo. En estas dos últimas localidades los genotipos de mejor respuesta para la variable que se analiza fueron C85-102 (G20) y SP70-1284 (G6).

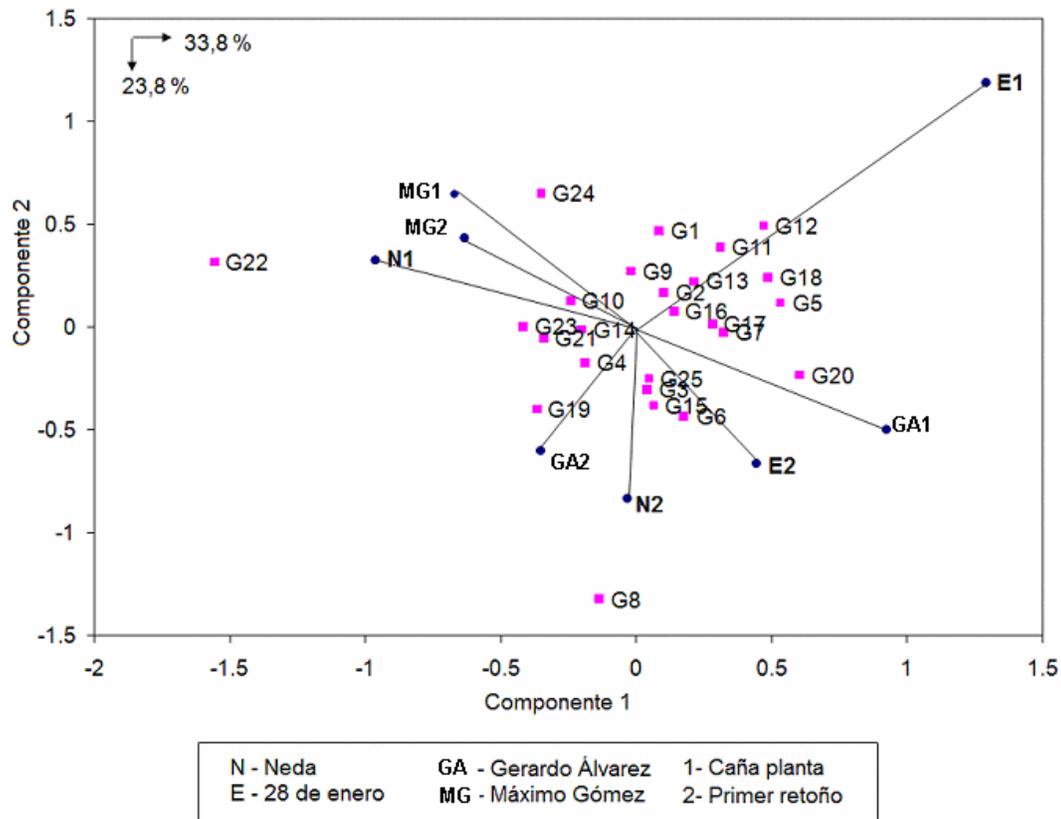


Figura 3. Representación bidimensional del modelo AMMI para el porcentaje de Pol en caña

La Figura 4 ilustra la estabilidad fenotípica (interacción genotipo -ambiente del primer componente del modelo AMMI) y los efectos principales de genotipos y ambientes, más la media general (eje de las abscisas). De acuerdo con esta figura, los genotipos más estables y con alto contenido azucarero resultaron ser: C88-380 (G25), C89-148 (G4) y Co997 (G11); estables, pero con contenido azucarero medio, los cultivares SP70-1284 (G6), C266-70 (G1), C89-176 (G3), C294-70 (G13) y el cultivar utilizado como testigo C86-12 (G16). Los cultivares C85-102 (G20) y C1051-73 (G5), aunque con alto porcentaje de Pol en caña, resultaron inestables.

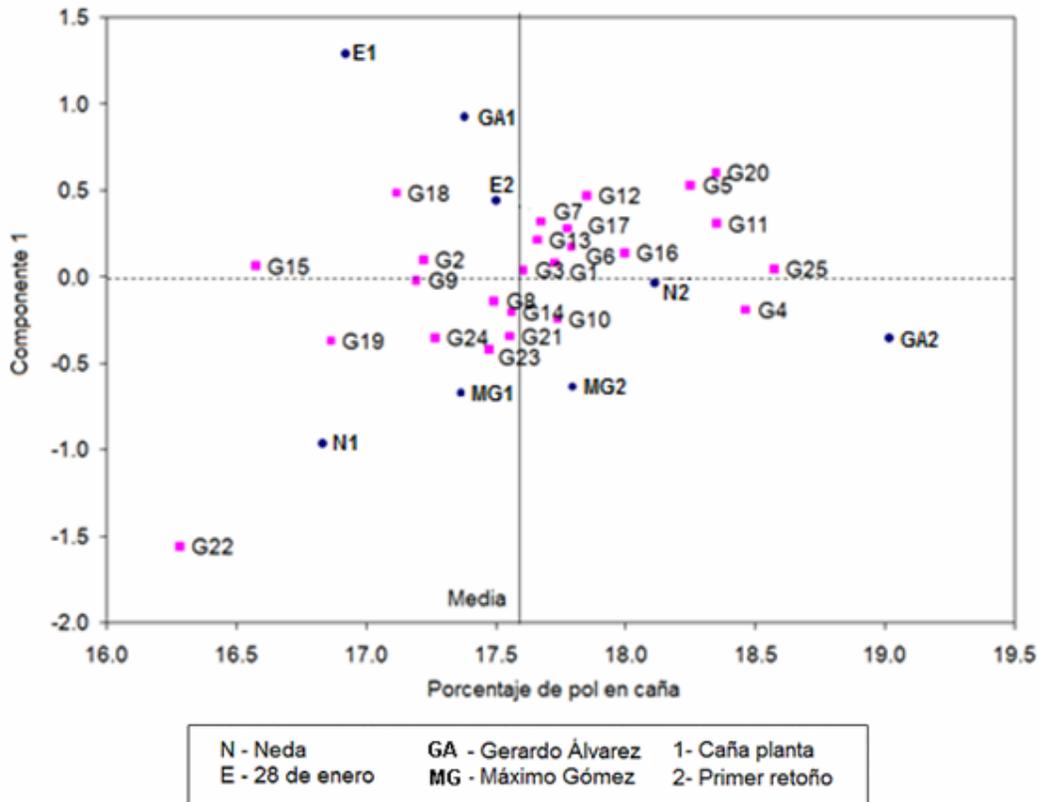


Figura 4. Representación bidimensional de los efectos principales de genotipos y ambientes y su estabilidad fenotípica, para la variable porcentaje de Pol en caña

#### 4.3.2. Para el rendimiento agrícola (TCHA)

Para la variable TCHA el modelo AMMI extrajo, en sus dos primeras componentes 69,4% de la variabilidad total de los datos contenidos en la I. GXA (Figura 5). Se aprecia una diferenciación de los ambientes estudiados, principalmente, entre las localidades: UBPC Neda, caña planta y primer retoño (N1 y N2), CPA 28 de Enero (E2) y UBPC Máximo Gómez (MG2), ambas en primer retoño, lo que evidencia que las diferencias en las características edafoclimáticas provocan comportamientos diferenciados de los genotipos, con los ambientes.

