

# ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

## Estabilización de Suelos con Cenizas

---



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

Dr. Ing. Leonardo Behak  
Instituto de Estructuras y Transporte

# CENIZAS

Minerales resultantes de combustión completa de diferentes materiales, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles

Minerales



Naturales



Biomasa



# COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS

Mineral (%)	Cáscara de Arroz <sup>1,2</sup>		Bagazo de Caña <sup>3</sup>	Volcánica	Madera
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	93,15	87,2	88,2	59,5	36,4
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,21	0,15	2,3	17,8	9,0
Óxido de Calcio (CaO)	0,41	0,55	0,6	6,3	23,8
Magnesia (MgO)	0,45	0,35	0,4	2,5	3,5
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	---	1,12	0,1	---	1,5
Potasio (K <sub>2</sub> O)	2,31	3,60	1,3	3,3	6,7
Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,21	0,16	5,1	6,9	6,4
Óxido Fosfórico (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	---	---	0,4	---	1,9

<sup>1</sup>Basha et al. (2003); <sup>2</sup>Rodríguez (2002); <sup>3</sup>Sales & Lima (2010); <sup>4</sup>Hossain & Mol (2011); <sup>5</sup>Berra et al. (2015)

# PUZOLANA (ASTM C125)

Material silicoso y/o aluminoso que por sí solo posee poca o ninguna capacidad de cementación, aunque en forma finamente dividida y en presencia de agua reacciona químicamente con hidróxidos alcalinos y alcalinos terrosos para formar o contribuir a la formación de compuestos cementantes



# CENIZAS MINERALES (CARBÓN)

## ASTM C186

Clase F

No tiene capacidad de cementación

Clase C

Tiene capacidad de cementación  
(autocementante)

## ASTM C125

Ceniza Volante  
(Fly Ash)

Transportada de zona de combustión a  
sistema de eliminación de partículas

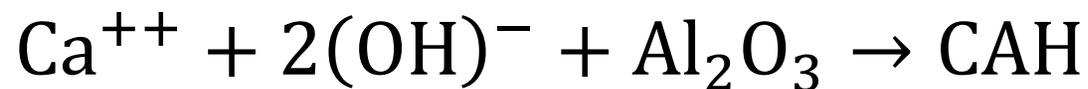
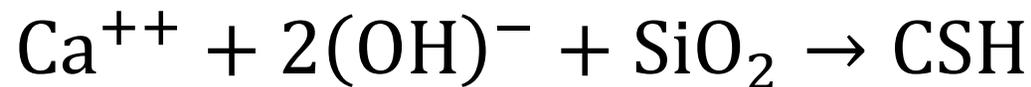
Ceniza de Fondo  
(Bottom Ash)

Porción más pesada que se asienta en el  
piso de las calderas

# RECCIONES PUZOLÁNICAS

Materiales con hidróxidos  
alcalinos y alcalinos terrosos

Cal  
Cemento Portland



CSH	Silicato de Calcio Hidratado
CAH	Aluminato de Calcio Hidratado
CASH	Sílico-Aluminato Hidratado de Calcio

# SUELOS APROPIADOS PARA ESTABILIZAR CON CENIZAS

## Suelos con Bajo o Nulo Contenido de Minerales Arcillosos

Arenas  
Arenas Limosas  
Limos Arenosos  
Limos

## Suelos que Exigen Altos Porcentajes de Cemento

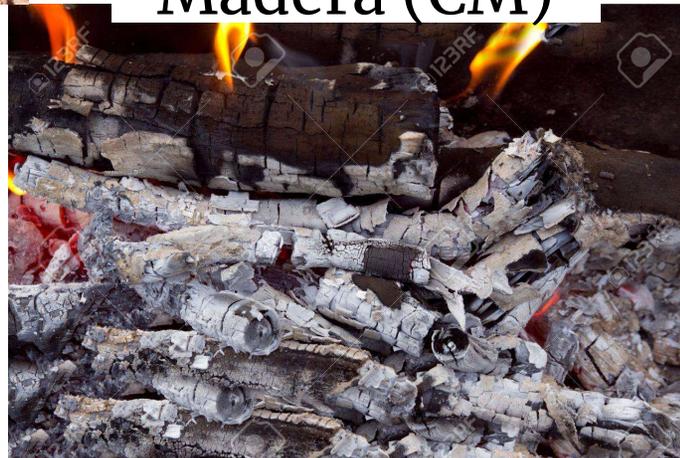
Arenas Finas  
Arenas Mal Graduadas (Dunas)

# CENIZAS DE BIOMASA



Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA)

Ceniza de Madera (CM)



Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA)

# REACTIVIDAD ALCALINA DE LAS CENIZAS DE BIOMASA

## Estructura Mineralógica de la Sílice y Alúmina

Cristalina

Amorfa

Tipo de ceniza apropiada para reacciones puzolánicas es la amorfa, antes que la cristalina

