



Composición química de la caña  
de azúcar y determinación de la  
sacarosa en el proceso azucarero

Jesús E. Larrahondo PhD.  
Octubre, 2017

---

Seminario producción y optimización de sacarosa  
en el proceso agroindustrial de la caña de azúcar



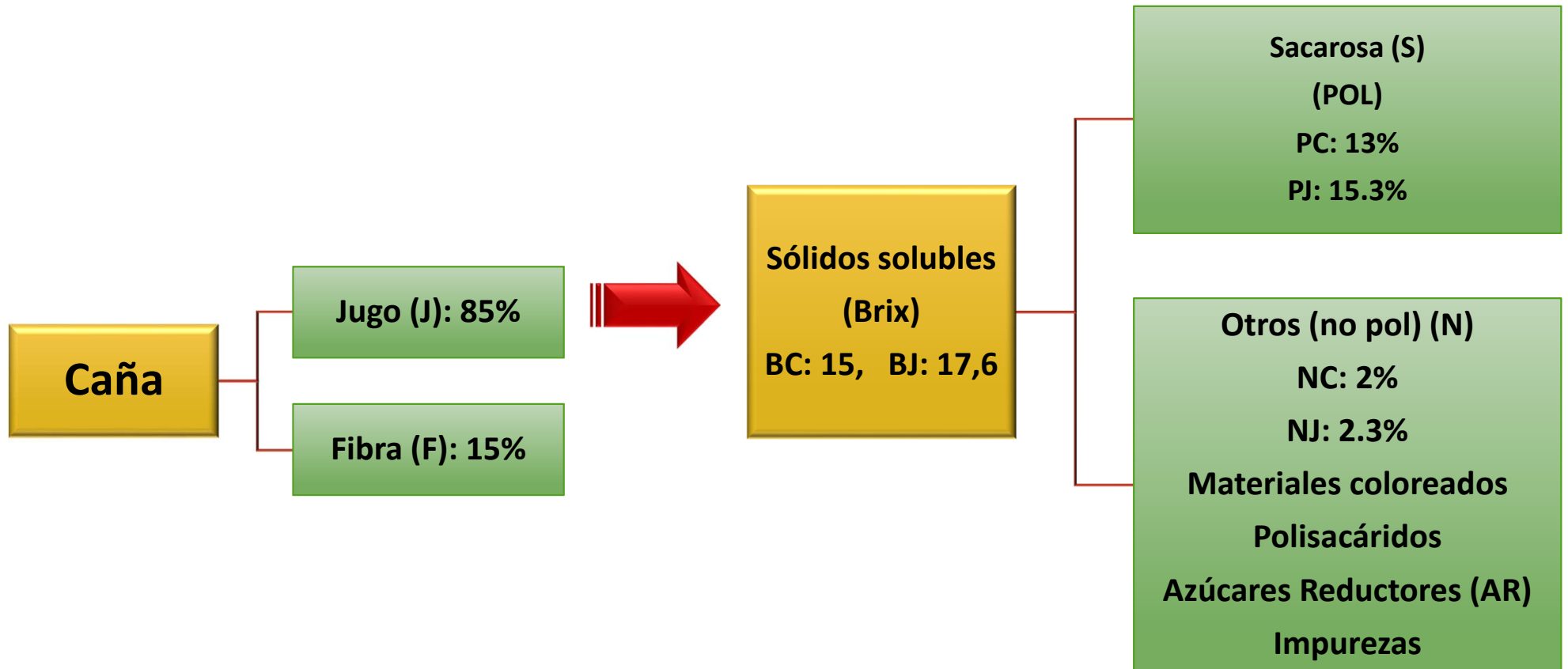
# Fisiología de la caña de azúcar

Planta tipo C-4

Características: alta tasa de fotosíntesis y alta producción de biomasa

Familia: Gramineae

# Principales componentes de la caña de azúcar



# Constituyentes de los jugos

## **Azúcares Sencillos: Glucosa, fructosa**

- Disacáridos: Sacarosa
- Oligosacáridos
- Polisacáridos
- Colorantes (fenoles, flavonoides, etc.)
- Aminoácidos, proteínas,
- Ácidos orgánicos

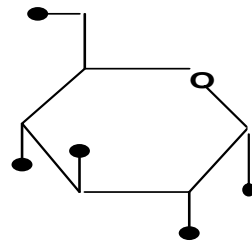
**ORGÁNICOS**

- Sales de potasio, fosfato, silica, calcio, magnesio, hierro, etc.

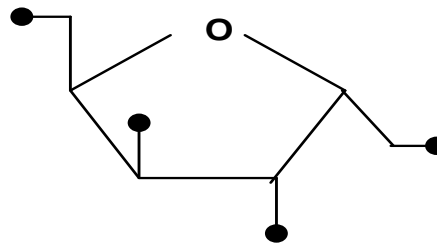
**INORGÁNICOS**

# Azúcares sencillos (azúcares invertidos o reductores)

Son monosacáridos como por ejemplo glucosa y fructosa



Glucosa



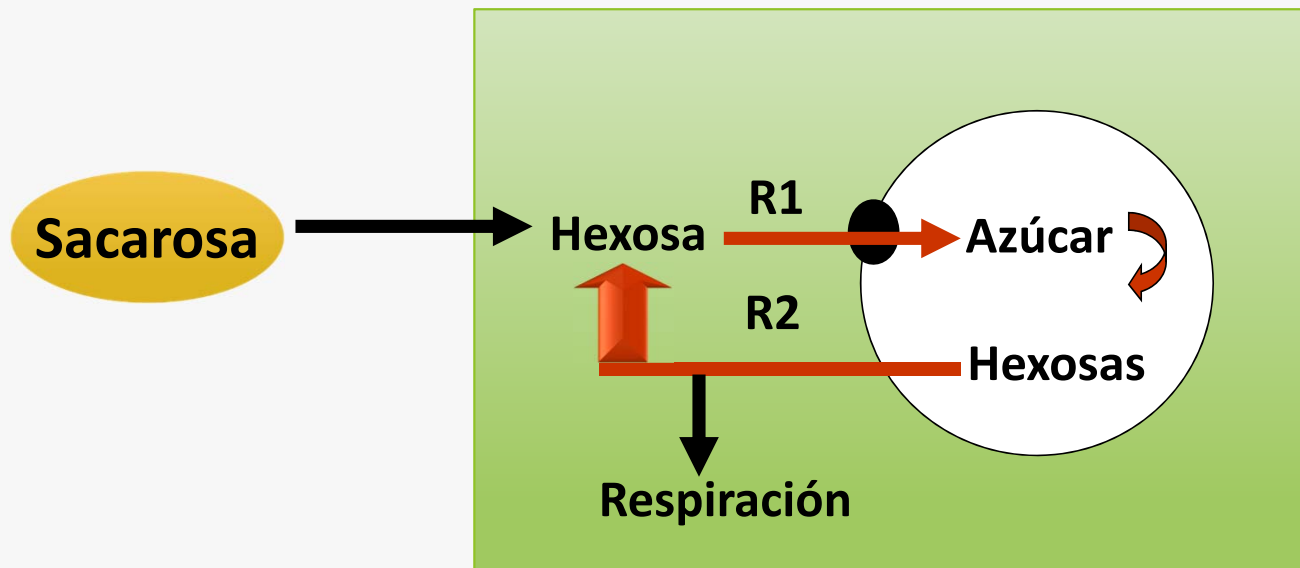
Fructosa

# Disacáridos

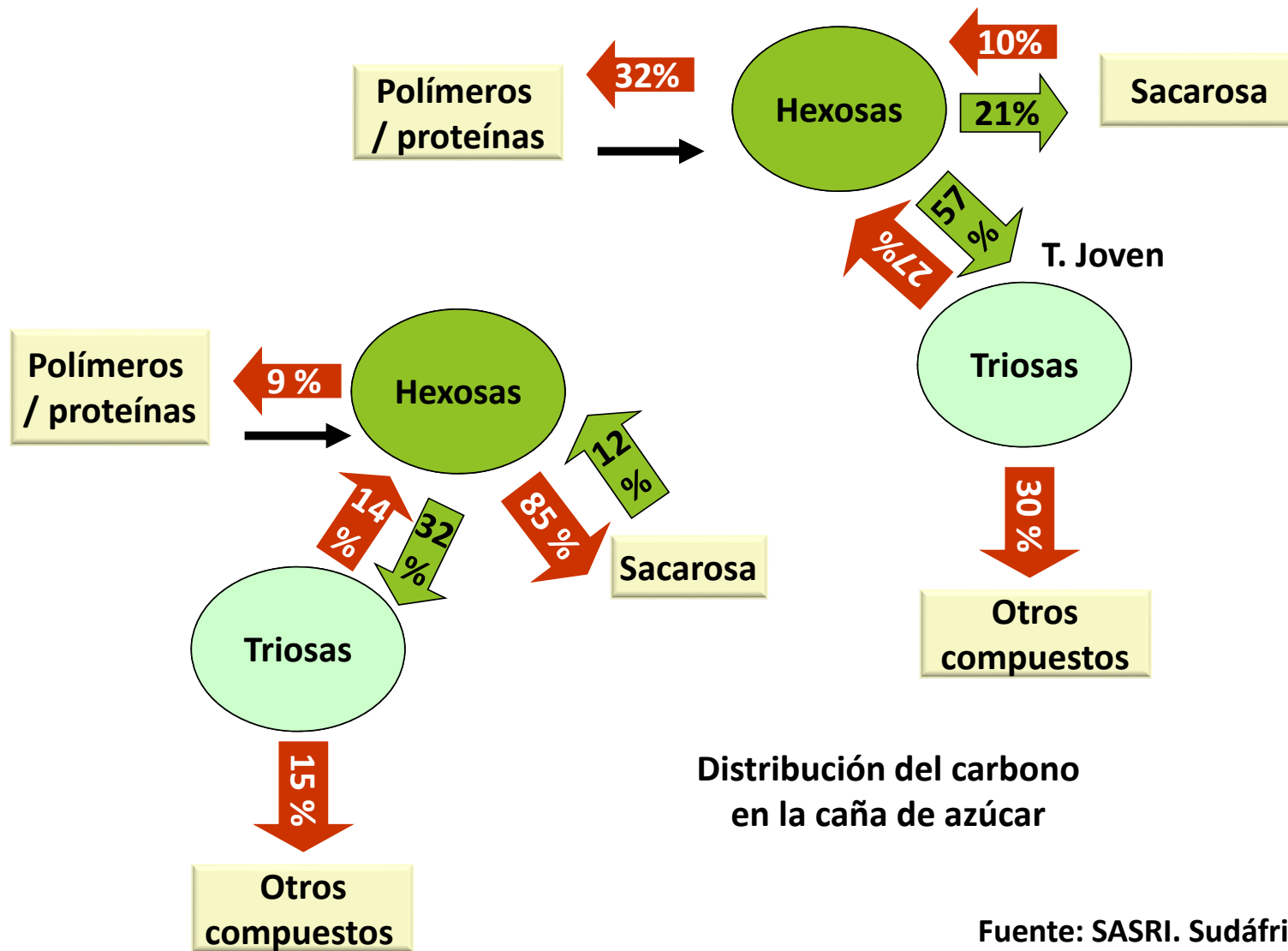
Son azúcares que se forman a partir de dos monosacáridos,  
por ejemplo sacarosa