La localidad UBPC Neda en caña planta (N1) se diferenció del resto de las localidades. En este sitio, el cultivar que mayor rendimiento alcanzó fue C88-380 (G25). Por el contrario, los ambientes que interactuaron, negativamente,

con la localidad UBPC Neda, caña planta (N1) fueron: CPA Gerardo Álvarez, en caña planta y primer retoño (GA1 y GA2); UBPC Máximo Gómez, en caña planta y primer retoño (MG1 y MG2). En estos últimos cuatro ambientes, los cultivares que mejor se adaptaron fueron C88-381 (G17), C439-72 (G7), Ja64-19 (G8) y C294-70 (G13).

Por otra parte, se puede apreciar la asociación de los ambientes CPA 28 de Enero en caña planta y primer retoño (E1 y E2); es decir, generan patrones de I. GXA similares; en este caso, los cultivares que mostraron mejor respuesta en estos ambientes fueron: Q68 (G10), C86-56 (G24), C89-148 (G4), C86-165 (22) y C89-147 (19). A su vez, estos cultivares interactuaron, negativamente, con el ambiente en UBPC Neda, primer retoño (N2). En este último sitio, los cultivares mejor adaptados fueron: C90-530 (G2) y C85-102 (G20).

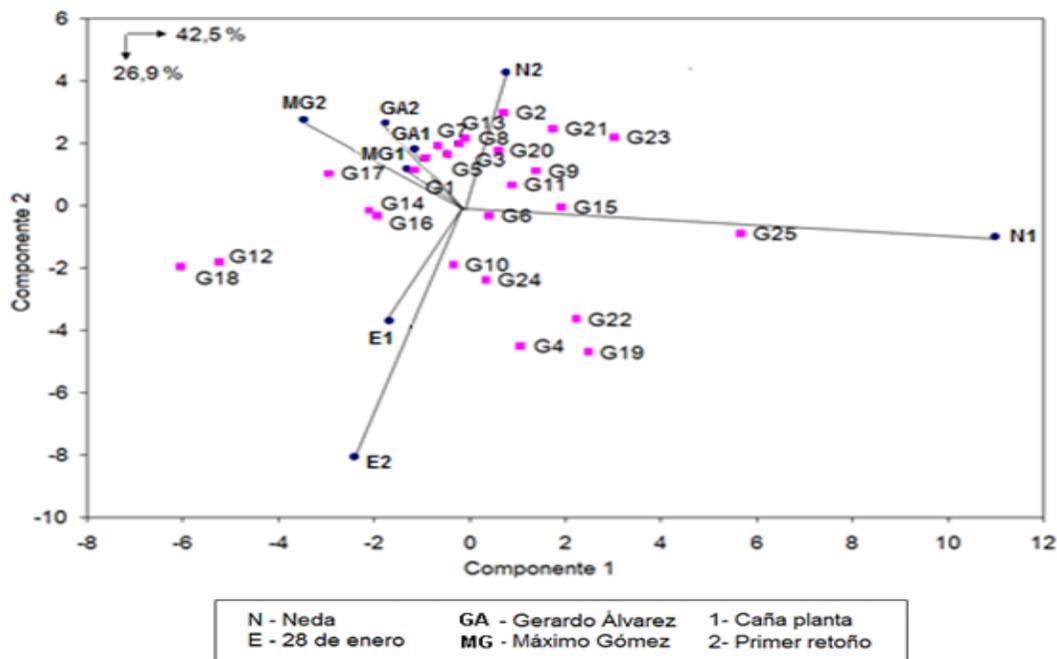


Figura 5. Representación bidimensional del modelo AMMI para la variable TCHA

El análisis de la estabilidad fenotípica realizado por el modelo AMMI señala que los genotipos más estables y con altos rendimientos agrícolas fueron: C89 -147 (G19), C86-165 (G22) y C86-56 (G24), según se observa en la Figura 6. También resultaron estables, con rendimientos inferiores a los anteriores,

aunque por encima de la media, los cultivares: C90-530 (G2), C85-102 (G20), C89-148 (G4), C86-156 (G21) y C323-68 (G9), este último utilizado como testigo. Los cultivares C88-380 (G25) y C90-501 (G12) resultaron inestables y con rendimiento agrícola medio.

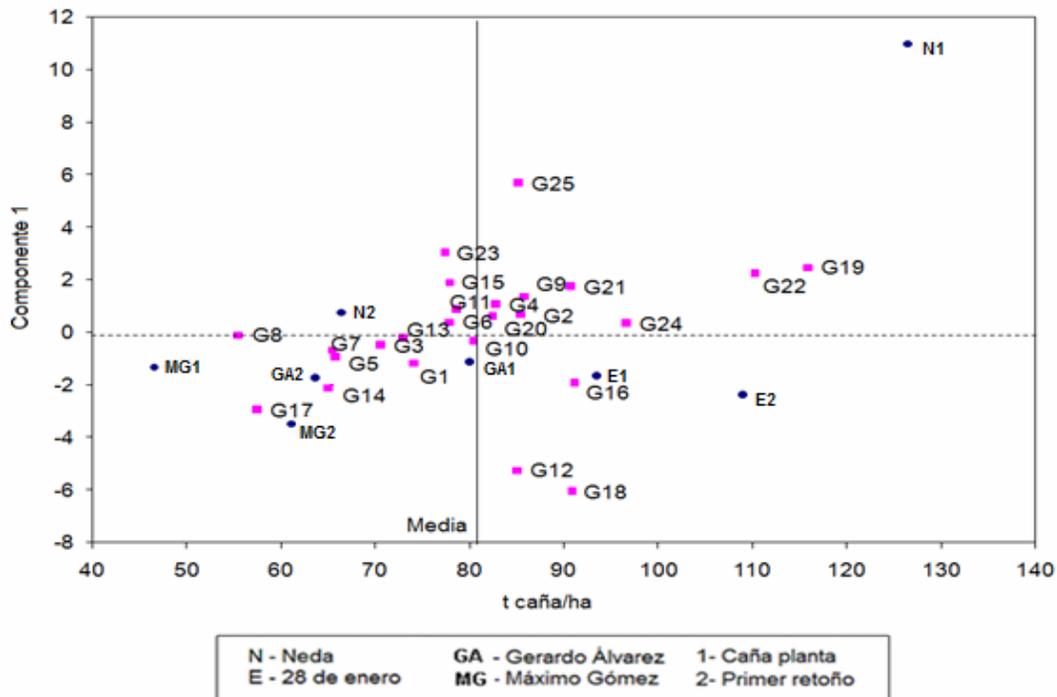


Figura 6. Representación bidimensional de los efectos principales de genotipos y ambientes y su estabilidad fenotípica para la variable TCHA

#### 4.3.3. Para el rendimiento en azúcar (TPHA)

En la Figura 7 se ilustra el comportamiento de la I. GXA para la variable TPHA a través del modelo AMMI, observándose similar tendencia a la obtenida en el rendimiento agrícola. Este comportamiento es de esperar, ya que esta variable está muy influenciada por la TCHA (López, 1986; Castro, 1991; García, 2004 y Rodríguez, 2012). En las dos primeras componentes el modelo AMMI extrajo 67,6% de la variabilidad total.