Boateng y Skeete  
(1990)

## Contenido de Orgánico

Retarda las Reacciones Puzolánicas

Afecta el Aumento de Resistencia

# CLASIFICACIÓN DE LAS CCA

Colores se asocian con grado de evolución de proceso de combustión y con transformaciones estructurales de la sílice de la ceniza (Boateng y Skeete, 1990)

## Clasificación (Houston, 1992)

Ceniza con Alto  
Contenido de Carbón



Ceniza con Bajo  
Contenido de Carbón

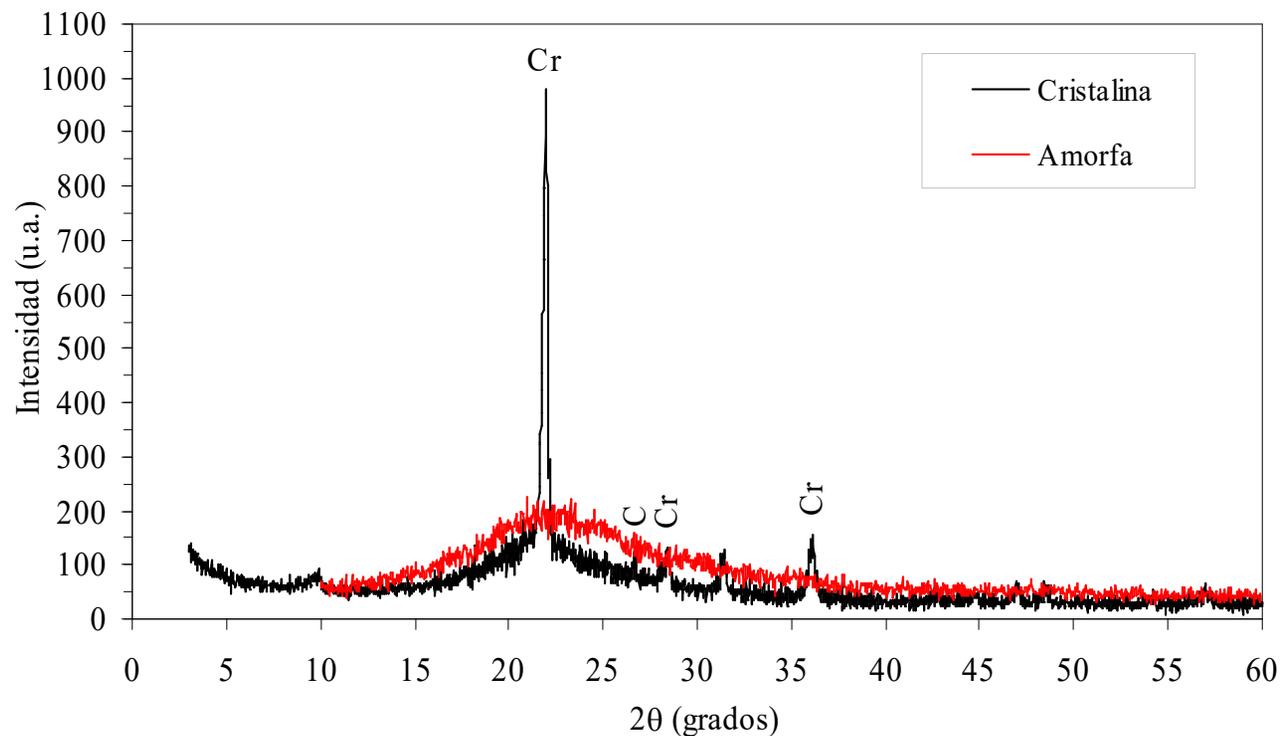


Ceniza Libre de  
Carbón



# DEFINICIÓN CUALITATIVA DE CRISTALINIDAD

## Difractometría de Rayos X Ceniza de Cáscara de Arroz (Arrozur, Villa Sara)



Cr: Cristobalita  
C: Carbón

# CONTENIDO DE ORGÁNICO

## Ensayo de Pérdidas por Ignición (ASTM D7348)

Pérdida de masa de muestra por combustión en horno a 550°C en 3 h

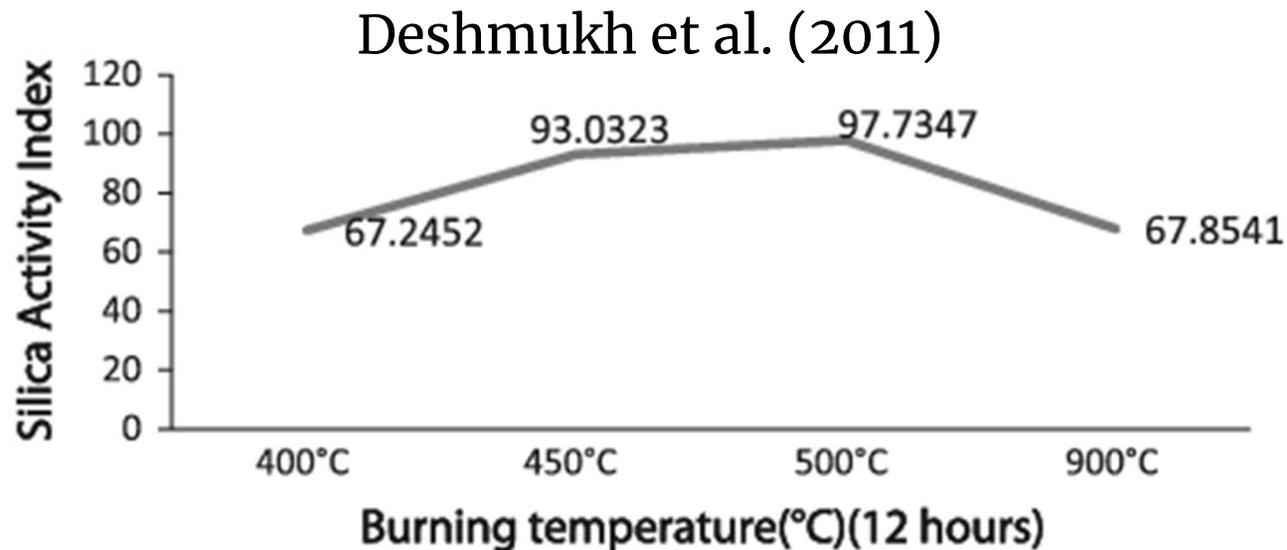
Ceniza	LOI (%)
CCA Arrozur	16,8
CCA Galofer	15,0
CCA Arrozal 33	34,1
CCA Demelfor	38,8
CBCA ALUR	74,4



# DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE REACTIVIDAD

## Índice de Actividad de Sílice (IAS) (Mehta, 1979)

Porcentaje de sílice disponible que se disuelve en un exceso de 0,5M de hidróxido de sodio (NaOH) en un período de extracción de 3 minutos



# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

## Modo de Quema

Tecnología de producción varía desde quema a cielo abierto hasta incineradores especialmente proyectados (Mehta, 1979)

Incineración a cielo abierto o en hornos convencionales produce cenizas cristalinas (Mehta, 1975), de baja reactividad por altos gradientes de temperatura y formación de sílice cristalina (Boateng y Skeete, 1990)

Incineración en hornos a temperatura controlada produce ceniza blanca altamente reactiva que mezclada con cal se transforma en un cemento tan bueno como el cemento Portland (Mehta, 1975)

# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

## Modo de Quema

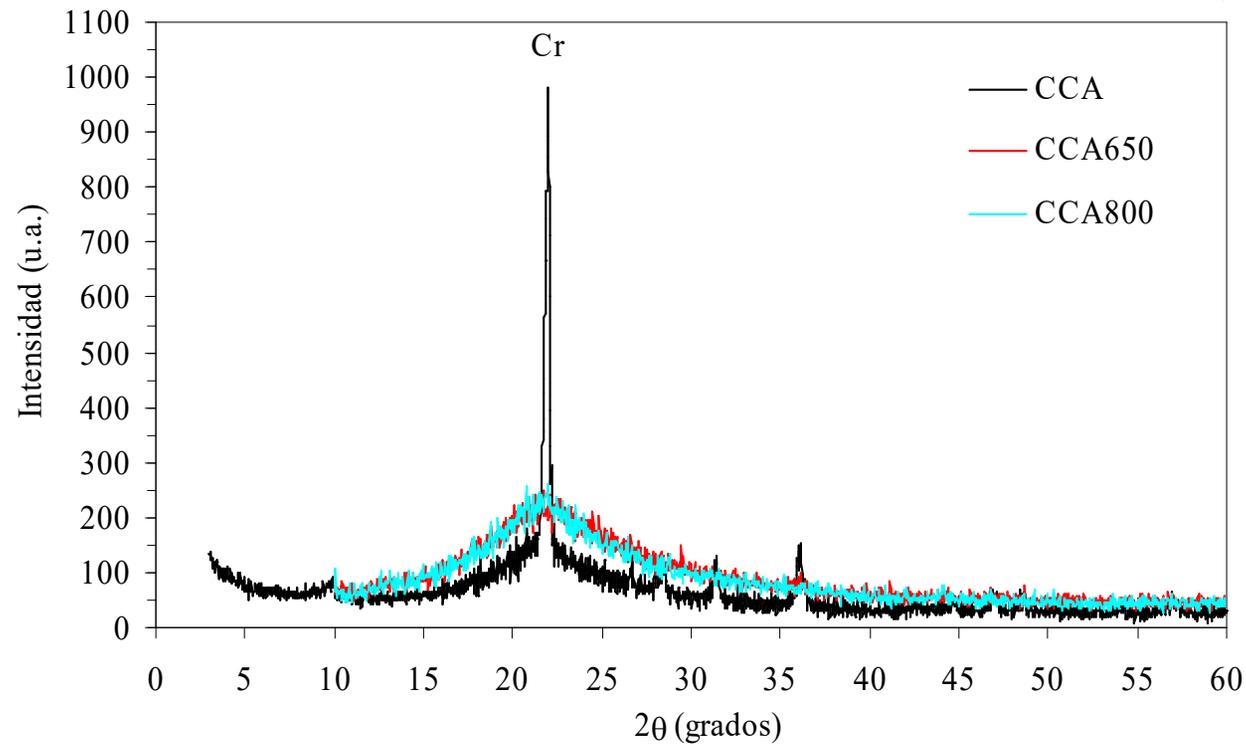
Behak (2017); Behak et al. (2015)