## Acumulación de sacarosa un proceso simple?



Fuente: SASRI. Sudáfrica. 2005



Fuente: SASRI. Sudáfrica, 2005

# Polisacáridos de la caña

## ISP

(Indigenous Sugarcane Polysaccharide) – arabinogalactanos + xylomannanos – constituyente normal de la caña

## Almidón

Constituyente normal de la caña


## Glucana

Constituyente normal de la caña

## Dextrana

Producto microbial; indica degradación de azúcar

## Compuestos fenólicos (Precusores del color)



Fenoles sencillos y derivados del  
ácido shiquímico



Flavonoides (flavonas y antocianinas)

**El rol de los compuestos  
fenólicos en la industria  
azucarera**

Realza la reactividad del color

Forman colorantes de origen enzimático y no-enzimático (*browning pigments*)

Reacciones de la condensación de fenol-aldehído

Reacciones fenoles-aminas

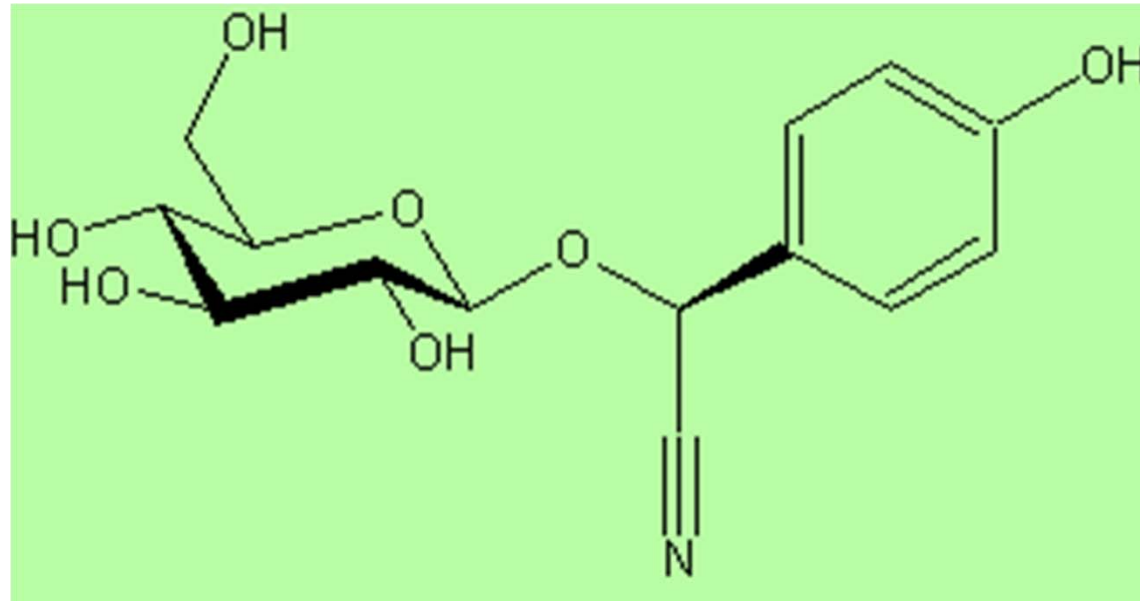
Reacción con hierro y cobre que forman complejos colorados

Reticulación de polisacáridos

## Naturaleza y concentración de los aminoácidos en jugos de caña de azúcar

	Compuesto	Libre %	Materia seca
<b>Amidas</b>	Asparagina	0.71	
	Glutamina	0.19	
	Aspártico	0.11	0.06
	Glutámico	0.05	0.08
	Alanina	0.06	0.05
	Valina	0.03	0.03
<b>Aminoácidos</b>	Aminobutirico	0.03	0.03
	Threonina	0.02	0.04
	Isoleucina	0.01	0.04
	Glicina	< 0.01	0.04
	Otros	trazas	< 0.03

## Otros compuestos nitrogenados



Dhurrin (glicósido cianogénico)

## Ácidos orgánicos no nitrogenados

	Ácido	Concentración
<b>Natural</b>	Oxálico	40 - 200
	Cítrico	900 - 1800
	Tartárico	10 - 180
	Málico	1200 - 1800
	Aconítico	5000 - 8000
	Succínico	100 - 200
	Glicólico	trazas - 150
<b>Formados durante el proceso</b>	Láctico	250 - 670
	Acético	200 - 300

## Sacarosa

Producto de la fotosíntesis

Principal azúcar de caña

Azúcar cristalizabile

## Pol

Porcentaje aparente de sacarosa (relación masa/masa)

## Azúcares

Sacarosa  
( $C_{12}H_{22}O_{11}$ )

Glucosa  
( $C_6H_{12}O_6$ )

Fructosa  
( $C_6H_{12}O_6$ )



## Azúcares Reductores

+ 66,53

Dextrana (+)  
(?)

+ 52,70



**POL**

-90,40



**Relación: Pol / sacarosa**

=

**P/S**

**Indica la diferencia entre pol (sacarosa aparente) y el contenido de sacarosa (real)**

- En soluciones puras  $\rightarrow \frac{P}{S} = 1.0$
- En jugos mixtos  $\rightarrow \frac{P}{S} = 0.98 - 1.00$
- En mieles  $\rightarrow \frac{P}{S} = 0.80 - 0.97$
- Esto ilustra la dificultad para interpretar un balance de pol en la fábrica

## Pol derivado ( $\text{Pol}_d$ )

### Concepto de Morel du Boil y Schäffler

- $\text{Pol}_d = \% S + 0.015 \left( \underset{\text{DG}}{[\alpha]^{20} \% G} + \underset{\text{DF}}{[\alpha]^{20} \% F} \right)$
- Donde: % S, % G, % F son las concentraciones en: masa/100 masa (material) de sacarosa, glucosa y fructosa

$$[\alpha]_{DG}^{20} = 52.5 + 0.0188 \% G + 0.00517 \% G^2$$

$$[\alpha]_{DF}^{20} = - (88.12 + 0.260 \% F)$$

Si se conocen las concentraciones de sacarosa, glucosa y fructosa es posible estimar  $Pol_d$

## Buena relación y acuerdo entre $\text{Pol}$ y $\text{Pol}_d$

- Sugiere que las mayores sustancias ópticamente activas: son sacarosa, glucosa y fructosa.
- $\text{Pol} > \text{pol}_d$  Sugiere presencia de otras sustancias dextro-rotatorias tales como dextranas.

**Factores que afectan la rotación específica**

**Concentración de la sacarosa**

**Temperatura**

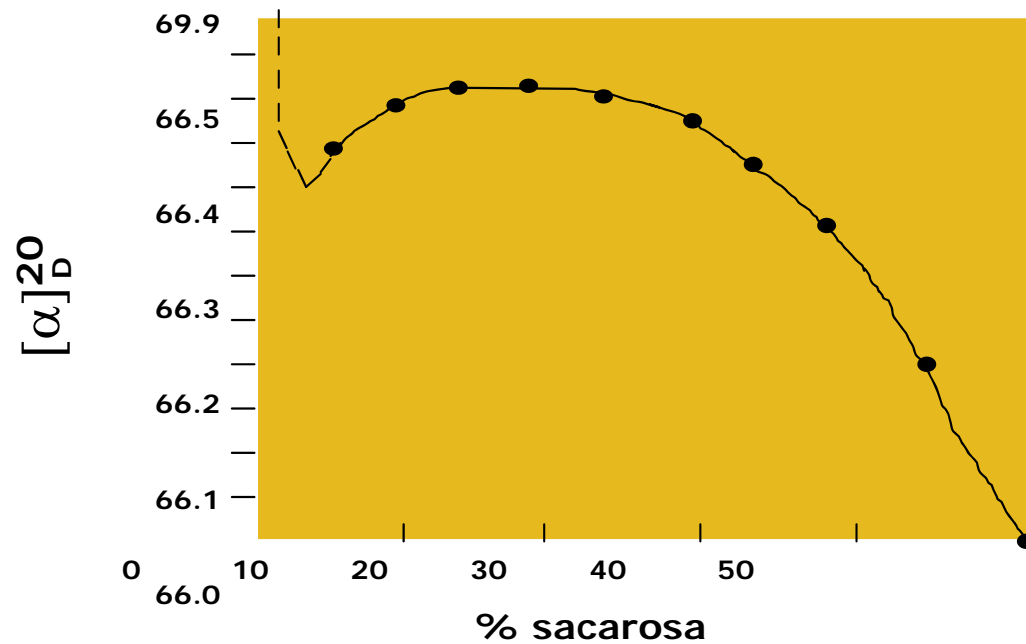
**Concentración de impurezas ópticamente activas**

**Concentración de sales**

## Efecto de la concentración de sacarosa

- La rotación específica ( $[\alpha]^{20}$ ) de la sacarosa se incrementa en soluciones de 5% al 15% y luego disminuye.