En la misma se observa que la localidad Neda, caña planta (N1), se diferencia del resto de las localidades, siendo el cultivar C88-380 (G25), el que alcanzó mayor rendimiento en este sitio. En la localidad CPA 28 de Enero, caña planta y primer retoño (E1 y E2), los cultivares C86-56 (G24) y Q68 (G10), lograron la

mayor adaptabilidad a estas condiciones. En los ambientes CPA Gerardo Álvarez (GA1 y GA2) y UBPC Máximo Gómez (MG1 y MG2), en caña planta y primer retoño, los cultivares que mayor respuesta alcanzaron en estos sitios de prueba fueron: C294-70 (G13), C88-381 (G17), C266-70 (G1), C89-176 (G3), C1051-73 (G5) y C439-72 (G7).

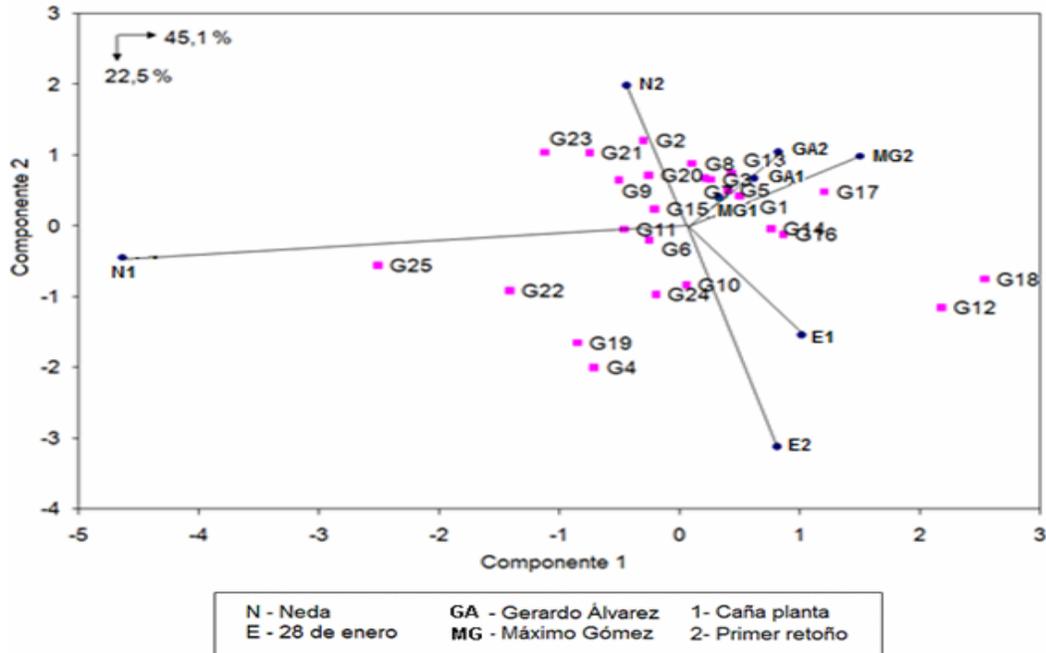


Figura 7. Representación bidimensional del modelo AMMI para la variable TPHA

Al analizar la estabilidad de los cultivares por el modelo AMMI (Figura 8), se obtiene que el genotipo más estable y con alto rendimiento en TPHA resultó C89-147 (G19). Resultaron estables, con menor rendimiento, los cultivares C86-56 (G24), C85-102 (G20), C90-530 (G2), C86-156 (G21) y C89-148 (G4). Los cultivares más inestables y con rendimiento por encima de la media fueron: C91-115 (G18), C90-501 (G12) y C88-380 (G25).

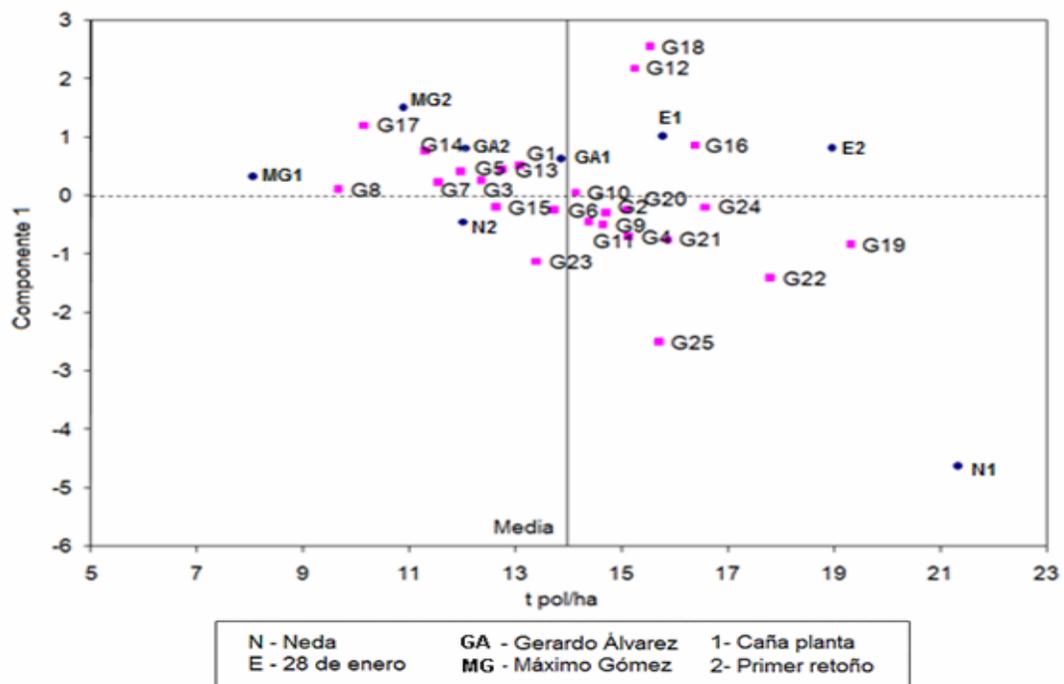


Figura 8. Representación bidimensional de los efectos principales de genotipos y ambientes y su estabilidad fenotípica para la variable TPHA

## 5. Conclusiones

- Mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP), se pudo conocer que la lluvia total, lluvia del periodo mayo -octubre, materia orgánica, temperatura mínima y media, toneladas de caña por hectárea y toneladas de Pol por hectárea, resultaron las variables más importantes para la caracterización de los ambientes estudiados.
- La localidad UBPC Máximo Gómez resultó la más contrastante, de las localidades estudiadas, debido a sus características edáficas y climáticas, siendo factible en estas condiciones realizar estudios para seleccionar los genotipos por tolerancia a la sequía.
- Se comprobó la existencia de interacción genotipo-ambiente en las localidades estudiadas y se cuantificó una alta contribución ambiental a la varianza fenotípica total, con valores de 70,64% en TCHA; 67,07% en TPHA y 67,16% en PPC.
- La variable porcentaje de Pol en caña (PPC) mostró la mayor expresión genética (14,97%) en la contribución a la varianza fenotípica total y el mayor estimado de heredabilidad con 0,15.
- Los cultivares que alcanzaron mayor respuesta en rendimiento agrícola en cada localidad fueron:
  - UBPC Neda: C88-380, C90-530 y C85-102.
  - CPA 28 de Enero: Q68, C86-56, C89-148, C86-165 y C89-147.
  - CPA Gerardo Álvarez y UBPC Máximo Gómez: C88-381, C439-72 y Ja64-19.
- Los cultivares de mejor adaptación general a todos los ambientes resultaron en contenido azucarero: C88-380, C89-148 y Co997, en rendimiento agrícola: C89-147, C86-156 y C86-56, en TPHA: C89-147 y C86-56.

