

# RELACIÓN ENTRE LOS AZÚCARES REDUCTORES TOTALES (ART), GRADOS BRIX Y EL CONTENIDO DE SACAROSA EN MEZCLAS DE ALIMENTACIÓN A DESTILERÍAS EN LA PRODUCCIÓN DUAL AZÚCAR –BIOETANOL EN COLOMBIA

C. RAMÍREZ\*; Y. PEREZ\*; V. KAFAROV\*; C. BARAJAS\*; E. CASTILLO\*\*

\* Universidad Industrial de Santander

CIDES: Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía

\*\*CENICAÑA, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia  
1cisyc@uis.edu.co

*Fecha Recepción: 13 de Febrero de 2009*

*Fecha Aceptación: 20 de Marzo de 2009*

---

## RESUMEN

Se realizó un estudio, donde se buscó una relación matemática que permitiera expresar los Azúcares Reductores Totales (ART) en función de los grados Brix y el contenido de sacarosa en las mezclas que se alimentan como materia prima a una destilería en un ingenio azucarero para que puedan extrapolarse a los demás ingenios con destilerías anexas en Colombia; esto, dado que los ART son una medida indirecta del azúcar disponible en los jugos, melazas y mieles para ser fermentado. Las variedades de caña presentes en este estudio son la CC 8592 y la LCP 85-384 que son las más cosechadas en Colombia.

**Palabras claves:** *Mínimos Cuadrados, Correlación, Azúcar, Bioetanol.*

## ABSTRACT

A study was conducted, which sought a mathematical relationship that would allow to express the reducing sugars Totals (ART) in terms of degrees Brix and sucrose content in the mixtures that feed as raw material for distillation at a sugar refinery, dueto the ART is an indirect measure of the sugar available in juices, molasses and honey to be fermented.

**Keywords:** *Minimum Square, Correlation, Sugar, Bioethanol.*

---

## INTRODUCCIÓN

La producción de caña de azúcar es una de las más importantes actividades económicas en Colombia, principalmente debido a su alta eficiencia y competitividad. Por otra parte irrumpe la era del bioetanol como respuesta a la oxigenación de la gasolina Ley 693/2001. Para una fácil y rápida integración de los productos azúcar y bioetanol, se destinan mieles residuales y parte de jugos claros a la producción de bioetanol.

La producción de azúcar y bioetanol a partir de caña de azúcar puede describirse como un proceso compuesto de doce etapas principales, en

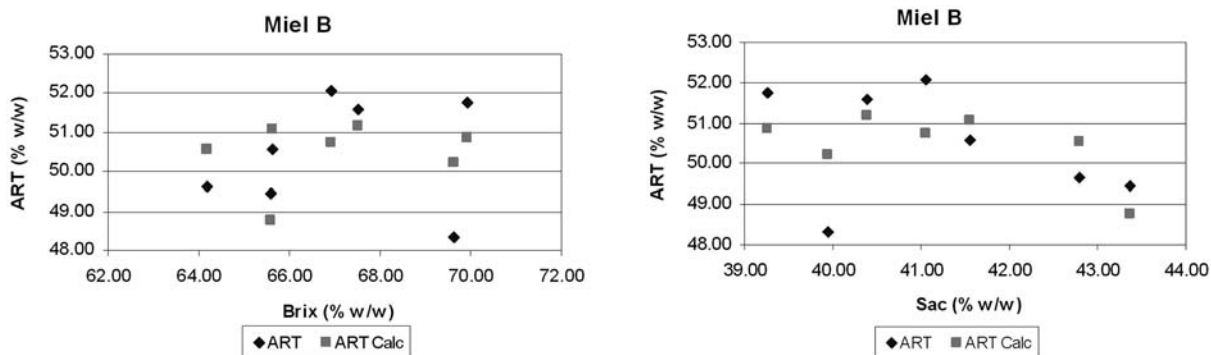
el área de producción de azúcar las etapas son: molienda, clarificación, evaporación, cristalización, separación o centrifugación, refinación, secado y en la parte de producción de bioetanol son: Acondicionamiento del alimento, hidrólisis, fermentación, separación, deshidratación, y tratamiento de efluentes (ver Figura 1).