### Efecto de la concentración en una rotación específica de sacarosa



## Corrección por temperatura para soluciones puras de sacarosa

$$P^{20} = P' [1 + 0.0003 (t-20)]$$

Donde:  $P^{20}$  = Valor corregido

$P'$  = Valor observado

## Corrección por temperatura para otras soluciones de sacarosa (azúcares crudos)

$$P^{20} = P' + 0.0015 (P' - 80) (t-20)$$



## **Efecto de sustancias ópticamente activas y sales**

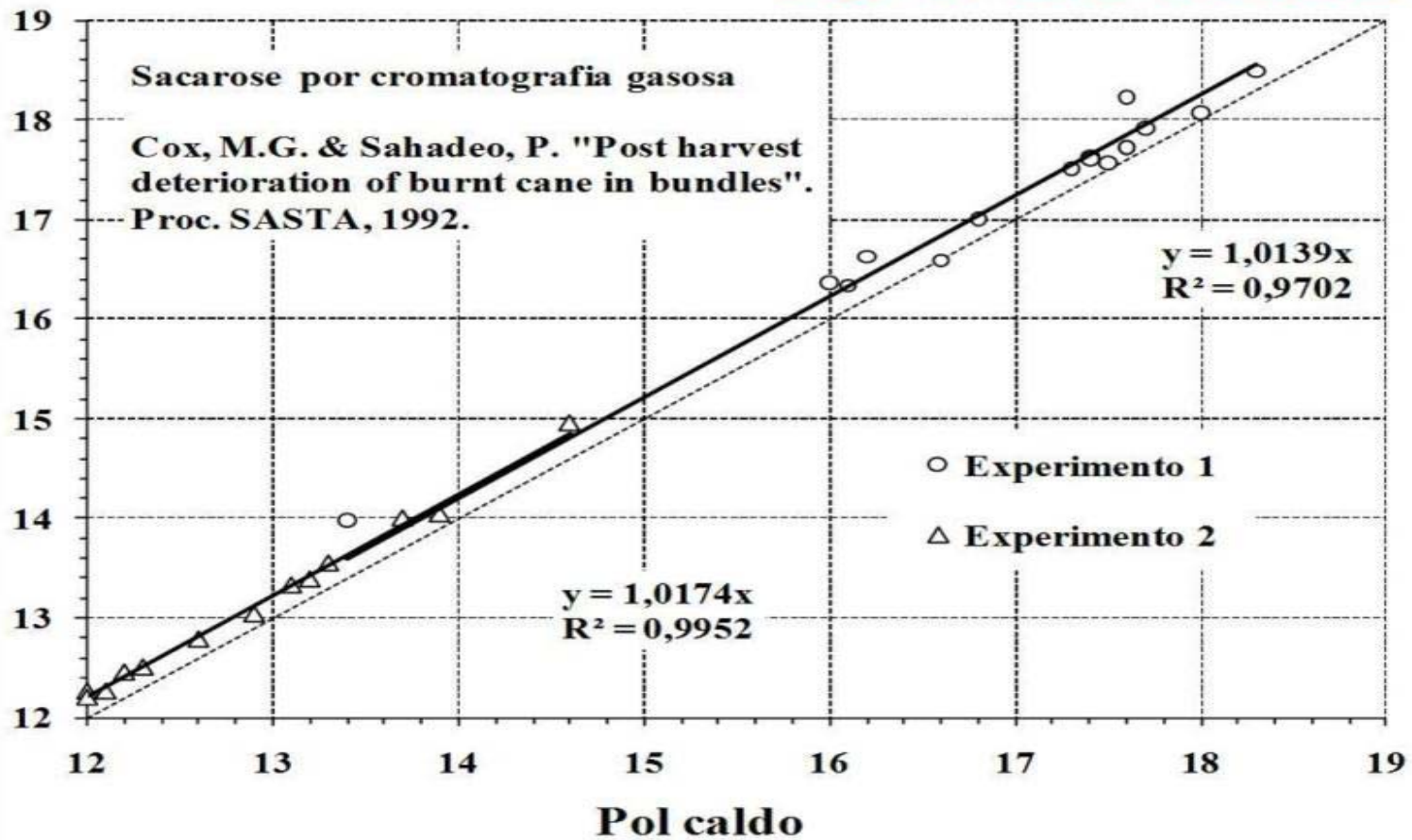
Diferentes sustancias y sales cambian la rotación específica de la sacarosa, lo cual se constituye en fuentes de error en los métodos de polarización.

## Ejemplos de influencia de sales de sodio y potasio en la rotación específica de la sacarosa

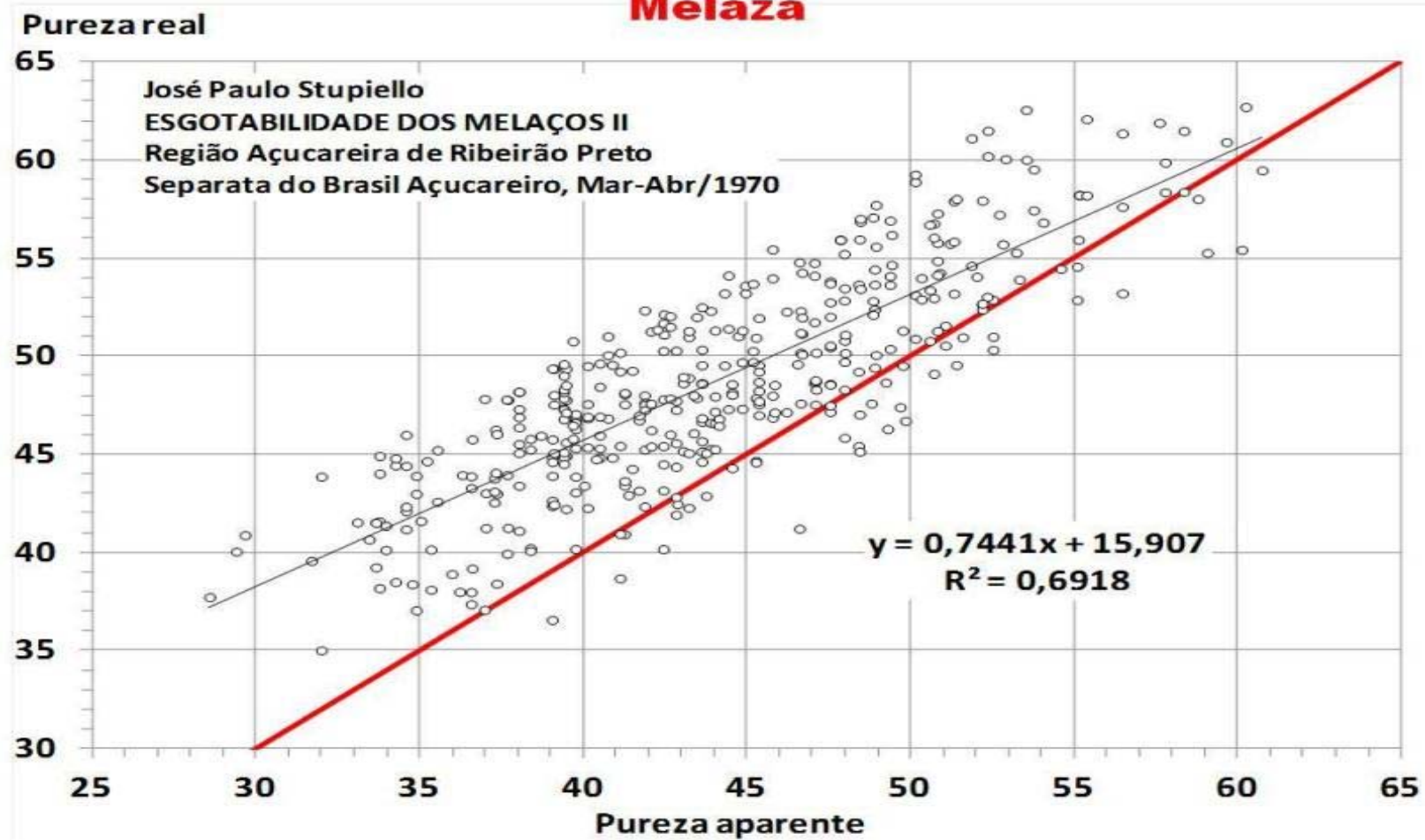
Molaridad				
Sal	Ca	Cb	$\Delta /$	K
NaOH	0.76	0.38	-0.0762	3.85
	1.52	1.90	-0.146	9.61
KOH	0.76	0.38	-0.0464	7.05
	1.52	1.90	-0.122	12.10
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.76	0.38	-0.022	16.1
	1.52	1.90	-0.093	17.0
Lactato de potasio	1.52	1.90	-0.366	14.33
Acetato de potasio	1.52	1.90	-0.024	75.7
NaCl y KCl	1.52	2.28 (NaCl)	-0.059	58.9
		1.52 (KCl)		

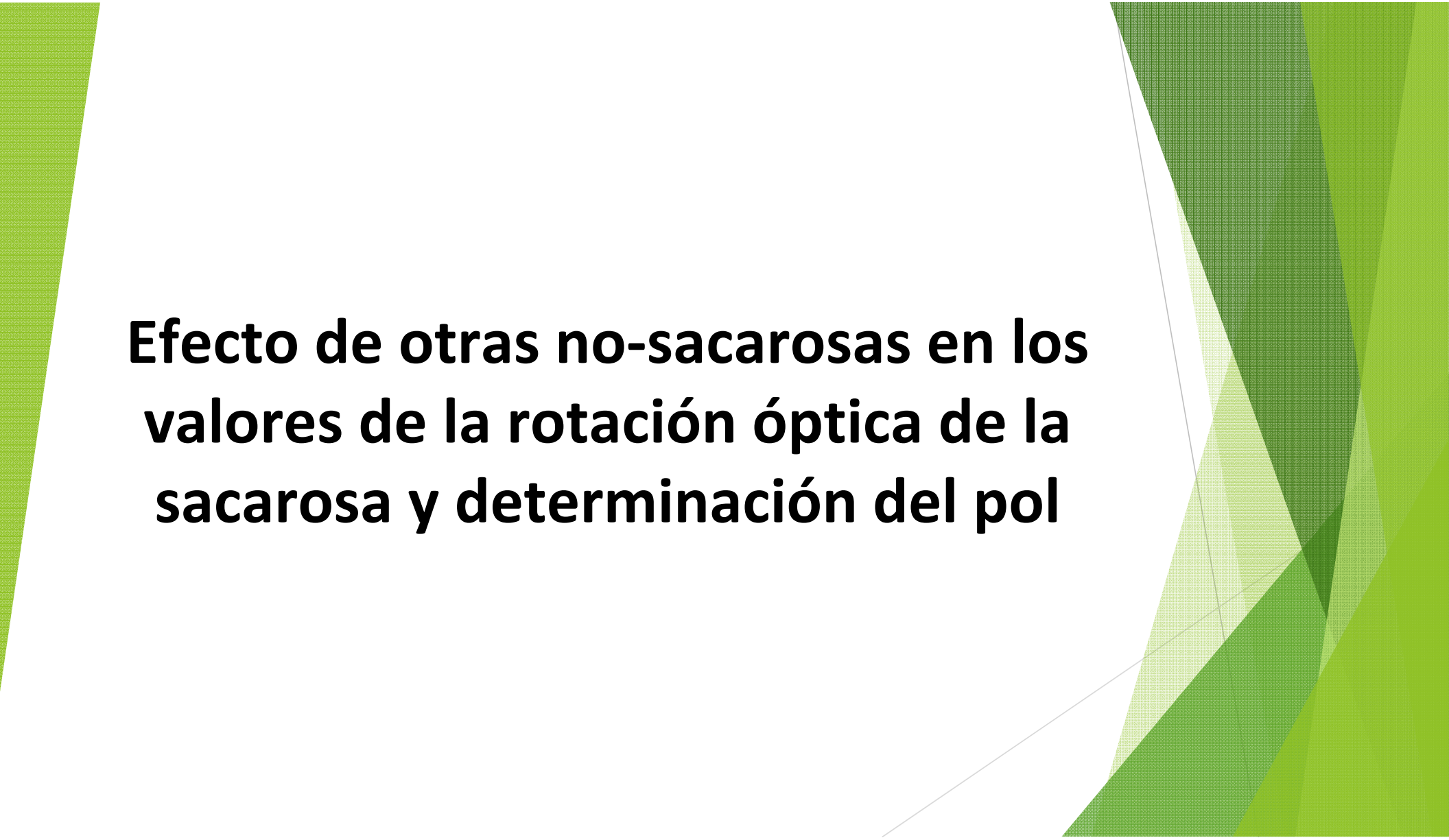
## Pol vs. Sacarosa Jugo de caña de azúcar

Sacarose % caldo



## Pol vs. sacarosa Melaza





# **Efecto de otras no-sacarosas en los valores de la rotación óptica de la sacarosa y determinación del pol**

**Sarkaran (Glucano)**

(Polisacárido de la caña quemada dejada en pie)