## 6. Recomendaciones

- Estudiar los nuevos cultivares de caña de azúcar en la provincia de Matanzas en localidades con características suelo climáticas semejantes a la localidad Máximo Gómez, para seleccionar los genotipos tolerantes a la sequía.
- Incorporar a los proyectos de variedades de las empresas azucareras de la provincia de Matanzas los genotipos de mejor adaptación general al rendimiento agrícola (C89-147, C86-165 y C86-56), así como de adaptación específica:
  - Neda: C88-380, C90-530 y C85-102
  - 28 de Enero: Q68, C86-56, C89-148, C86-165 y C89-147
  - Gerardo Álvarez y Máximo Gómez: C88-381, C439-72 y Ja64-19.
- Utilizar como progenitores, en el Programa de Cruzamientos para las condiciones de estrés por déficit hídrico, los genotipos C89 -147, C86-165 y C86-56 por su buen comportamiento general en la producción de caña y los cultivares C88-380, C89-148 y Co997 para el contenido azucarero.

## 7. Referencias bibliográficas

- Abrantes, I. 1986. Caracterización de poblaciones en las primeras etapas de selección. 95 h. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio del Azúcar. INICA.
- Alejos, G.; Monasterio, P. y Rea, R. 2006. Análisis de la interacción genotipo - ambiente para rendimiento de maíz en la región maicera del estado Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 56 (3): 369 -384p.
- Anderson, R. L. and Bancroft. 1952. *Statistical theory in research*. Ed. Mc Graw-Hill Book, Co. New York. 399p.
- Anderson, D. L.; Boer, H. G.; Portier, K. M. 1995. Identification of nutritional and environmental factors affecting sugarcane production in Barbados. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 2887-2901.
- Annicchiarico, P. 2002. Genotype x environment interactions. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. *FAO Plant Production and Protection Paper*. p. 2 -4.
- Arrandea, M. A. 1989. Breeding strategic for drought resistance. In drought resistance in cereals. Edited by F. W. G. Baker. Published for ICSU press by C. A. B. International. p. 107 -116.
- Arévalo, R. A. y China, A. M. 2012. Taxonomía APG III en *Saccharum spp.* (caña de azúcar). *Cuba & Caña*. No. 1. INICA-MINAZ. p. 62-68.
- Atlin, G. N. and Frey, K. J. 1990. Selecting oat lines for yield in low -productivity environments. *Crop Sci.* 30: 556–561.
- Atlin, G. N. and Lafitte, H. R. 2002. Marker -assisted breeding versus direct selection for drought tolerance in rice. In N.P. Saxena and J.C. O'Toole (ed.) *Field screening for drought tolerance in crop plants with emphasis on rice*. Proc. Int. Workshop on Field Screening for Drought Tolerance in Rice, Patancheru, India. 11–14 Dec. 2000. ICRISAT, Patancheru, India and the Rockefeller Foundation, New York. p. 208.
- Baver, L. D. 1963. Practical lessons from trends in Hawaiian sugar production. *Prodc. Int. Soc. Sugar Cane Tech.* 11: 68 -77.
- Becker, H.C. & León, J. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Pl ant Breed.* 101: 1-23.

- Beltrán, F. J.; Beck, D.; Bänziger, M. and Edmeades, G. O. 2004. Genetic analysis of inbred and hybrid grain yield under stress and non stress environments in tropical maize. *Crop Sci.* 44:1519-1526.
- Benítez, Ledyá; Villegas, R.; Balmaçada, C.; Ponce de León, D.; Marín, R.; Machado, I.; Segrera, Sadys; Viñas, Yudith; Crespo, R.; Bouzo, Libia; Cortegaza, P. L.; Pérez, H. y De León, M. 2007. Evaluación de la aptitud física de las tierras dedicadas al cultivo de la caña de azúcar, base para la diversificación de la agroindustria azucarera cubana. *Cuba & Caña.* No. 2. p. 3-9.
- Bernal, N. A. 1986. Clasificación de ambientes en las provincias de Holguín, Las Tunas y Granma en los estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar. 106 h. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Agrícolas. La Habana.
- Bernal, N.; Morales, F.; Gálvez, G. y Jorge, Ibis. 1997. Variedades de caña de azúcar. Uso y Manejo. Publicaciones IMAGO. INICA. Ciudad de la Habana. 101p.
- Bennett, J. M; Sinclair, T. R; Muchow, R. C. and Castillo, S. R. 1987. Dependence of stomatal conductance on leaf water potential. Turgor in field-ground soybean and maize. *Crop. Science* 27(5): 984 -88.
- Bernier, J.; Kumar, A.; Venuprasad, R.; Spaner, D. y Atlin, G. 2007. A large - effect QTL for grain yield under reproductive-stage drought stress in upland rice. *Crop Sci* 47: 507-518.
- Bhattacharjee, D. D.; Ramakrishnayya, G. and Rand, S. C. 1971. Physiological basis of drought conditions. *Oryza* 8(2): p. 61 -68.
- Bidinger, F. R.; Hammer, G. L. and Muchow, R. C. 1996. The physiological basis of genotype environment interaction in crop adaptation. In M. Cooper & G. L.
- Bilbro, J. D. and Ray, L. L. 1976. Environment stability and adaptation of several cotton cultivars. *Crop Sci.* 16: 821 -829.
- Blanche, S. B., and Myers, G. O. 2006. Identifying discriminating locations for cultivar selection in Louisiana. *Crop Sci.* 46: 946 –949.
- Brancourt-Hulmel, M. and Lecomte, C. 2003. Effect of environmental variates on genotype-environment interaction of winter wheat: A comparison of Biadditive Factorial Regression to AMMI. *Crop Sci.* 43: 608-617.

- Bremer, G. 1925. The chromosomes of primitive forms of genus *Saccharum*. *Genética*, 7: 293-322.
- Campbell, B. T. and Jones, M. A., 2005. Assessment of genotype  $\times$  environment interactions for yield and fiber quality in cotton performance trials. *Euphytica* 144: 69-78.
- Campo, R.; Guerra, Mayra; Cuadras, F.; Hervis, Norma y Freeman, J. 1998. Variedades energéticas de caña de azúcar; una solución a la biomasa del presente y del futuro. *Cuba & Caña* No. 1. p. 10-13.
- Casanoves, F.; Baldessari, J. and Balzarini, M. 2005. Evaluation of multienvironment trials of peanut cultivars. *Crop Sci.* 45: 18 –26.
- Castro, S. 1991. Evaluación de ambientes y genotipos de caña de azúcar en la provincia Holguín. 94 h. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA.
- Centella, A.; Lapinel, B.; Solano, O.; Vázquez, R.; Fonseca, C.; Cutié, V.; Báez, R.; González, S.; Sille, J.; Rosario, P.; Duarte, L. 2006. La sequía meteorológica y agrícola en Cuba y la República Dominicana. 174 p.
- Chavanne, E.; Ostengo, S.; García, M. y Cuenya, M. 2007. Evaluación del comportamiento productivo de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) a través de diferentes ambientes en Tucumán, aplicando la técnica estadística "GGE biplot". *Rev. Industria y Agricultura*. Tomo 84 (2): 19 - 24.
- Cochran, W. G. y Cox, G. M. 1965. Diseños experimentales. 4<sup>ta</sup> re-impresión. México, D. F. Edit. F. Trillas. 661p.
- Collaku, A.; Harrison, S.; Finney, P. and Van Sanford, D. 2002. Clustering of environments of southern soft red winter wheat region for milling and baking quality attributes. *Crop Sci.* 42:58-63.
- Cornide, María T.; Lima, H.; Gálvez, G. y Sigarroa, A. 1985. Resistencia genética. Parte II. Resistencia a otros factores adversos. En: *Genética vegetal y fitomejoramiento*. Editorial Científico Técnica. La Habana. 445p.
- Crossa, J. 1990. Statistical analyses of multi location trials. *Adv. Agron.* 44:55– 85.