En el presente trabajo se encontró una correlación matemática que permite expresar los Azúcares Reductores Totales (ART) como función de los grados Brix y el Porcentaje de Sacarosa Aparente (Sac Aparente), que puede ser aplicable a diferentes mezclas de materias primas utilizadas como alimento a la destilería.

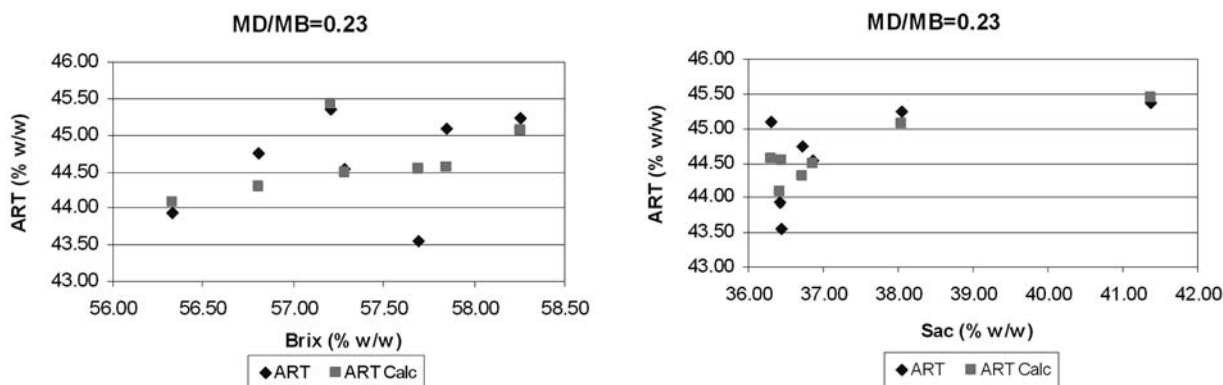


**Tabla 1.** Coeficientes de la correlación para los distintos alimentos y períodos de alimentación

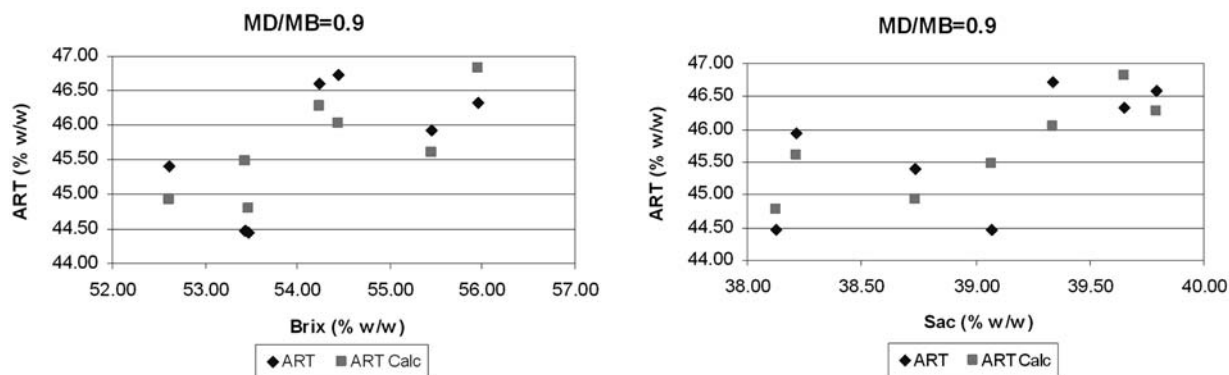
ALIMENTO	a1	a2	b	R <sup>2</sup>
Miel B	-0.720191211	-1.26424054	150.855029	0.339536778
MD/MB = 0.23	0.331352127	0.21542582	17.5688373	0.46211358
MD/MB = 0.9	0.370979121	0.72246374	-2.58948937	0.589026382
MD/MB = 1.05	0.368564621	0.36016302	11.3135207	0.76576971
JC y MB	0.658955616	-0.21927568	16.2783097	0.97273262
JC, MD y MB	0.402145634	0.82838234	-5.63262402	0.51985923