Rotación óptica específica  $[\alpha]_D^{20} = + 160^\circ$   
Origen: Posiblemente de las levaduras

**ISP (Polisacárido nativo)**

Rotación óptica  $[\alpha]_D^{20} = -46^\circ$  a  $-50^\circ$   
Origen: Natural en la caña. Depende de la variedad

**Glucano de Robert 's**

Rotación óptica  $[\alpha]_D^{20} = + 120^\circ$   
Origen: Natural

**Polisacárido C.P**

(Formado principalmente por D-mannosa y D-galactosa)



Rotación óptica  $[\alpha]_D^{20} \approx + 97.3^\circ$   
Origen: Aislado de azúcares crudos de Australia. Un responsable del potencial «Floc» en bebidas no alcohólicas

**Dextranas (Glucano)**

Uniones  $\alpha - (1,4)$  y  $\alpha - (1,3)$  de glucosa



Rotación óptica  $[\alpha]_D^{20} \approx + 200^\circ$  ó mayor.  
Origen: Microbiano. Producido durante el deterioro de la caña, por Leuconostoc Mesenteroides y L. Dextranicum

**Ácido Aspártico**

Tiene una rotación óptica específica similar a la sacarosa (dextro – rotatoria). Presencia de este amino-ácido y de otros similares elevan los valores de polarización. Origen: natural

## Interferencias de los almidones y dextranas en los valores de Pol y ATR ( fuente STAB)

<b>Almidones</b>	<b>100 mg/L incremento</b>
Pol	0.06 (%)
ATR	0.14 kg / t caña
<b>Dextranas</b>	<b>100 mg/L incremento</b>
Pol	0.07 (%)
ATR	0.36 kg / t caña

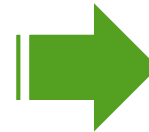
# Análisis de Caña

Determinaciones  
analíticas en jugo de caña

Brix, Pol, ARJ  
ARTJ, pH,  
Acidez



**Cálculos**



Resultados en  
Porcentaje de caña

Brix, Pol,  
Humedad,  
ARC, ART

Fibra % caña

ATR (PCTS)

## Ecuación general para el cálculo del ARE (Rendimiento en fábrica)

$$\text{ARE \%} = S - 0.5 N - 0.044 F$$

Donde:

S  Sacarosa % caña

N  No sacarosa % caña

F  Fibra % caña

# Factores que afectan la determinación de sacarosa o del azúcar recuperable

La recuperación final de azúcar (ARE) se basa en:



Contenido de sacarosa (Sac % caña, Sc)



Contenido de fibra (Fibra % caña, Fc)

Retención de sacarosa en el bagazo



Contenido de No – Sacarosa (No-Sac % caña, Nc), la cual causa la formación de mieles y retención de sacarosa en la miel final

# Métodos de análisis

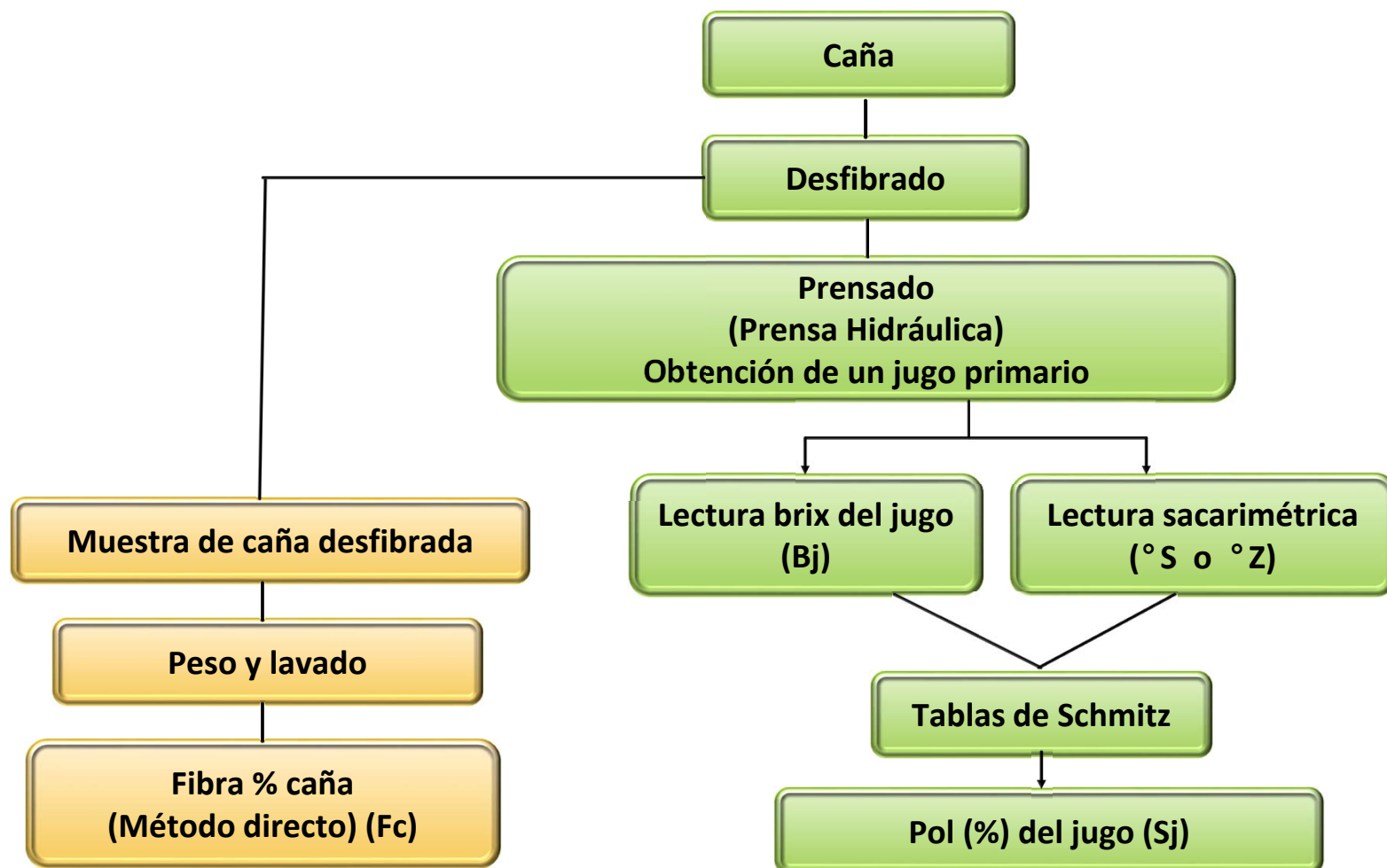


Métodos de análisis directo  
(DAC y prensa hidráulica)



Métodos basados en el análisis  
de jugos primarios (molino,  
prensa hidráulica)

# Proceso general para determinar la calidad de la caña



## Determinación del Pol % caña, Brix % caña y CCS (Método Australiano)

- Brix % caña ( $B_c$ ) =  $B_j \times \frac{[100 - (F_c + 3)]}{100}$
- Pol % caña ( $S_c$ ) =  $S_j \times \frac{[100 - (F_c + 5)]}{100}$
- No – Sac % caña ( $N_c$ ) =  $B_c - S_c$

$$CCS = S_c - 0.5 \times N_c$$

## Desventajas del método basado en jugos primarios

El brix, la pureza y la sacarosa del jugo depende del porcentaje de jugo extraído (presión aplicada)

No se tiene en cuenta el efecto de la fibra y en otros no se determina y se asume un valor constante (promedio) para un determinado período

# Evaluación de la calidad tecnológica de la caña de azúcar

## Método de Prensa

Fuente: Antonio Carlos Fernandes  
[acf.conaf@gmail.com](mailto:acf.conaf@gmail.com)

# Método de Prensa



# Fibra % Caña

## Métodos

### Sistema Tanimoto

- Fibra calculada en función del brix, PBU y PBS

### Sistema PCTS

- Fibra estimada utilizando la regresión lineal de acuerdo con la PBU

## Datos Método Prensa Sistema Tanimoto

- PBU = Peso de bagazo húmedo (g)
- PBS = Peso de bagazo seco (g)
- BJ = Brix de jugo extraído
- SJ = Pol de jugo extraído

## Fibra % Caña (FC)

m = caña prensada (g)

PBU = peso de bagazo húmedo (g)

PBS = peso de bagazo seco (g)

BJ = brix de jugo extraído

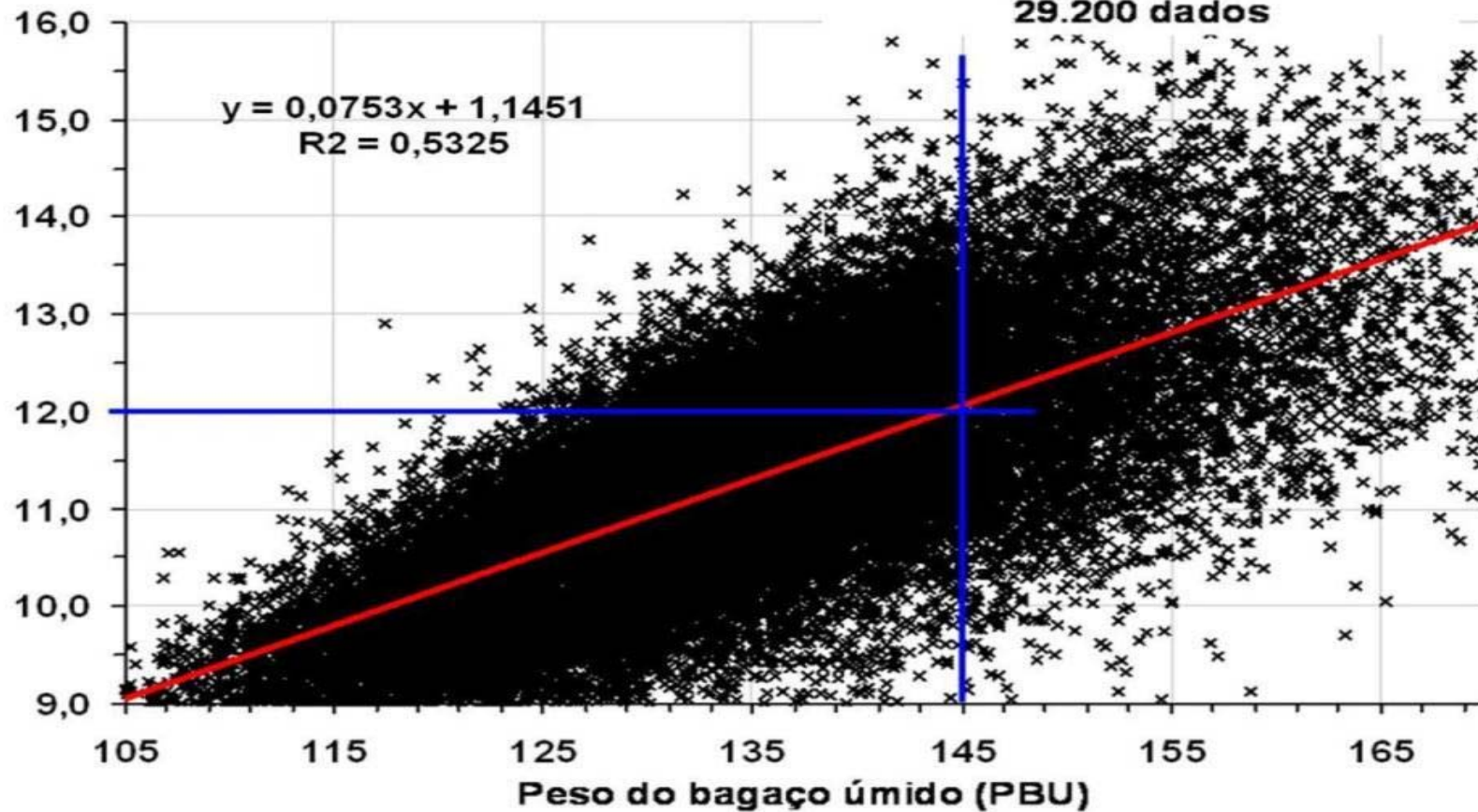
$$FC = \frac{100 * PBS - PBU * BJ}{0,01 * m * (100 - BJ)}$$

$$m = 500 \text{ g}$$

$$FC = \frac{100 * PBS - PBU * BJ}{5 * (100 - BJ)}$$

Fibra % cana (Tanimoto)