- Crossa, J.; Cornelius, P.; Yan, W. 2002. Biplots of Linear -Bilinear Models for studying crossover Genotype-Environment Interaction. *Crop Sci.* 42: 619-633.
- Cruz, R.; González, F. y Bending, Betty. 1989. Comportamiento de progenies de caña de azúcar en 4 localidades de las provincias orientales. IV Jornada Científica del INICA. Resúmenes. p. 8.
- Cruz, R.; Peña, L.; Cobo, Yaquelín; Argota, A. y Bending, Betty. 2000. Perspectiva del mejoramiento genético de la caña de azúcar para condiciones de estrés hidrosalino en la provincia de Holguín. Resúmenes Jornada Científica 15 años EPICA Santiago de Cuba. 7p.
- Cruz, R. 2001. Obtención de variedades de caña de azúcar tolerantes a diferentes condiciones de estrés ambiental. Proyecto CITMA. INICA. 8 p.
- Cooper, M. and Delacy, I. H. 1994. Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype by environment interaction in plant breeding multi-environment experiments. *Theoretical and Applied Genetics*. Vol. 88, No. 2. p. 561 -572.
- Daniels, J. and Roach, B. T. 1987. Taxonomy and evolution. In: Heinz, D.J. Sugarcane improvement through breeding. Amsterdam. Oxford. p. 7 - 84.
- De Armas, R.; Ortega, E. y Rodes, Rosa. 1988. Régimen hídrico . En: *Fisiología Vegetal*. Editorial Pueblo y Educación, 325p.
- Delacy, I. H.; Cooper, M. and Basford, K. E. 1996. Relationships among analytical methods used to study genotype-by-environment interactions and evaluation of their impact on response to selection. In: *Genotype -by-environment interaction*. New York: CRC. p. 51 -84.
- Duvick, D. N. 1992. Plant breeding: Past achievements and expectations for the future. *Econ. Bot.* 40:289-297.
- Eberhart, S. A. and Russell, W. A. 1966 Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, v. 6, No. 1. p. 36 -40.
- Ebdon, J. and Gauch, H. 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turf grass performance Trials. In: *Interpretation of Genotype-Environment Interaction*. *Crop Sci.* 42: 489-496.

- Edme, S. J.; Miller, J. D.; Graz, B.; Tai, P. Y. P.; Comstock, J. C. 2005. Genetic contribution to yield gains in the Florida sugarcane industry across 33 years. *Crop Sci.*, 45: 92-97.
- Estévez, Ana; Álvarez, M. y González, M. E. 1988. Aplicación del análisis multivariado en la clasificación de variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales*. Vol.10. No. 4/diciembre. p. 68 -73.
- Estévez, Ana; González, María E.; Hernández, María M.; Torres, W.; Jeréz, E.; Hernández, A.; Moreno, Irene y Sam, Ofelia. 1994. Principales resultados obtenidos en el desarrollo de la papa en condiciones de estrés de calor y humedad en Cuba. *Cultivos Tropicales (CU)* 15(2): 93-98.
- Falconer, D. S. 1970. Introducción a la genética cuantitativa. CECSA, México. p. 225-283.
- Fan, X. M.; Kang, M.S.; Chen, H.; Zhang, Y.; Tan, J. and Xu, C. 2007. Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agron. J.* 99: 220-228.
- FAO-Stat. 2012. Sugar cane area harvest, 2010. FAO Statistic Division. Disponible en <http://faostat.fao.org> [Consulta: 9 de junio de 2012].
- Ferrer, Mayra; Espino, Aída y Tomeu, Ángela. 2000a. Algunos aspectos fisiológicos de la respuesta al calor de la caña de azúcar. Resúmenes Jornada Científica 15 años EPICA Santiago de Cuba. p.31.
- Ferrer, Mayra; Sánchez, Elaine; Viqueira, Lilliam; Gómez, L. y San Juan, Zaida. 2000b. Diez años de estudios fisiológicos de régimen hídrico en caña de azúcar. Resúmenes XII Seminario Científico INCA.
- Finlay, K. W. and Wilkinson, G. N. 1963. The analysis of adaptation in a Plant - Breeding Program. *Australian Journal of Agricultural Research* . v.14, No. 5. p. 742-754.
- Florido, Marilyn; Álvarez, Martha; Lara, Regla M. y Plana, Dagmara. 2000. Screening de germoplasma de tomate (*Lycopersicon spp.*) por su tolerancia al calor. Resúmenes XII Seminario Científico del INCA. p. 174.
- Fonseca, J. y García, S. 1987. Necesidades de agua de la caña de azúcar para diferentes épocas de plantación y corte en el occidente de Cuba. Resúmenes I Encuentro Investigación – Producción en la Agricultura Cañera. INICA. 221p.

- Fox, P. N.; Crossa, J. and Romagosa, I. 1997. Multi -environment testing and genotype-environment interaction. In: KEMPTON, R. A.; FOX, P. N. (Ed.). Statistical methods for plant variety evaluation. New York: Chapman and Hall. Cap. 8. p. 117-138.
- Frisvold, G.; Sullivan, J.; Ranases, A. 1999. Who gains from genetic improvements in U. S. crops. *AgBioForum*. 2: 237-246.
- Gabriel, K. R. 1971. The Biplot graphic display of matrices with applications to principal components analysis. *Biometric*. 58 (3): 453 -467.
- Gálvez, G. 1978. Estudio de la interacción g x e y métodos de estabilidad en experimentos de variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.* híbrido). 76 h. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Agrícolas. INCA.
- Gálvez, G.; Domini, M. G.; Calaha, J. M.; y De la Fé C. 1983. Estudio de la repetibilidad del parámetro de estabilidad en el rendimiento y calidad del jugo de la caña de azúcar (*Saccharum spp.* Hib.). XVIII Cong. ISSCT. 1:161-172pp.
- García, A. y González, M. 1997. Marcador morfológico para la selección temprana de variedades de arroz tolerantes a la sequía. *Cultivos Tropicales (CU)* 18(2): 47-50.
- García, S.; Pérez, J.; Romero, R.; Ricondo, P.; García, E. y Lorente, R. 2003. Resultados de la extensión del riego por goteo subterráneo en productores cañeros de altos rendimientos. *ATAC* No. 2. p. 20 -25.
- García, H. 2004. Optimización del proceso de selección de variedades de caña de azúcar tolerantes al estrés por sequía y mal drenaje en la Región Central de Cuba. Cienfuegos. 117 h. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio del Azúcar. INICA.
- Gauch, H. G. 1988. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*. 44: 705-715.
- Gauch, H. G. 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI Analysis of Factorial Designs. New York: Elsevier (Chinese edition 2001, Hangzhou: China National Rice Research Institute).
- Gauch, H. G. and Zobel, R. W. 1996. AMMI analysis of yield trials. In *Genotype-by-Environment Interaction*. Editors M.S. Kang and H. G. Gauch, CRC Press, Boca Raton, Florida. p. 85 -122.