**Figura 2.** Variación de los ART y ART Calc. con el Brix y el % Sacarosa para un período de alimentación de Miel B



**Figura 3.** Variación de los ART y ART Calc. con el Brix y el % Sacarosa para el período de alimentación de MD/MB=0.23

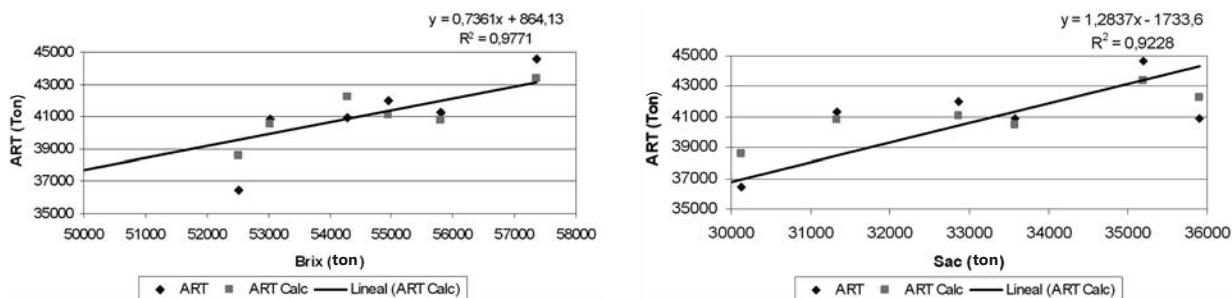


**Figura 4.** Variación de los ART y ART Calc. con el Brix y el % Sacarosa para el período de alimentación de MD/MB=0.9

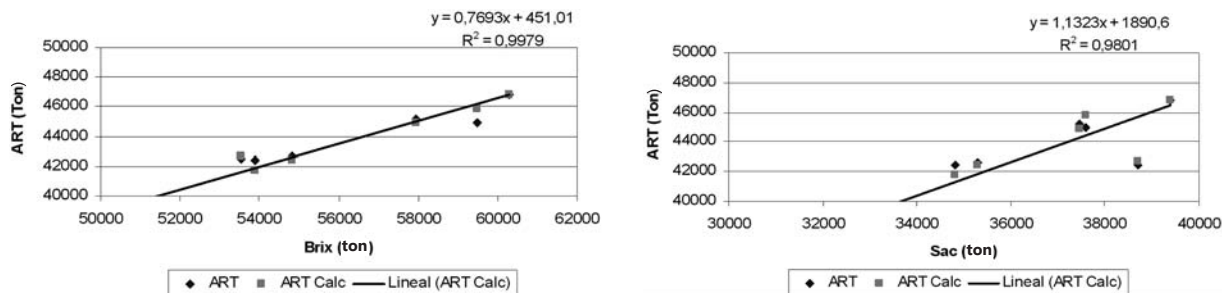


**Tabla 2.** Coeficientes mágicos de la correlación para los distintos alimentos y períodos de alimentación

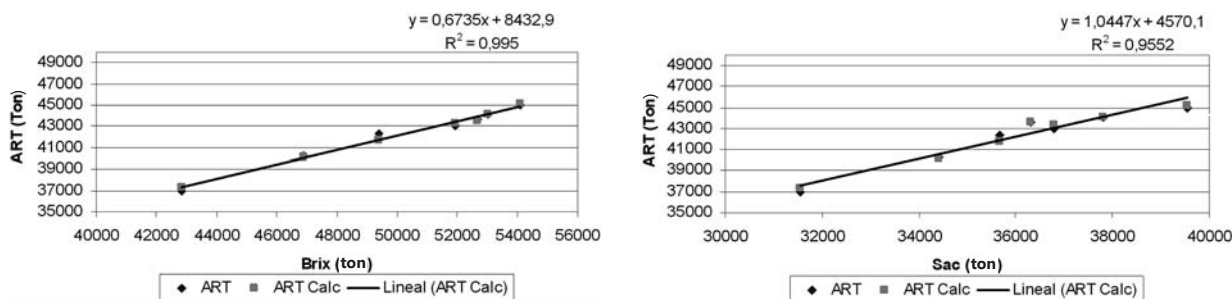
ALIMENTO	a1	a2	b	R <sup>2</sup>
Miel B	0,492721738	0,48123324	-1794,81316	0,957756177
MD/MB = 0.23	0,584014229	0,28001688	548,3125814	0,997677515
MD/MB = 0.9	0,509735294	0,27017536	6914,20318	0,984855107
MD/MB = 1.05	0,536880514	0,39350306	705,7478678	0,992776997
JC y MB	0,636140954	0,3561008	-2425,00664	0,930234663
JC, MD y MB	0,347957558	0,74747692	375,4631177	0,917322897