Usina Santa Adélia - Safra 00/01  
29.200 dados



## Pol Caña (PC)

JA = jugo absoluto

SJA = pol jugo absoluto

SJ = pol jugo extraído

FC = fibra % caña

$(100 - FC)$  = jugo absoluto % caña

SJA  $\longrightarrow$  100 g de JA

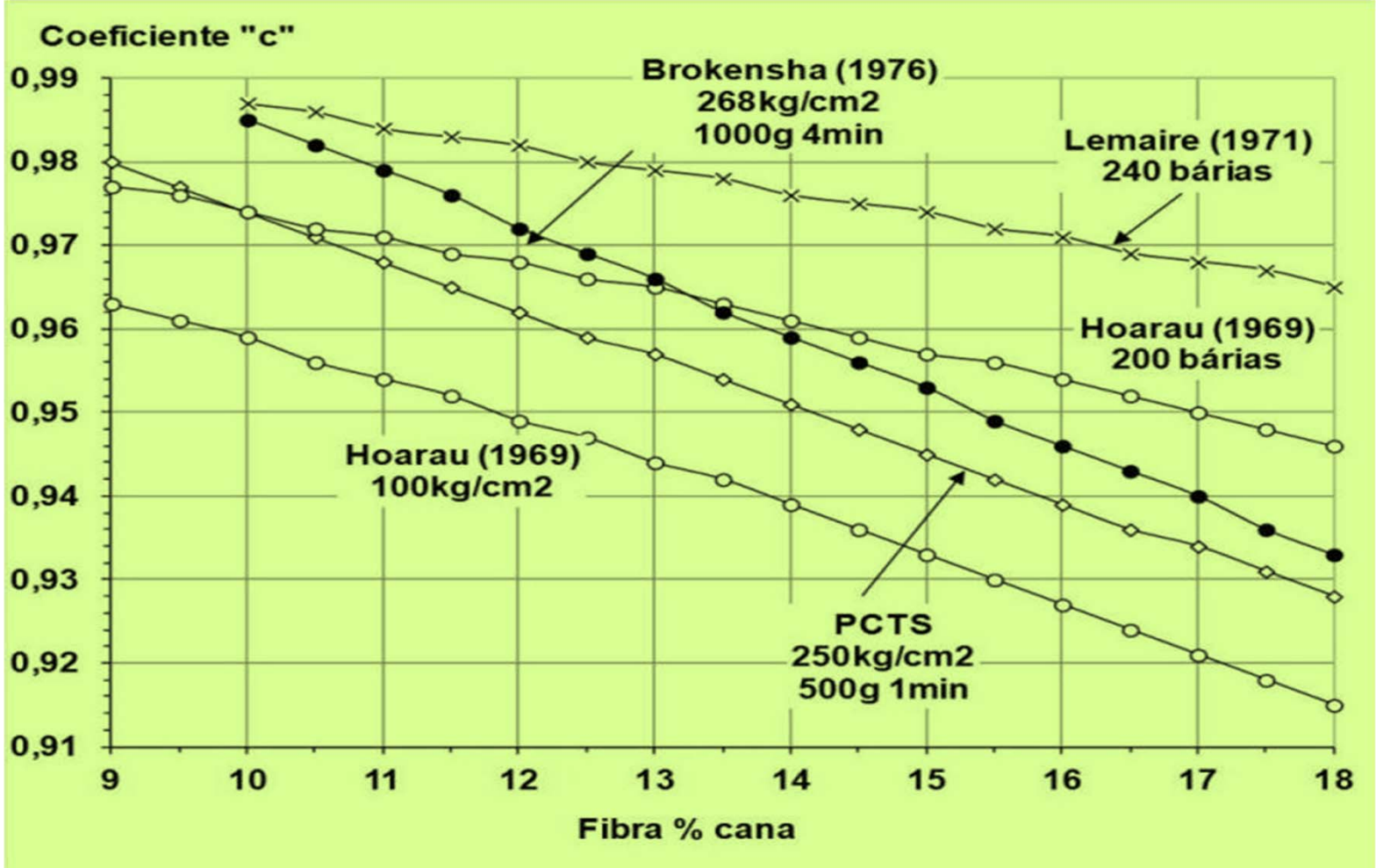
PC  $\longleftarrow$   $(100 - FC)$

$PC = SJA * (1 - 0,01 * FC)$

$$PC = SJA * (1 - 0,01 * FC) * \frac{SJ}{SJ} \longrightarrow C = \frac{SJA}{SJ}$$

$$PC = SJ * (1 - 0,01 * FC) * c$$

Sistema Consecana – JP  $c = (1,0313 - 0,00575 * FC)$



# Resumen

FC = fibra % caña

PC = pol caña

ARC = azúcares reductores % caña

ART = azúcares reductores totales % caña

SJ = pol % jugo

ARJ = azúcares reductores % jugo

ARTJ = azúcares reductores % jugo

$$PC = SJ * (1 - 0,01 * FC) * (1,0313 - 0,00575 * FC)$$

$$ARC = ARJ * (1 - 0,01 * FC) * (1,0313 - 0,00575 * FC)$$

$$ART = ARTJ * (1 - 0,01 * FC) * (1,0313 - 0,00575 * FC)$$

$$ART = PC / 0,95 + ARC$$

# ¿Cómo mejorar la confiabilidad de los resultados de PC y ARC?

## Muestreo

- Sonda horizontal u oblicua: muestra el máximo posible de carga
- Molienda: solo para “índice de preparación”

## Análisis de caña

- Utilizar método de la prensa (sonda de muestreo)
- Método de digestor para la caña preparada (IP) y bagazo

## Determinaciones paralelas opcionales

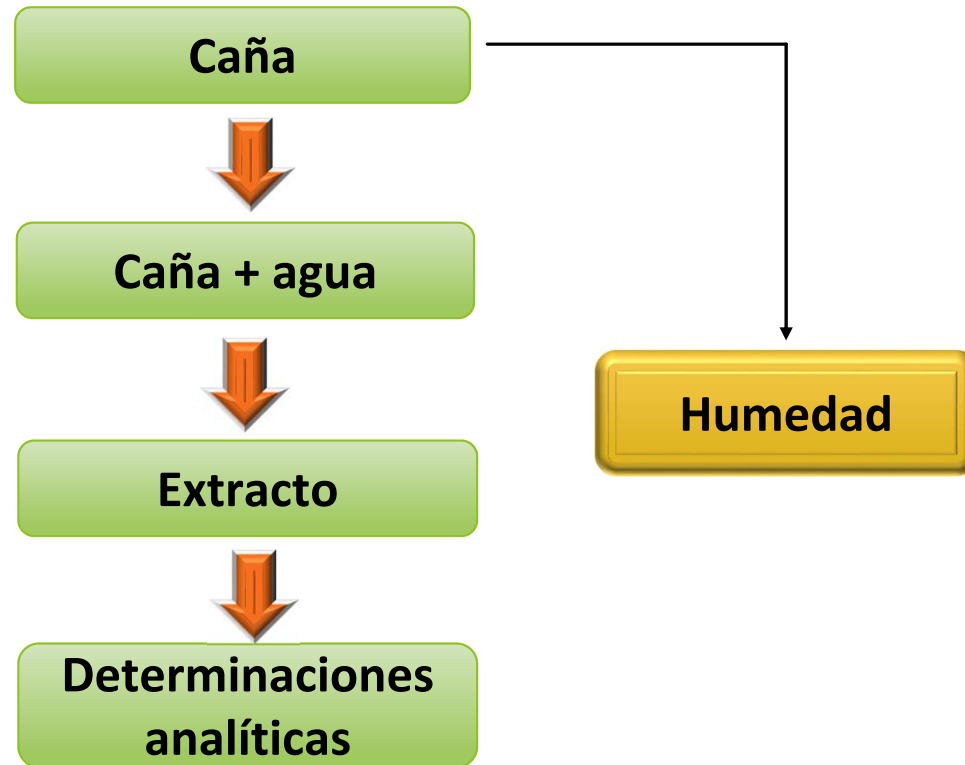
- Secar el residuo de la prensa
- Calcular método fibra Tanimoto
- Comparar muestra de jugo por AR (Lane y Eynon)

**Evaluación de la calidad tecnológica de la  
caña de azúcar  
Método ICUMSA**

**MÉTODO DIGESTIÓN (DAC)**

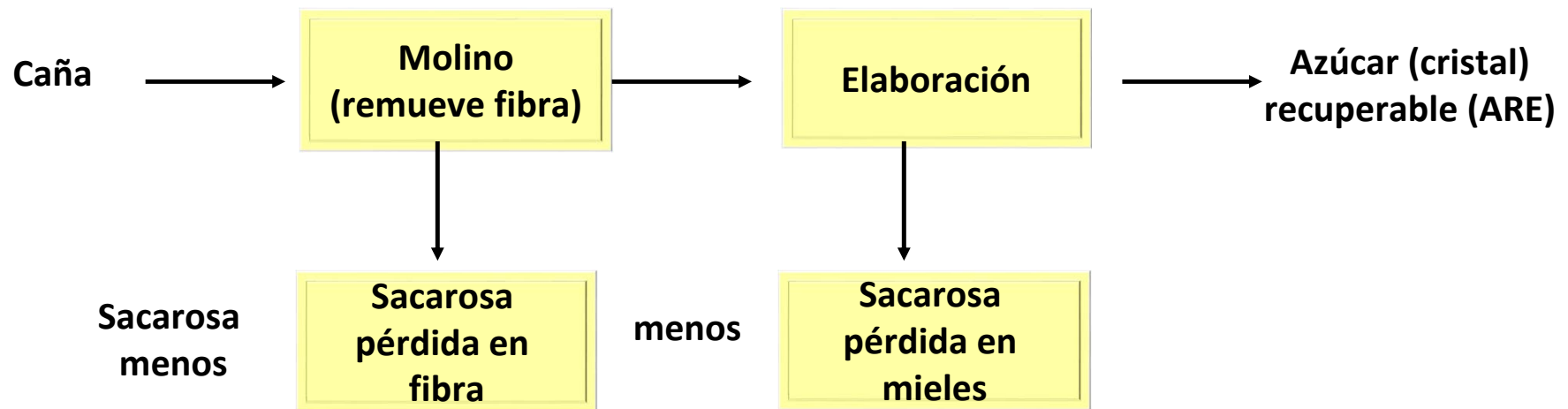
Fuente: Antonio Carlos Fernandes  
[acf.conaf@gmail.com](mailto:acf.conaf@gmail.com)