- Gauch, H. G. 2007. MATMODEL Version 3.0: Open source software for AMMI and related analyses. Crop and Soil Sciences, Cornell University, Ithaca, NY 14853.
- Gauch, H. G.; Hans-Peter, P. and Annicchiarico, P. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further Considerations. Crop Sci. 48: 866–889.
- Gilbert, R. A., Shine, J. M., Miller, J. D., Rice, R. W. and Rainbolt, C. R. 2006. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. Field Crops Research. 95: 156 -170.
- Glaz, B. and Kang, S. M. 2008. Location contributions determined via GGE Biplot Analysis of Multi-environment sugarcane Genotype-Performance Trials. Crop Sci. 48: 941-950.
- Gómez, Lourdes; Viqueira, Lilliam y Rodríguez, C. R. 1981a. Estudio de la tolerancia a la sequía de la caña de azúcar. Memoria 43 Conferencia ATAC. p. 113-131.
- Gómez, Lourdes; Viqueira, Lilliam y Rodríguez, C. R. 1981b. Relación entre la tolerancia a la sequía y a las altas temperaturas en la caña de azúcar. Ciencias de la Agricultura (CU) 10: 17-21.
- González, R. y Cruz, Caridad. 1987. Requerimientos de riego de la caña de azúcar en suelos Ferralíticos rojos. Resúmenes I Encuentro Investigación – Producción en la Agricultura Cañera. INICA. 234 p.
- González, A. 1995. Caracterización del efecto ambiental en estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar en la provincia Las Tunas. 120 h. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA.
- González, R. M.; Tomeu, Ángela; Jorge, H.; Santana, I. y Vega, A. 2001. La producción de variedades de caña de azúcar. Retos para el presente milenio. En: Contribución al conocimiento y manejo de las variedades de caña de azúcar. Curso de capacitación UASTEC. INICA. La Habana. 75 p.
- González, L. M.; Argentel, L.; Estrada, A.; Saldivar, N.; Ramírez, R. 2005. Evaluación de la tolerancia a la sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtenido en Cuba por inducción de mutantes. Rev. Cultivos Tropicales. Vol. 26, No. 3. p. 65-69.

- Gordón, M. R.; Camargo, B.; Franco, B. y González, S. 2006. Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz. Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17(2): 189-199 p.
- Grassl, C. O. 1974. The origin of the sugar cane. *ISSCT Sugarcane Breed. Newsl.* 34:10-18.
- Grassl, C. O. 1977. The origin of the sugar cane producing cultivars of *Saccharum*. *Sugar Cane Breed. Newsl.* 39: 8-23.
- Guntín, P. M. y Tejeda, V. M. 2007. Un estudio de las condiciones edafoclimáticas en el norte de la provincia cubana de Las Tunas para el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo de la caña de azúcar. *Cuba & Caña.* No. 3. p. 12-18.
- Hall, A. E. 1990. Breeding for heat tolerance an approach based on Whole Plant Physiology. *Hort Science* 25: 17-18.
- Hamdi, H. 2009. Bases para el establecimiento de un programa de mejora genética de la caña de azúcar para las condiciones de estrés ambiental de la provincia Khuzestán, Irán. 98 h. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA.
- Hanson, W. D. 1994. Distance statistics and interpretation of Southern states regional soybean tests. *Crop Science.* v. 34, No. 6. p. 1498-1504.
- Hartmut, G.; Hupfer, P.; Lozán, J. L. 2001. Revista Introducción al problema Global del Clima.
- Henckel, P. A. 1964. Physiology of plants under drought. *Ann. Plant Physiology* 15:363-386
- Hernández, A.; Pérez, J. M.; Bosch, D. y Rivero, L. 1999. Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. *AGRINFOR.* 64 pp.
- Hernández, I. A. 2007. Requerimientos hídricos para la caña de azúcar en las condiciones de bajo nivel pluviométrico. *Cuba & Caña.* No. 3. p. 3-11.
- Hogarth, D. M. 1968. A review of quantitative genetics in plant breeding with particular reference to sugar cane. *Journal of the Aust. J. Agric. Res.* 22: 93-182.
- Hogarth, D. M. 1976. New varieties lift sugar production. *Producers Rev.,* 66(10):21-22.

- Holland, J.; Bjornstad, A.; Frey, K.; Gullord, M. and Wesenberg, M. 2002. Recurrent selection for broad adaptation affects stability of oat. *Euphytica*. 126: 265-274.
- Hühn, M. 1979. Beitrage zur erfassung der phanotypisoher stabilitad. I. Vorschlag ciniger auf. Rang ginformationen beerunhenden stabilitats parameter. *E D. V med. U. Biol.* 10 (4): 112 -117.
- Ibañez, M. A., Di Renzo, M. A., Samame, S. S., Bonamico, N. C. and Poverente, M. M. 2001. Genotype - environment interaction of love grass forage yield in the semi-arid region of Argentina. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 137: 329–336.
- Iglesias, Lourdes. 1994a. Revisión sobre diversos aspectos relacionados con la tolerancia al estrés de calor en plantas. *Cultivos Tropicales (CU)* 15(2): 99-107.
- Iglesias, Lourdes. 1994b. Avances en el conocimiento de las bases genética y molecular de la respuesta de las plantas a los estrés ambientales, específicamente al calor. *Cultivos Tropicales (CU)* 15(2): 64 -73.
- Iglesias, Lourdes. 1995. Caracterización de la composición d e proteínas totales en variedades de tomate con diferentes grados de tolerancia al calor. *Cultivos Tropicales (CU)* 16(1): 77-80.
- INICA. 2012. Informe de la XX Reunión Nacional de Variedades, Semilla y Sanidad Vegetal. Matanzas. Abril. p. 9.
- Jongdee, B.; Fukai, S. and Cooper, M. 2002. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice. *Field Crop Res.* 76:153–163.
- Jorge, H.; García, H.; Rodríguez, E. y Jiménez, N. 1989. Clasificación de las localidades en experimentos de variedades de caña de azúcar en la provincia de Cienfuegos. *Revista ATAC No. 4* . p. 28-36.
- Jorge, H. y García, H. 1994. Influencias de las variables agro climáticas en los estudios de clasificación de ambientes. Fondo Nacional de Manuscritos Científico Técnico de la BNLT-IDICT/MCITMA.
- Jorge; H. 1996. Estudio genético de los componentes agroazucareros en las etapas clonales del esquema de selección partiendo de posturas aviveradas de caña de azúcar (*Saccharum spp*). 90 h. Tesis presentada en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Agrícolas. INICA.