**Figura 8.** Variación de los ART y ART Calc. mágicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de Miel B



**Figura 9.** Variación de los ART y ART Calc. mágicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de MD/MB=0.23



**Figura 10.** Variación de los ART y ART Calculados mágicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de MD/MB=0.9

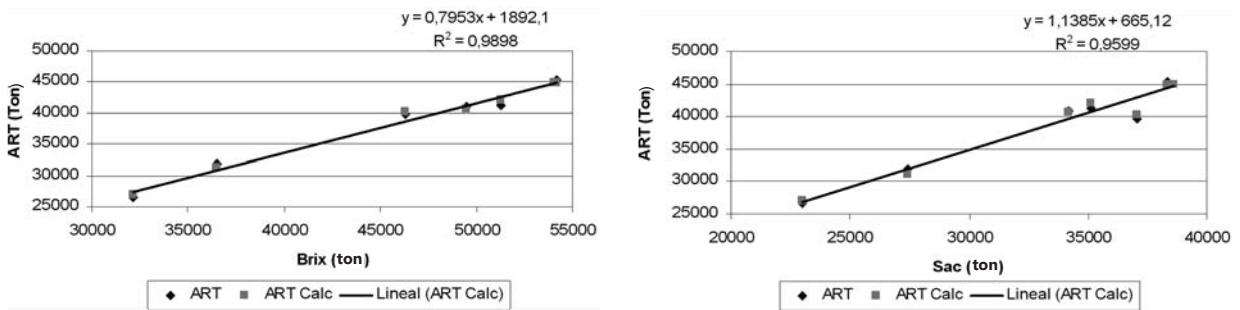


Figura 11. Variación de los ART y ART Calc. másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de MD/MB=1.05

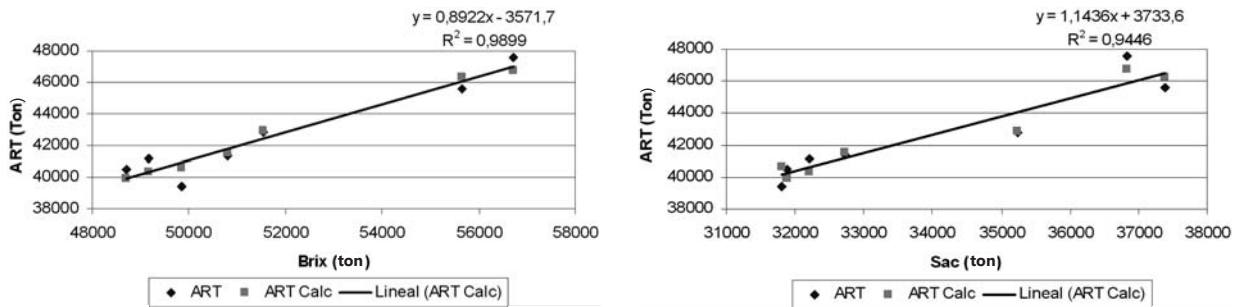


Figura 12. Variación de los ART y ART Calc. másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de JC-MB

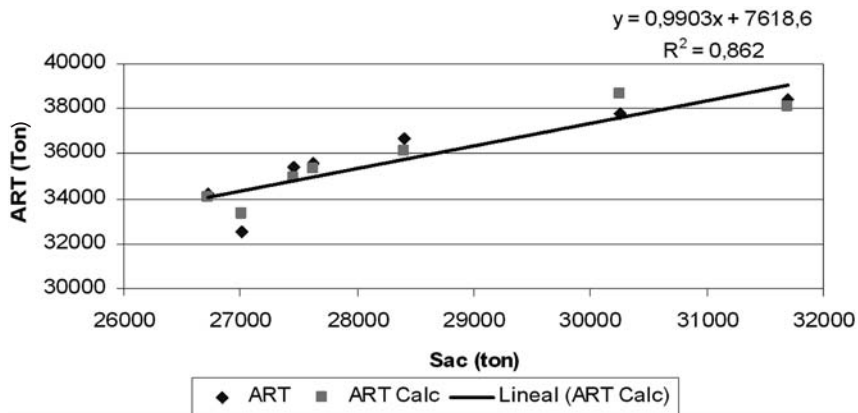


Figura 13. Variación de los ART y ART Calc. másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de JC-MD-MB