# Análisis de la caña – Método DAC



## Base del análisis directo (DAC)

Aproximación para el cálculo del rendimiento teórico vía el método Sudafricano (Van - Hengel)



$$aS - cF - bN = ARE$$

Donde: S = sac % caña, N = No sac % caña, F = Fibra % caña,  
a, b, c = parámetros de fábrica

**Prensa o Digestión**  
**Sonda y Caña preparada**

Fuente: Antonio Carlos Fernandes  
[acf.conaf@gmail.com](mailto:acf.conaf@gmail.com)

# Digestión vs. Prensa

Digestión: Ventajas	Digestión: Desventajas
Menor inicial más bajo	Lento → Menor representación
Depende del grado de la muestra de preparación	Dilución de muestra → más errores de lecturas
Resultados sin el uso de factores	Mayor costo operacional por muestra

Prensa : Ventajas	Prensa: Desventajas
Rápido → mayor muestras por hora	Mayor costo inicial
Determinaciones analíticas directamente del jugo	Desintegrador → afecta los resultados
Menor costo en mantenimiento	Uso de factores → extracción de jugo para obtener jugo absoluto
Menor costo por muestra	



## **Comparación de metodologías en la determinación de sacarosa en caña de azúcar**

**EL método prensa requiere determinar el  
factor C para determinar el Pol % Caña**

## Factor C Nicaragua

$$\begin{aligned} \text{Pol CAÑA} &= 0.971 P1 - 0.00107 P2 \\ &= 0.971(\text{Pol Jugo}) (\text{Jugo absoluto}) - 0.00107 (\text{Pol Jugo}) (\text{Jugo absoluto}) \text{Fibra} \\ &= (\text{Pol Jugo}) (\text{Jugo absoluto}) \underbrace{(0.971 - 0.00107 * \text{Fibra})}_{\text{Factor C}} \quad R^2 = 0.981 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{BRIX CAÑA} &= 0.972 P1 + 0.00112 P2 \\ &= 0.972 (\text{Brix Jugo}) (\text{Jugo absoluto}) + 0.00112 (\text{Brix Jugo}) (\text{Jugo absoluto}) \text{Fibra} \\ &= (\text{Brix Jugo}) (\text{Jugo absoluto}) \underbrace{(0.972 + 0.00112 * \text{Fibra})}_{\text{Factor C}} \quad R^2 = 0.974 \end{aligned}$$

	Pol Caña	Brix Caña
Promedio	0.957	0.958
std	0.001	0.001

# Resultados de un Ingenio Colombiano

**Cálculo de sac % caña (Sc)**

$$Sc = Sj \times (1 - 0.01 F) \times C$$

**Donde C = 0.9325 – 0.000485 x F**

**F = Fibra % caña**

**Sj = Sac % jugo del primer molino**

## Resultados de un Ingenio Colombiano (DAC vía seca. Determinación del factor C)

Variable	N	Promedio	Desv. Estándar
Sac % caña (Sc)	262	12.58	1.45
Fibra % caña (F)	262	17.35	1.65
Sac % jugo (sj; pH)	262	16.11	1.72

$$Sc = Sj \times (1 - 0.01 F) \times C$$

Donde  $C = 1.1409 - 0.0102 \times F$

$$\bar{C} \text{ (Promedio)} = 0.964$$

$$R^2 = 0.995$$

## Ecuación general para el cálculo del ARE en el Valle del Cauca

$$\text{ARE \%} = S - 0.47 N - 0.044 F$$

Donde:

S  Sacarosa % caña

N  No sacarosa % caña

F  Fibra % caña

## Revisión General



**La calidad de la caña y sus  
efectos en la eficiencia y  
procesamiento fabril**

## Algunos indicadores o parámetros de mayor aplicación

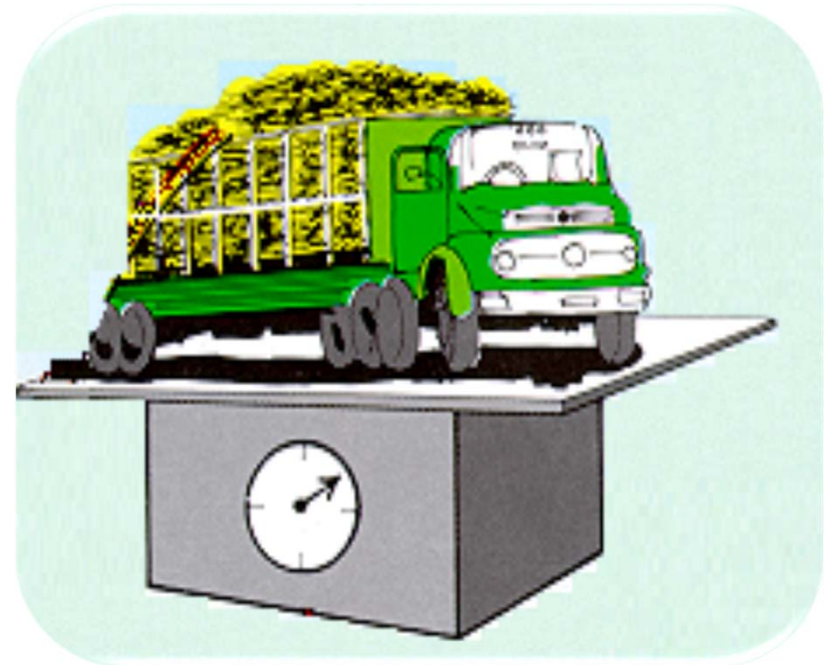
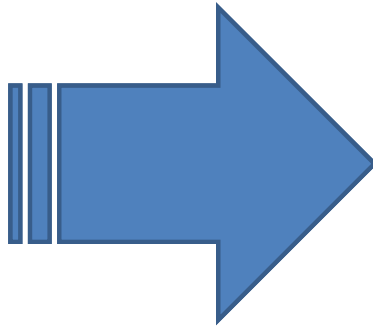
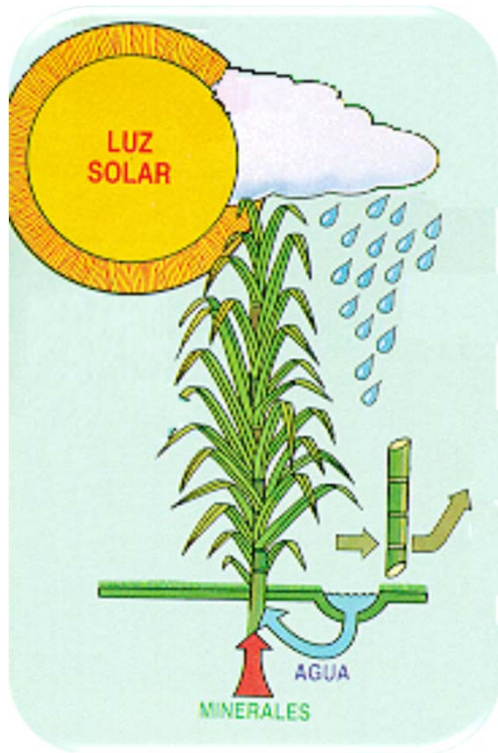
### Tradicional

Pol, pureza, fibra,  
Azúcares reductores,  
ARE

### Menos comunes

Tiempo entre corte y  
molienda, contenido  
de materia extraña,  
contenidos de  
no - sacarosas

# Pérdidas entre cosecha y molienda



# RUTA DE LA SACAROSA



Sacarosa  
campo

Sc

Pérdidas  
en  
Quema

Pérdidas en  
CAT

Materia  
extraña

Tiempos de  
permanencia  
tp)

Pérdidas en  
Fábrica

Bagazo

Mieles finales

Indetermin.

Azúcar recuperada

% Rendimiento

(Ton. Az /Ton. Caña)x  
100

# Naturaleza de las pérdidas de sacarosa

▲ Químico



▲ Bioquímico / Inversión




▲ Microbiológico



## Principales factores que afectan la calidad y contenido de sacarosa, después del corte o cosecha




Altura de corte



Contenido de materia extraña (Reducción promedia de 0.14 (%) de sacarosa por unidad)



Grado de quema (Reducción aprox. 3% de la sacarosa % caña)

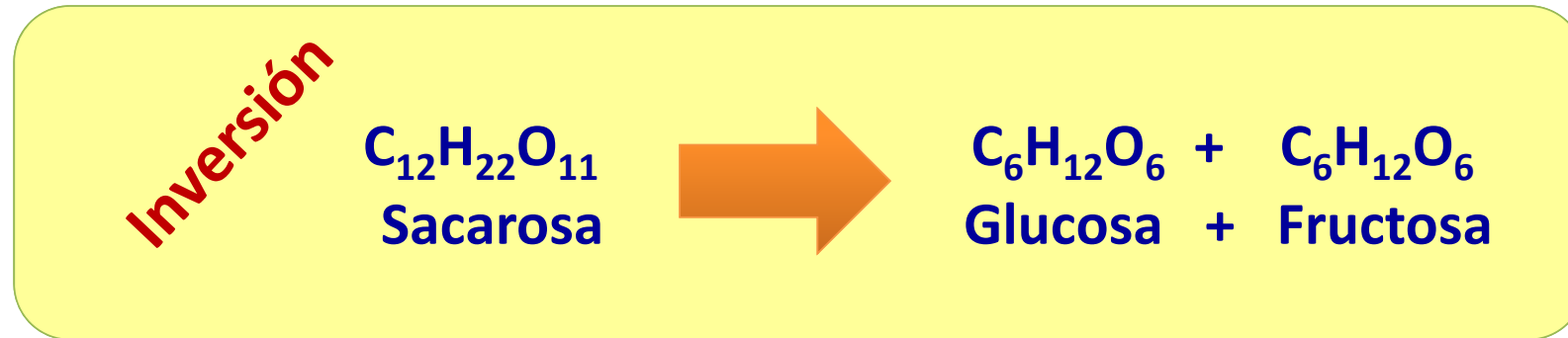


Tiempo entre quema, corte, alce y molienda (promedio de 0.02 unidades por hora)

## Efecto Quema

- Pérdidas promedias: 3% de la sacarosa % caña
- Ej: 0.45 unidades para sacarosa % caña de 15%