- Jorge, H.; Bernal, N.; Ojeda, Eulalia; Díaz, R.; González, R.; Jorge, Ibis y García, H. 2000. Programa de Mejoramiento Genético para los suelos de mal drenaje. Resúmenes Jornada Científica 15 años EPICA Santiago de Cuba. p. 14.
- Jorge, H.; González, R.; Casas, M. y Jorge, Ibis. 2002. Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba. Boletín No. 1. Cuba & Caña. 308p.
- Jorge, H.; Suárez, O.; García, H.; Jorge, Ibis; Santana, I. y Crespo, R. 2003. Diversificación de la caña de azúcar: Uso en la alimentación del ganado vacuno. Edición PUBLINICA. Ciudad de La Habana. 28p.
- Jorge, H. 2005. Metodología para la plantación y evaluación de las pruebas de fuego. Folleto Inédito. MINAZ-INICA. 10p.
- Jorge, Ibis; Jorge, H.; Pérez, G.; Cabrera, L.; Díaz, R.; García, H.; Vera, A. Caraballosa, V; González, A.; Vallina, J.; Castro, S.; Cruz, R.; Rodríguez, R.; Bernal, N.; Mesa, J. M.; Suárez, O.; Almeida, R.; González, R.; Tuero, Susana; Games, H.; Campo, R.; Ojeda, Eulalia y Céspedes, Adrián. 2007. Variedades de caña de azúcar en Cuba, problemas y soluciones. 60 Aniversario de EPICA Matanzas. ISSN 1028 -6527.
- Jorge, H.; Jorge, Ibis; Bernal, N. 2010. Catálogo. Nuevas variedades de caña de azúcar. INICA. ISSN: 978 959 7210 19 1. p. 23 -24.
- Jorge, H; Ibis Jorge, Mesa, J. M., Bernal, N. y col. 2011. Normas y Procedimiento del Programa de Fitomejoramiento de la Caña de Azúcar en Cuba. Actualización. ISSN 1028-6527. pp. 145-188.
- Kang, M. S. and Magari, R. 1996. New development in selecting for phenotypic stability in crop breeding. In: Genotype-by-environment interaction. New York: CRC. p. 1-14.
- Kang, M. S. 1998. Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. Adv. Agron. 62: 199-252.
- Kang, M. S.; Aggarwal, V. D., and Chirwa, R. M. 2005. Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield stability statistic and GGE Biplot analysis. J. Crop Improve. 15: 97-120.
- Lapinel, B.; Cutre, V. y Fonseca, C. 2010. ¿Se humedecerá la sequía? Granma (Cu), junio 12:8.

- Lavoranti, J. O. 2003. Estabilidade e adaptabilidade fenotípica através da reamostragem "bootstrap" no modelo AMMI. 166 h. Tese apresentada a Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doctor em Agronomia, Área de Concentração: Estatística e Experimentação Agronômica. Piracicaba.
- López, E. P. 1986. Influencia de algunos factores del ambiente sobre el rendimiento y aplicación de tres métodos de estabilidad en los estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en las provincias de Camagüey y Ciego de Ávila. 198 h. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Universidad Agraria de La Habana.
- Magari, R. and Kang, M. 1993. Genotype selection via a new yield stability statistic in maize yield trials. *Euphytica* 70:105-111.
- Magari, R. and Kang, M. S. 1997. Sas Stable: stability analysis of balanced and unbalanced data. *Agronomy Journal*. V. 89. No. 5. p. 929-932.
- Mago, P. 1986. El suelo y su manejo en caña de azúcar. FONAIAP DIVULGA. No. 20. Enero-Marzo.
- Margarey, R. C. and Mewing, C. M., 1994. Effect of sugarcane cultivars and environment on inoculum density of *Pachymetra chaounorhiza* in Queensland. *Plant. Dis.* 78: 1193-1196.
- Mariotti, J. A.; Oyarzabal, E. S.; Osa, J. M.; Bulacio, A. N. R.; Almada, G. H. 1976. Análisis de estabilidad y adaptabilidad de genotipos de caña de azúcar. Interacciones dentro de una localidad experimental. *Revista Agronómica Argentina*. v. 13. p. 105-127.
- Martínez, R.; Solís, A.; Cabrera, F. y Parra, Reyna. 2000. Evaluación de líneas de tomate resistentes a escasa humedad. Resúmenes XII Seminario Científico INCA. p. 170.
- Martín, J. A. 2004. A comparison of statistical methods to describe genotype x environment interaction and yield stability in multi-location maize trials. 100h. Thesis for the Master degree Sciences Agricultural. Faculty of Agriculture, Department of Plant Sciences. University of the Free State Bloemfontein. South Africa.
- Menossi, M.; Silva-Filho, M. C.; Vincentz, M.; Van-Sluys, M. A. and Souza, G. M. 2008. Sugarcane functional genomics: gene discovery for agronomic

- trait development. International Journal of Plant Genomics. Article ID 458732. 11p.
- Milanés, N. y López, E. 1986. Propuesta de nuevo esquema de selección de la caña de azúcar en Cuba. INICANA. Boletín. Septiembre.
- Milanés, N.; Cabrera, L. y Mesa, A. 1988. Interacción gxe y clasificación de ambientes en la tercera etapa del esquema de selección de caña de azúcar. Influencia de las propiedades físico-químicas del suelo. Revista INICA. p. 11.
- Milanés, N.; Pérez, G.; Caballero A.; Méndez, F. y García, H. 1992. Interacción genotipo x ambiente en la etapa de selección de posturas de la caña de azúcar en Cuba. Logro del INICA.
- Milanés, N.; Mesa, J. M.; Balance, María C. y Hervis, Norma. 1997. Recomendación de variedades de caña de azúcar para la ganadería en la provincia de La Habana. ATAC (CU) 2. p. 13.
- Milligan, S. B., Gravois, K. A., Bischoff, K. P. and Martin, F. A., 1990. Crop effects on broad-sense heritability and genetic variances of sugarcane yield components. Crop Sci. 30, 344–349.
- MINAZ, 2009. Estrategia para la producción de caña 2009 -2013. Ministerio del Azúcar. 20 pp.
- Mukherjee, S. K. 1957. Origin and distribution of *Saccharum*. Bot. Gaz. v. 119. p. 55-61.
- Muriel, J. L. y Guerra, J. M. 1984. Free proline and reducing sugar accumulation in water - stressed sunflower plants. Span: An INIA. Ser. Prod. Veg. 26: p36-46.
- Nachit M., Ketata, H.; Gauch, G. y Zobel, R. 1992. Use of AMMI and linear regression models to analyze genotype-environment interaction in durum wheat. Theoretical and Applied Genetics. 83(5): 597 -601.
- Nayak, D.; Bose, L.; Singh, S.; and Nayak, P. 2008. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of host-pathogen relationship in rice-bacterial blight path system. Plant Pathol. J. 24(3): 337 -351.
- Naveed, M.; Nadeem, M.; Islam, N. 2007. AMMI analysis of some upland cotton genotypes for yield stability in different milieus. World Journal of Agric. Sci. 3(1): 39-44.

- Ojeda, Eulalia. 1995. El método del postuclon como vía para la obtención de variedades de caña de azúcar con madurez temprana. 102 h. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio del Azúcar. INICA.
- ONS (Observatorio Nacional de Sequía). 2008. Información básica sobre sequía. España. Disponible en: [http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas\\_continent\\_zonas\\_asoc/ons/obras\\_ons/index.htm](http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/ons/obras_ons/index.htm) [Consulta: 28 de mayo 2008].
- Ortiz, R.; Ponce, M.; Caballero, A. y de la Fé, C. 2000. Evaluación de una colección de germoplasma de soya (*Glycine max.* L. Merrill) en condiciones abióticas estresantes. Resúmenes XII Seminario Científico del INCA. p. 172.
- Otoo, E. and Asiedu, R. 2008. GGE biplot analysis of *Dioscorea rotundata* cultivar "DENTE" in Ghana. African Journal of Agricultural Research Vol. 3 (2), pp. 115-125. Disponible en: <http://www.Academicjournals.org/AJAR> [Consulta: mayo de 2009].
- Pantuwan, G.; Fukai, S.; Cooper, M.; Rajatasereekul, S. and O'Toole, J. C. 2002. Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) to drought under rainfed lowlands: 3. Plant factors contributing to drought resistance. Field Crop Res. 73:181–200.
- Patade, V. Y. and Suprasanna, P. 2008. Radiation induced in vitro mutagenesis for sugarcane improvement. Sugar Tech. 10, 1:14 -19.
- Patade, V. Y.; Suprasanna, P. and Bapat, V. A. 2008. Gamma irradiation of embryogenesis callus cultures and in vitro selection for salt tolerance in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). Agriculture Sciences in China. Plant Cell Culture Technology Section. 7, 9: 1147 -1152.
- Pérez, L. J.; Cuellar, A.; De León, M.; Santana, S.; Fonseca, A.; Pérez, I. M. 2004. Caña de azúcar: Captación, conservación y manejo del agua y la humedad del suelo. Cuba & Caña. Boletín especial No.1. p. 43.
- Pérez, F. H. y Fernández, F. 2006. Métodos analíticos para azúcar crudo. Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras. Publicaciones Azucareras. ISBN 959-7140-18-7. p. 79-81.