De igual forma se obtuvo una correlación para el histórico de 2007 en los períodos en que estuvo operando la planta; en esta información se cuenta

con todas las mezclas de alimento realizadas en dicho período. (ver Tabla 3).

Tabla 3. Coeficientes másicos de la correlación para el período 2007

a1	a2	b	R <sup>2</sup>
0.40479932	0.616725236	149.603988	0.99071312



En general se aprecia una buena correlación entre los datos medidos por el ingenio y los calculados mediante la correlación, reflejada en la buena concordancia en todo el rango de las variables independientes: Brix y Sac, expresadas en toneladas.

Se observa una alta correlación (>0.9) para todas las mezclas y períodos de tiempo analizados (Tabla 2), llegando incluso a valores a 0.99 para el caso de las mezclas de MD/MB=0.23 y 1.05. Los valores más bajos se observaron en los períodos de tiempo en que se alimentaron las mezclas de JC-MB y JC-MD-MB (0.93 y 0.92 respectivamente). Existe igualmente un amplio rango de Coeficientes de variación, explicado en los valores de flujo de alimento, que en algunos días de operación del ingenio registraba valores bajos (< 600 ton/día) y otros dentro de lo normal (600-1000 ton/día).

Se aprecia además que al tomar un período de tiempo amplio, se logra obtener una buena correlación y una tendencia lineal para los datos analizados. Con lo anterior se puede verificar que es posible relacionar los ART con los grados

Brix y el contenido de sacarosa (expresados por toneladas de alimento) de las mezclas o materias primas alimentadas a destilería. Sin embargo se aprecia que cada correlación es diferente por mezcla, lo que implicaría tener que conocer la relación exacta de las materias primas utilizadas para determinar cual utilizar, convirtiéndose esto en una dificultad. Por tal motivo se compararon las correlaciones entre si con los valores medidos por el ingenio, buscando encontrar una de ellas que pueda ser usada para todas las mezclas.

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a las correlaciones que mejor se acomodan al amplio espectro de posibles combinaciones de alimento o mezclas de alimentos. La correlación Global es la obtenida del análisis del período 2007. (ver Figuras 14-17).

El %Error se calculó como el promedio de los errores diarios, los cuales se determinaron como sigue:

$$\%Error = 100 * (ART - ART \text{ Correlación}) / ART \quad (2)$$

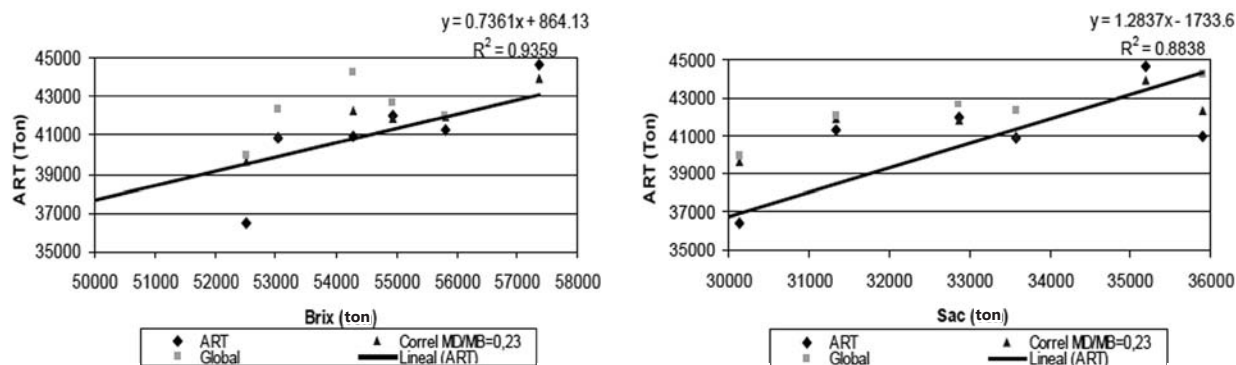


Figura 14. Comparación de la variación de los ART y ART Calc. por correlación, másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de Miel B