# Pérdidas bioquímicas



Facilitado por la acción de las invertasas endógenas de la caña de azúcar  
pH optimo 4.8-5.2 (Invertasa ácida); 7.0 (invertasa Neutra)

Bajo condición normal, la actividad de la invertasa ácida aumenta rápidamente después de 72 horas de almacenaje

# Principales microorganismos involucrados en las pérdidas de sacarosa

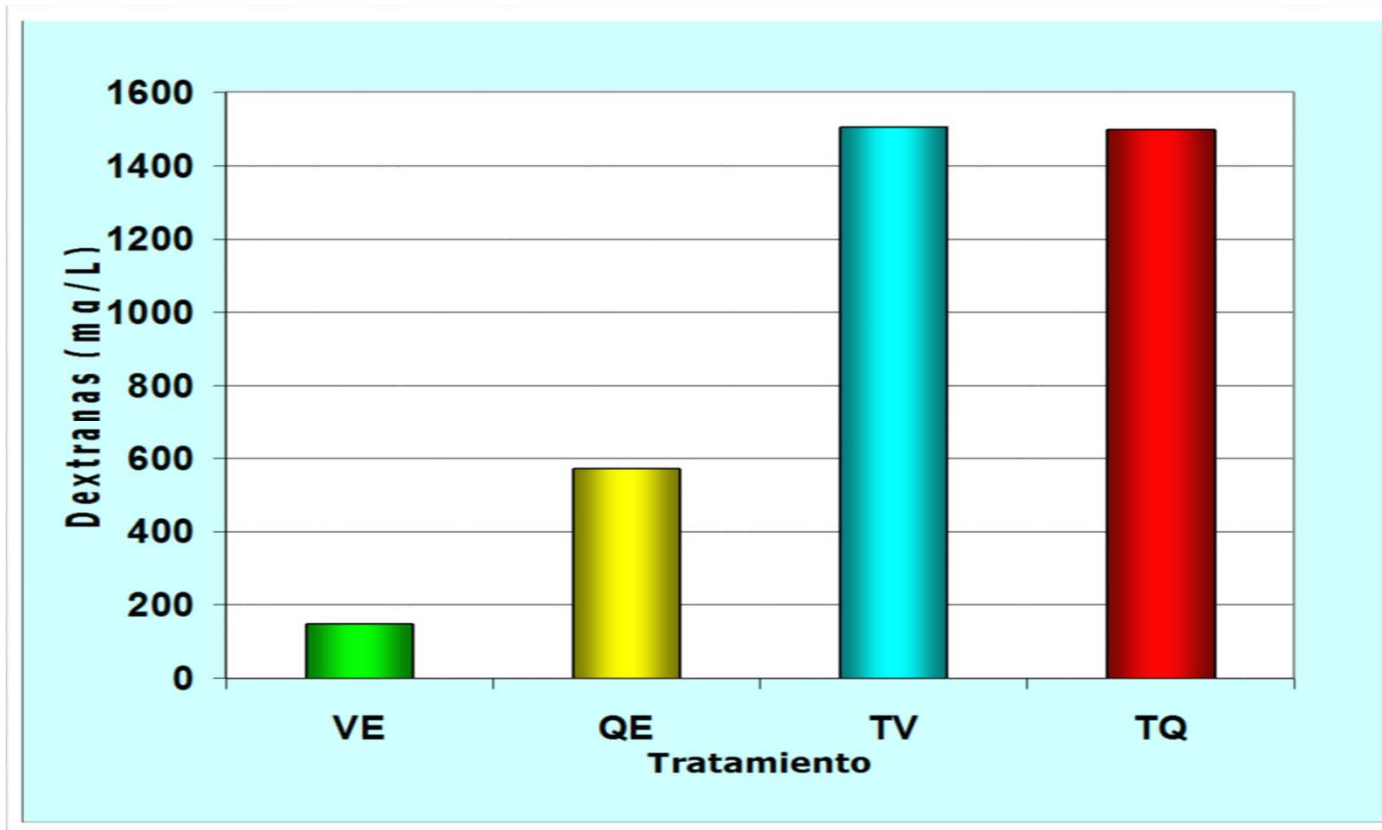
---

<b>Bacterias</b>	<b>Levaduras</b>
Lactobacillus spp.	Saccharomyces cerevisiae
Pseudomonas spp.	Candida spp.
Micrococcus	Pichia
Bacillus spp.	Hansenula
Acetobacter	Rhodotorula
Enterobacterias	

---

# Dextranas en jugos de caña a las 24 horas (Fuente: Cenicaña)

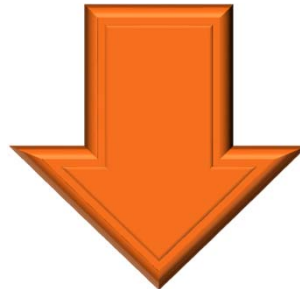
Variedad CC 85-92



Corte Manual Verde (VE), Quemada (QE)

Corte Mecánico Verde (TV), Quemada (TQ)

**Las mediciones de etanol en jugos como indicador de deterioro y pérdidas de sacarosa**



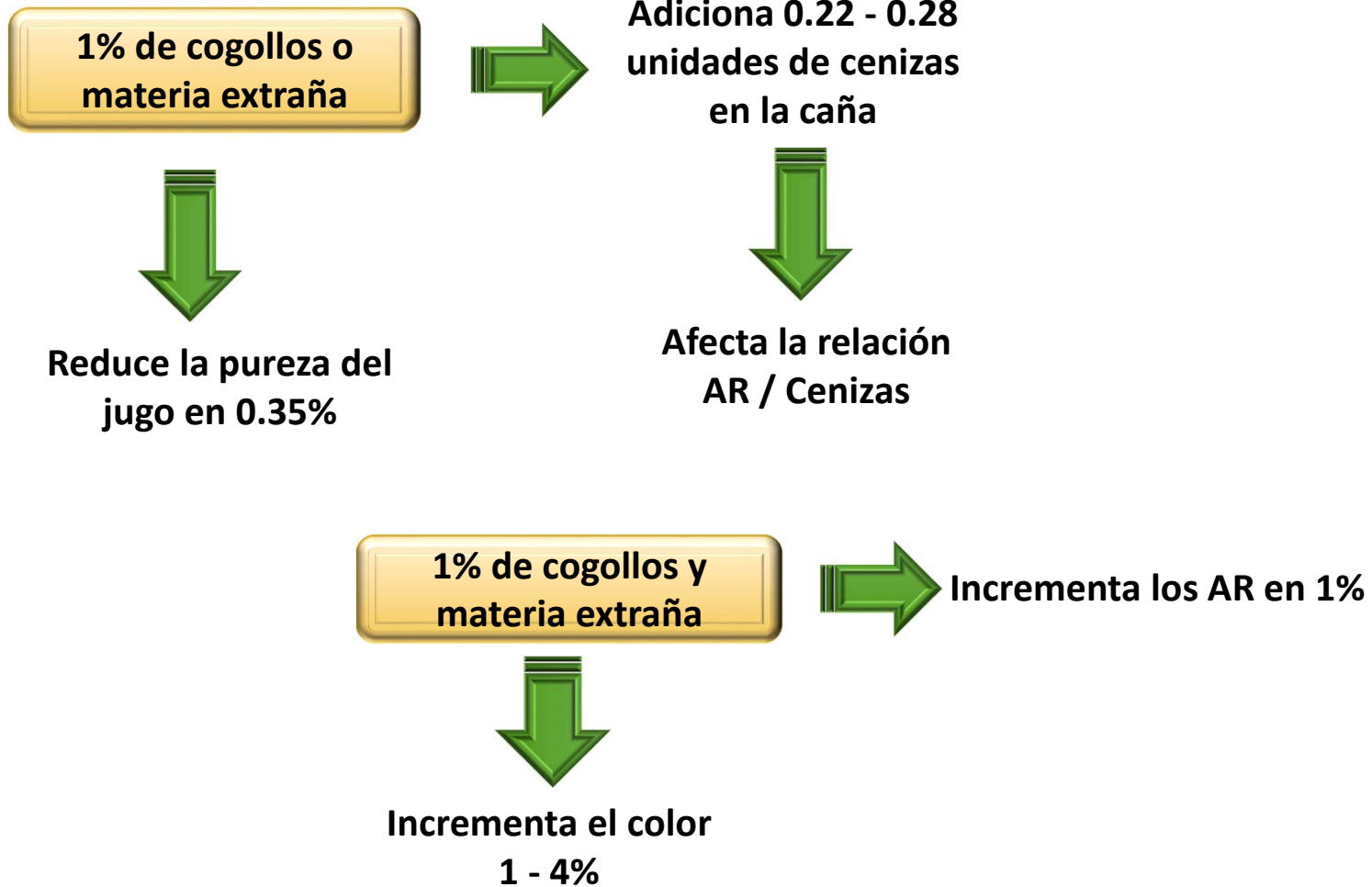
**1000 ppm (base brix) de etanol  $\approx$  Pérdidas de sacarosa: 1 - 3%**

## Impacto general de la materia extraña (%)

M. Extraña	Sac % caña	A.R.E %	Fibra % caña
0	14.60	13	17
1	- 0.14	- 0.2	0.5
5	- 0.70	- 1.0	2.5
10	-1.40	-2.0	5.0

**1 % de materia extraña (mezcla) = 1.5% pérdida ARE**

# Efectos de la materia extraña (Experiencias Sudáfrica)



**Reduciendo los cogollos  
y materia extraña en  
caña en 3%**



**Incrementa la capacidad  
de molienda en 9%, con  
la misma capacidad  
instalada**

**Disminuyendo 1% de  
materia extraña**

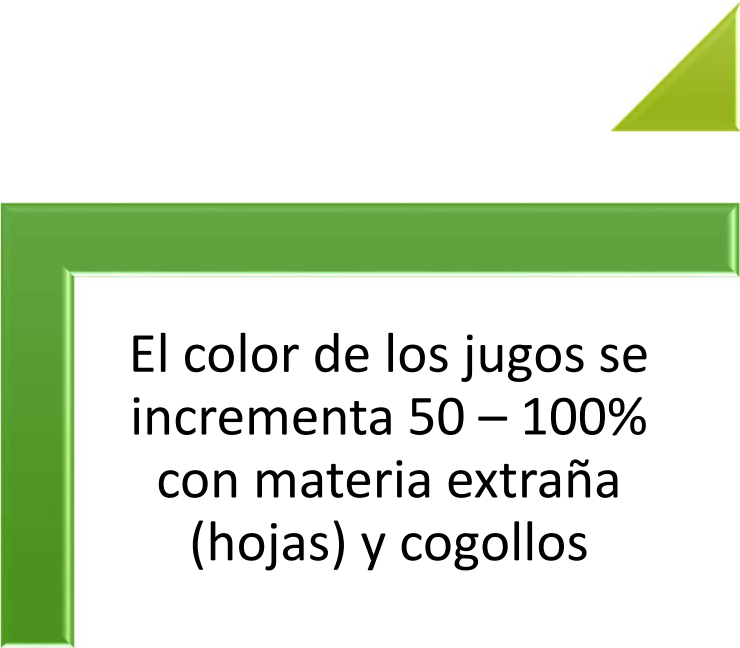


**Se incrementa la  
recuperación de sacarosa  
en 0.3%**

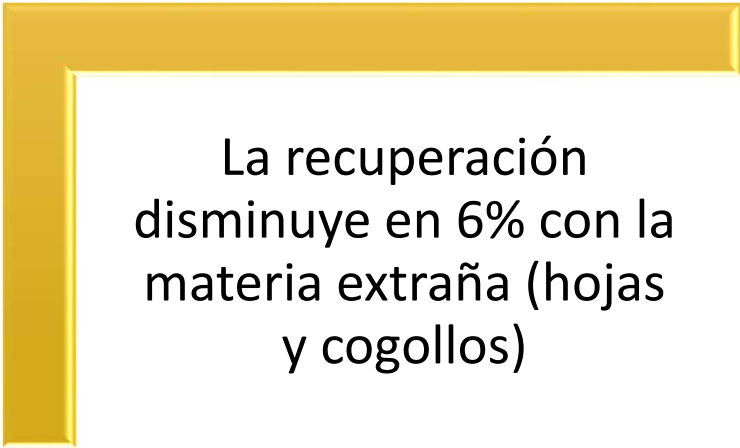
**Reduciendo el contenido  
de cogollos y materia  
extraña en un 3%**