- Pineda, Enma. 2002. Los factores edáficos y la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes. 123 h. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Ministerio de Educación Superior. UAH. La Habana.
- Plaisted, R. L. and Peterson, L. C. 1959. A technique for evaluating the ability of selection the yield consistently in different locations or seasons. *American Potato Journal*. v. 36. No. 6. p. 381-385.
- Ponce de León, D. y Balmaceda, C. 1999. El recurso suelo en el cultivo de la caña de azúcar. Instituto Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar. La Habana. 115p.
- Quemé, J. L.; Crossa, J.; Orozco, H. and Melgar, M. 2007. Analysis of genotype-by-environment interaction for sugarcane using the sites regression model (SREG). *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* Vol. 26: 764-769.
- Reynoso, A. 1962. Ensayo sobre el cultivo de la caña de azúcar. Tercera Edición, corregida y aumentada. París. p. 372.
- Rodríguez, R.; Bernal, N.; Jorge, H.; García, H. and Puchades, Yaquelin. 2010. Genotype by environment interaction for yield in sugarcane performance trials: A comparison of frequently used models. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* Vol. 27.
- Rodríguez, R. 2012. Perfeccionamiento del programa de mejora genética de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para la obtención de nuevos genotipos tolerantes al estrés por déficit hídrico. 120 h. Tesis presentada en opción al grado de científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana.
- Samarah, N. H.; Mullen, R. E.; Cianzio, S. R. and Scout, P. 2006. Dehydrin -like proteins in soybean seeds in response to drought stress during seed filling. *Crop Sci.* 46: 2141-2150.
- Shishov, L. 1983. Factores del suelo que limitan el crecimiento y la productividad de la caña de azúcar. Inédito. 16p.
- Silva, J. G. C. and Barreto, J. N. 1986. An application of segmented linear regression to the study of genotypes environment interaction. *Biometrics*. v. 41, No. 4. p. 1093.
- Silva, M. A.; Soares, R. A. B.; Landell, M. G. A. and Campana, M. P. 2007. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* Vol. 26. p. 613-623.

- Singh, S. and Reddy, M. S. 1980. Growth, yield and juice quality performance of sugarcane varieties under different soil moisture regimes in relation to drought resistance. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 17: 541 -555.
- Shukla, G. K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype - environmental components of variability heredity. *V.29. No.2.* p. 237 -245.
- Smith, E. P. 2002. Biplot program. Statistics Department of Virginia Tech. Disponible en: <http://www.stat.vt.edu/facstff/epsmith.html> [Consulta: Enero de 2010].
- StatSoft, Inc. 2007. STATISTICA (Data Analysis Software System) versión 8.
- Storck, L. and Vencovsky, R. 1994. Stability analysis on a bi-segmented discontinuous model with measurement errors in the variables. *Revista Brasileira de Genética.* V.17. No. 1. p. 75 -81.
- Tai, G. 1971. Genotypic stability analysis and its application to potato regional trials. *Crop Science.* V. 11. No. 2. p. 184-90.
- Toorchi, M., Shashidhar, H. E.; Gireesha, T. M. and Hittalmani, S. 2003. Performance of backcross involving transgressant doubled haploid lines in rice under contrasting moisture regimes: Yield components and marker heterozygosity. *Crop Sci.* 43:1448–1456.
- Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente . EGRAF S. A. Madrid. ISBN: 84-8014-552-8. p. 164-168.
- Varela, M. y Castillo, J. 2005. Modelos con término multiplicativo. Aplicación en el análisis de la interacción Genotipo Ambiente. *Cultivos Tropicales.* Vol. 26 No. 3. p. 71-75.
- Vega, A. 1993. Evaluación de algunos aspectos relacionados con la etapa intermedia de selección de la caña de azúcar en Cuba. 103 h. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Agrícolas. Ministerio del Azúcar. INICA.
- Vencovsky, R. and Torres, R. A. A. 1988. Estabilidad geográfica e temporal de algunas cultivares de milho. In: *Congresso Nacional de Milho e Sorgo*, 16. Belo Horizonte, Anais. Belo Horizonte: EMBRAPA, CNPMS. p. 294 - 300.

- Verma, M. M.; Chahal, G. S. and Murty, B. R. 1978. Limitations of conventional regression on analysis a proposed modification. Theoretic al and Applied Genetics. V. 53. p. 89-91.
- Villegas, R. y Benítez, Ledyá. 2003. Evaluación de la aptitud física de las tierras dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en Cuba, base para la diversificación de la agroindustria azucarera. Informe INICA, MINA Z.
- Watson, L. and Dallwitz, M. J. 2011. Grass genera of the world *Saccharum* L. Disponible en:<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/delta/grass/www/Saccharum.htm>. [Consulta: 12 de julio 2011].
- Westcott, B. 1987. A method of assessing the yield stability of crop genotypes. J. Agric. Sci 108: 267-274.
- Wikipedia. 2011. Sistema de clasificación APG III, 2009. p.1. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/S/Sistema\\_de\\_clasificac](http://es.wikipedia.org/wiki/S/Sistema_de_clasificac) C3 B3nAPGIII. [Consulta: 23 de julio 2011].
- Wricke, G. 1962. Ubereine methode zur erfassung der okologischen streubreite in feldversuchen. Zeitschrift fur Panzenz uchtung. V. 47. No.1. p. 92 -96.
- Wricke, G. and Weber, E. W. 1986. Quantitative genetics and selection in plant breeding. Berlin: Walter de Druyter. 406p.
- Yan, S. 1995. Regression and AMMI analysis of genotype -environment interaction. An empirical comparison. Agron. J. 87:121 -126.
- Yan, W. 2001. GGE biplot – A Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. Agron. J. 93:1111-1118.
- Yates, F. and Cochran, W.G. 1938. The analysis of groups of experiments. The Journal of Agricultural Science. V. 28. No. 4. p. 556-580.

## 8. Anexos

### Anexo 1. Características de los suelos en estudio

Características	Unidad Medida	Neda	28 de Enero	Gerardo Álvarez	Máximo Gómez
pH KCl	-	6,1	4,6	6,0	5,8
Fósforo asimilable	mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100g	4,91	1,92	3,00	3,66
Potasio asimilable	mg K <sub>2</sub> O/100g	10,00	9,36	13,50	22,61
Materia orgánica	%	2,99	2,96	3,30	2,40

Anexo 2. Precipitaciones mensuales de la media histórica, comparadas con la media mensual durante el periodo de desarrollo de los estudios en cada localidad