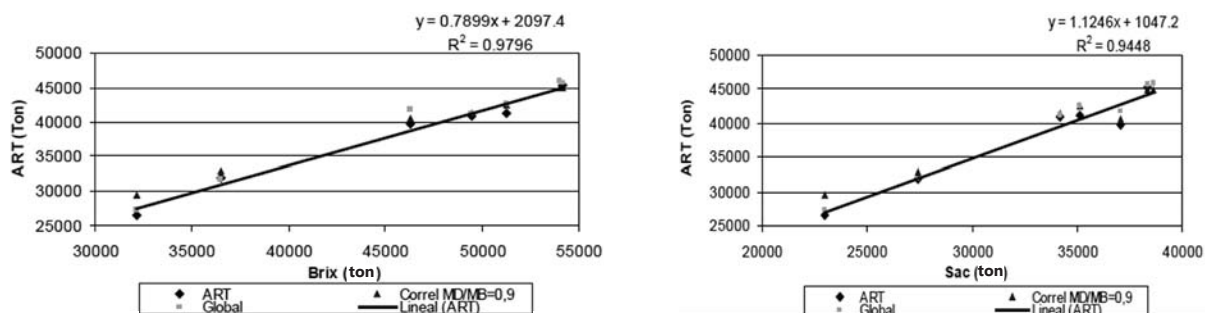


Figura 15. Comparación de la variación de los ART y ART Calc. por correlación, másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de MD/MB=1,05

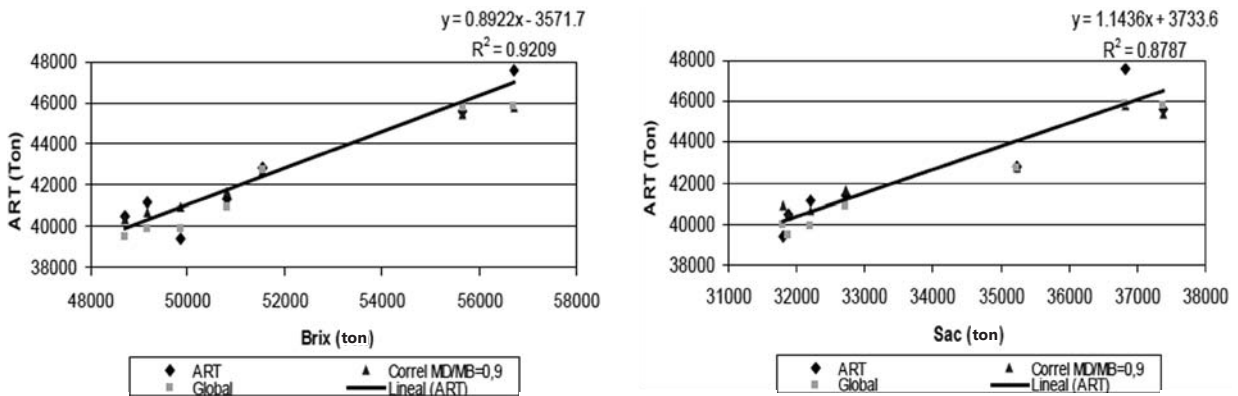


Figura 16. Comparación de la variación de los ART y ART Calc. por correlación, másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de JC-MB