**Reduce los costos de  
transporte en un 3%**



El color de los jugos se incrementa 50 – 100% con materia extraña (hojas) y cogollos



La recuperación disminuye en 6% con la materia extraña (hojas y cogollos)



## Constantes de hidrólisis (k) y pérdidas de sacarosa por hora de apilamiento de la caña en el campo - Temperatura 25 – 30 °C

Variedad	k	Pérdidas de sacarosa % sacarosa en caña por hora	Disminución en sac % <sup>1</sup> caña por hora
MZC 74 - 275	0.0014	0.14	0.023
V7151	0.0010	0.10	0.014
CC 87 – 434	0.0010	0.10	0.015
PR 61-632 <sup>2</sup>	0.0014	0.14	0.015
CC 85 - 92	0.00089	0.089	0.014
CC 85 - 68	0.00093	0.09	0.013
CC 91 - 1999	0.0008	0.08	0.011
CC 84 - 75	0.0008	0.08	0.011
CC 93 - 3895	0.0008	0.08	0.014
CC 93 - 3895 <sup>2</sup>	0.00072	0.07	0.011
CC 92 - 2804	0.0013	0.13	0.020
Promedio	0.0010	0.10	0.015

<sup>1</sup> Reducción estimada en unidades de sacarosa % caña / hora

<sup>2</sup> Variedad evaluada después de quema

## Impacto del tiempo de permanencia (Ref. Cenicaña)

Pérdidas Sac / Hora Tiempo Permanencia	
Corte Manual	0.012 - 0,02
Corte Mecánico	0,030 - 0,06

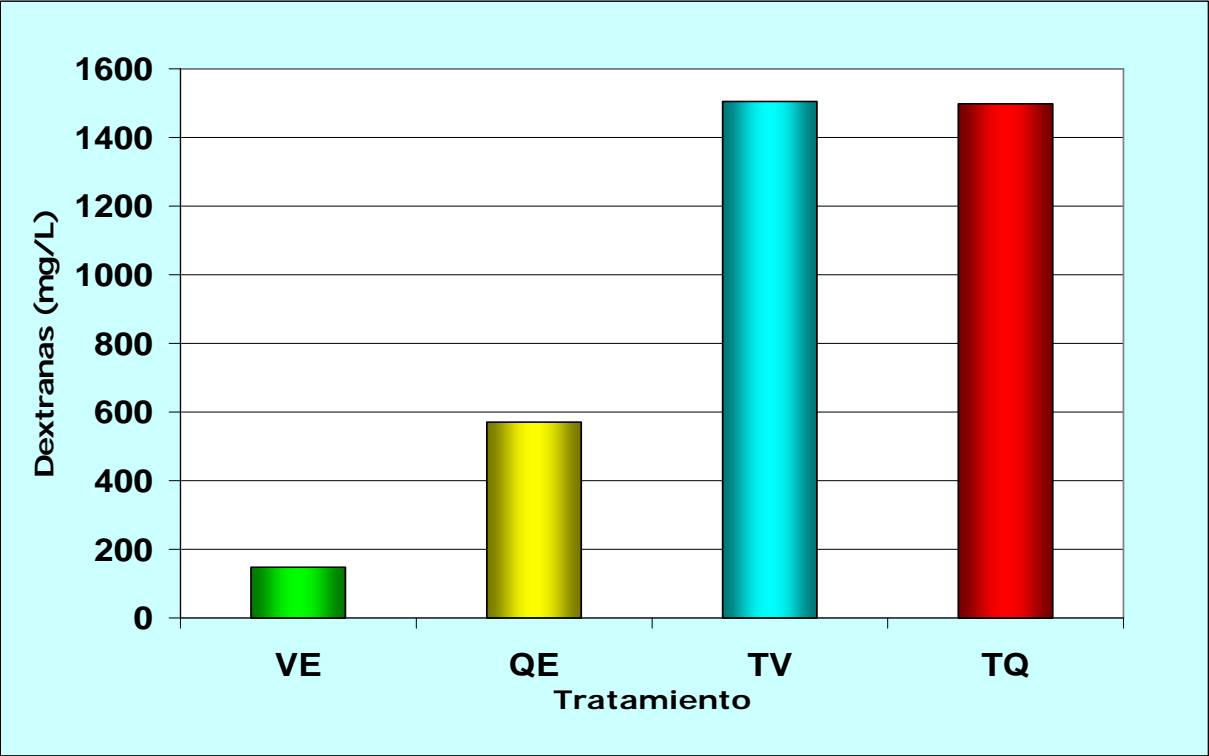
**Tiempo de permanencia:**

**Desde el corte  
Hasta el Molino**

## Variaciones de la sacarosa % caña (S) durante 72 horas Variedad CC 85-92

Corte Manual	VE	$S = 15.0 - 0.020 \times t \text{ (h)}$ $R^2 0.99$
		QE $S = 14.2 - 0.040 \times t \text{ (h)}$ $R^2 0.76$
Corte Mecánico	TV	$S = 14.1 - 0.060 \times t \text{ (h)}$ $R^2 0.75$
		TQ $S = 14.3 - 0.060 \times t \text{ (h)}$ $R^2 0.85$

# Dextranas en jugos de caña a las 24 horas



Corte Manual	Verde (VE), Quemada (QE)
Corte Mecánico	Verde (TV), Quemada (TQ)

**Variedad CC 85-92**

# Relaciones encontradas

Sacarosa (%) caña obtenida en ingenio =  $15 - 0.20 (\% \text{ ME}) - 0.012 (T)$

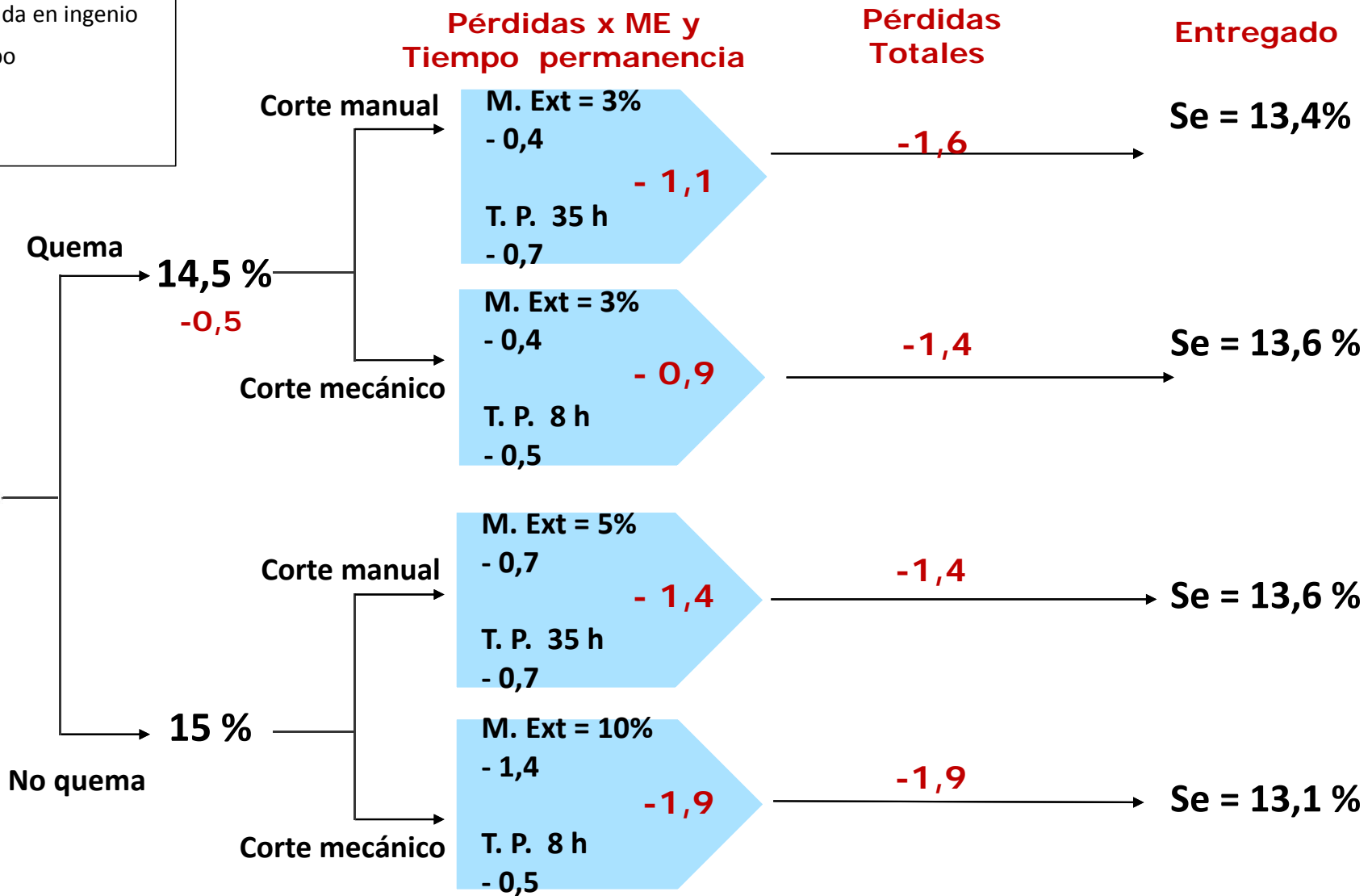
Donde:

ME = materia extraña

T = tiempo de permanencia

Se = Sacarosa (%) caña entregada en ingenio  
 Sc = Sacarosa(%) caña en campo  
 ME = materia extraña  
 T = tiempo de permanencia

**Campo**  
**Sc = 15%**



**Compartir nuestros conocimientos es  
una forma de ser inmortal**

***GRACIAS***