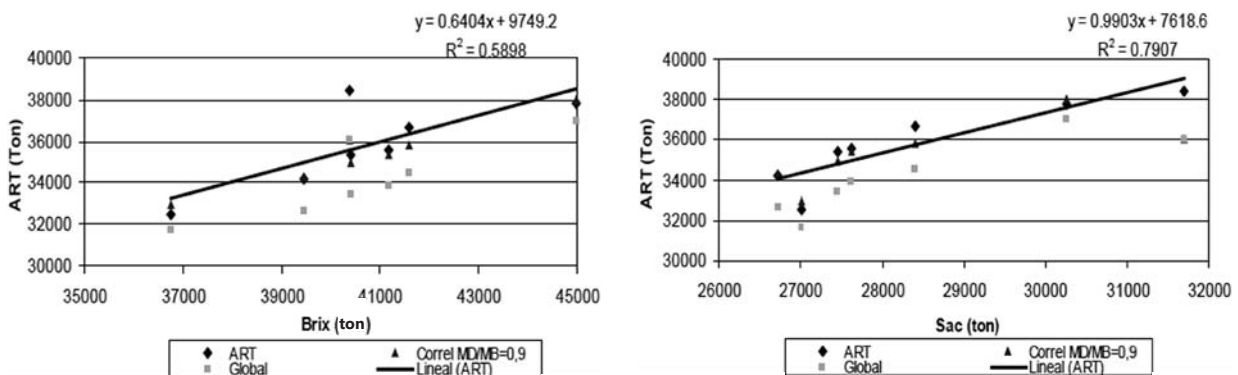


Figura 17. Comparación de la variación de los ART y ART Calc. por correlación, másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período de alimentación de JC-MD-MB

Las correlaciones utilizadas se representan por las ecuaciones:

MD/MB=0.23

$$\text{ART (ton)} = 0,584 \cdot \text{Brix (ton)} + 0,280 \cdot \text{Sac (ton)} + 548,313 \quad (3)$$

MD/MB=0.9

$$\text{ART (ton)} = 0,510 \cdot \text{Brix (ton)} + 0,270 \cdot \text{Sac (ton)} + 6914,203 \quad (4)$$

Global

$$\text{ART (ton)} = 0,405 \cdot \text{Brix (ton)} + 0,617 \cdot \text{Sac (ton)} + 149.604 \quad (5)$$

El análisis estadístico se realizó utilizando la prueba *t student* para varianzas desconocidas y diferentes. Se observa que no existe criterio para decir que los valores de ART calculado por el Ingenio y los arrojados por las correlaciones Global, de relación MD/MB=0.23 y 0.9 son diferentes.

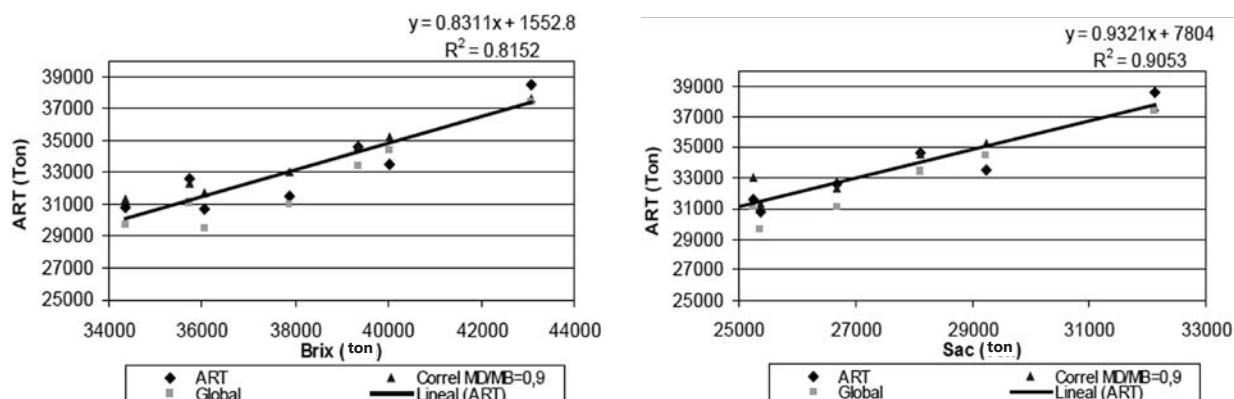
Para alimentación a destilería de solo Miel B, la correlación MD/MB=0.23 arroja resultados satisfactorios, mientras que para mezclas de diferentes materias primas se ajustan los datos

arrojados por la correlación MD/MB=0.9.

Para el caso de la correlación Global, que se obtuvo del histórico medido por el Ingenio, se aprecia un buen comportamiento para mezclas de Meladura-Miel B y Jugo Claro-Miel B, mientras que para el período en que se usó solo Miel B y la mezcla de las tres materias primas, el grado de concordancia con los datos del Ingenio fue menor. A continuación se estudiarán períodos de alimentación diferentes a los ya analizados.



Alimento tres materias primas: JC, MD y MB



**Figura 18.** Comparación de la variación de los ART y ART Calc. por correlación, másicos, con el contenido en Brix y Sacarosa, para el período 2007

Los datos del estadístico permiten ver que las correlaciones se pueden aplicar de manera satisfactoria, ubicándose dentro del rango en que se manejan los valores medidos por el ingenio, tanto para la correlación global, como para las de MD/MB=0.9 y 0.23, y con valores de error aceptables. (Ver Figura 18).

## CONCLUSIONES

Se obtuvieron tres correlaciones que permitieron predecir los valores de ART para diferentes mezclas de alimento de materia prima a la destilería. Cuando se alimenta solo Miel B, la expresión es

$$\text{ART (ton)} = 0,584 \cdot \text{Brix (ton)} + 0,280 \cdot \text{Sac (ton)} + 548,313$$

Mientras que cuando se tienen mezclas de Miel B con Jugo clarificado y/o Meladura, la expresión a utilizar es

$$\text{ART (ton)} = 0,510 \cdot \text{Brix (ton)} + 0,270 \cdot \text{Sac (ton)} + 6914,203$$

Las cuales al ser utilizadas para diferentes períodos del año, mostraron buena concordancia con los valores medidos por el Ingenio, así como errores promedio aceptables por período analizado.

Se encontró una tercera correlación a partir de los datos históricos del Ingenio para el 2007, la cual presentó un buen comportamiento y correspondencia con los valores medidos, aunque

registró en general desviaciones estándar, y en algunos casos porcentajes de error, mayores a los mostrados por las correlaciones MD/MB=0.23 y 0.9, aunque a diferencia de estas dos, no depende del tipo de alimento que se esté utilizando en la destilería, lo que constituye su principal ventaja.

$$\text{ART (ton)} = 0,405 \cdot \text{Brix (ton)} + 0,617 \cdot \text{Sac (ton)} + 149,604$$

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander, al Instituto Colombiano de Ciencia y Tecnología "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS por su apoyo al desarrollo del proyecto: Programa Estratégico, Optimización en el Proceso Dual de Producción simultánea (Azúcar-Alcohol) y Desarrollo de los Nuevos Procesos de producción de Bioetanol Combustible. **RC 3362007**. Y a la Red CYTED "New technologies for biofuels production" 306RTO279 **Código UNESCO** 330303, 332205 530603, 330399.

## REFERENCIAS

- [1] BLAKE, J.D.; CLARKE, M. L. (1998). La industria de los derivados de la caña de azúcar. Rev. ICIDCA. Editorial Científico-Técnica. La Habana: p. 342 – 348.
- [2] BLANCO, G. (1987). La producción de alcohol a partir de la industria química y sus posibilidades. Rev. ICIDCA. No. 21,

Vol II: p. 12-18.

- [3]. FABELLO, J. A. (1999). Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando mezcla de diferentes sustratos. Tesis de Doctorado. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
  
- [4] ICIDCA. (1990). Manual de los derivados de la caña de azúcar. Segunda edición. Editado por GEPLACEA, México D.F.
  
- [5] ITURRIA, P. J. (2001). "Estudio medioambiental de la etapa de fermentación alcohólica utilizando diferentes sustratos y sus combinaciones". Tesis de maestría. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
  
- [6] KLEBANSKY, M. (1983). Evaluación de diferentes métodos de tratamiento de jugos de caña, para la producción de alcohol. Revista ICIDCA. No 3, Vol XIX: p. 1– 5.
  
- [7] LLERENA, G. (1999) Alternativas de sustratos para la producción de alcohol. Rev. Cuba Azúcar. No. 28, Vol 3: p. 49-52.
  
- [8] PRAJ Industries (2000) "Métodos Analíticos para los Procesos de Fermentación y Destilación a partir de materias primas provenientes de la caña".