Tipo	Ceniza	LOI (%)
No Controlada	CCA Arrozur	16,8
	CCA Galofer	15,0
	CCA Arrozal 33	34,1
	CCA Demelfor	38,8
	CBCA Alur	71,4
Controlada	CCA Arrozur650	4,1
	CCA Arrozur800	2,3

# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

## Modo de Quema

### Ceniza de Cáscara de Arroz de Arrozur (Behak, 2007)



# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

Temperatura de Quema  
CCA (Behak, 2007)

4 h



$T = 500^{\circ}\text{C}$



$T = 650^{\circ}\text{C}$



$T = 800^{\circ}\text{C}$

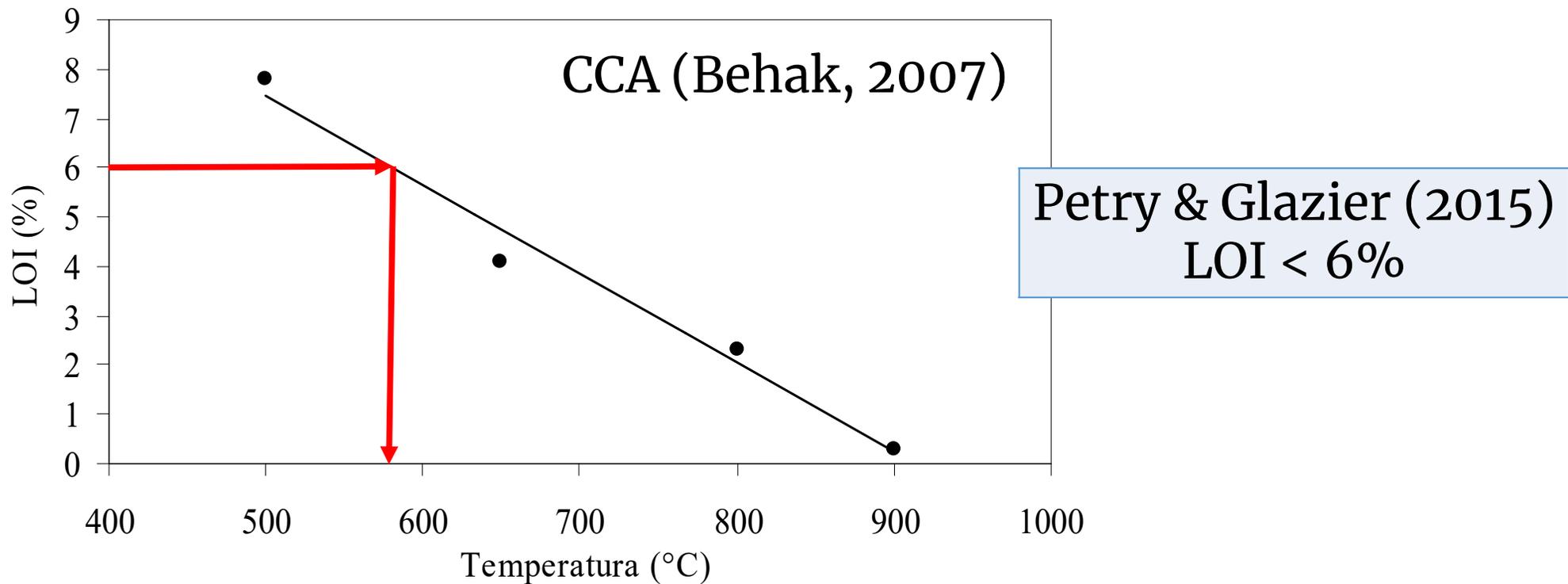


$T = 900^{\circ}\text{C}$

# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

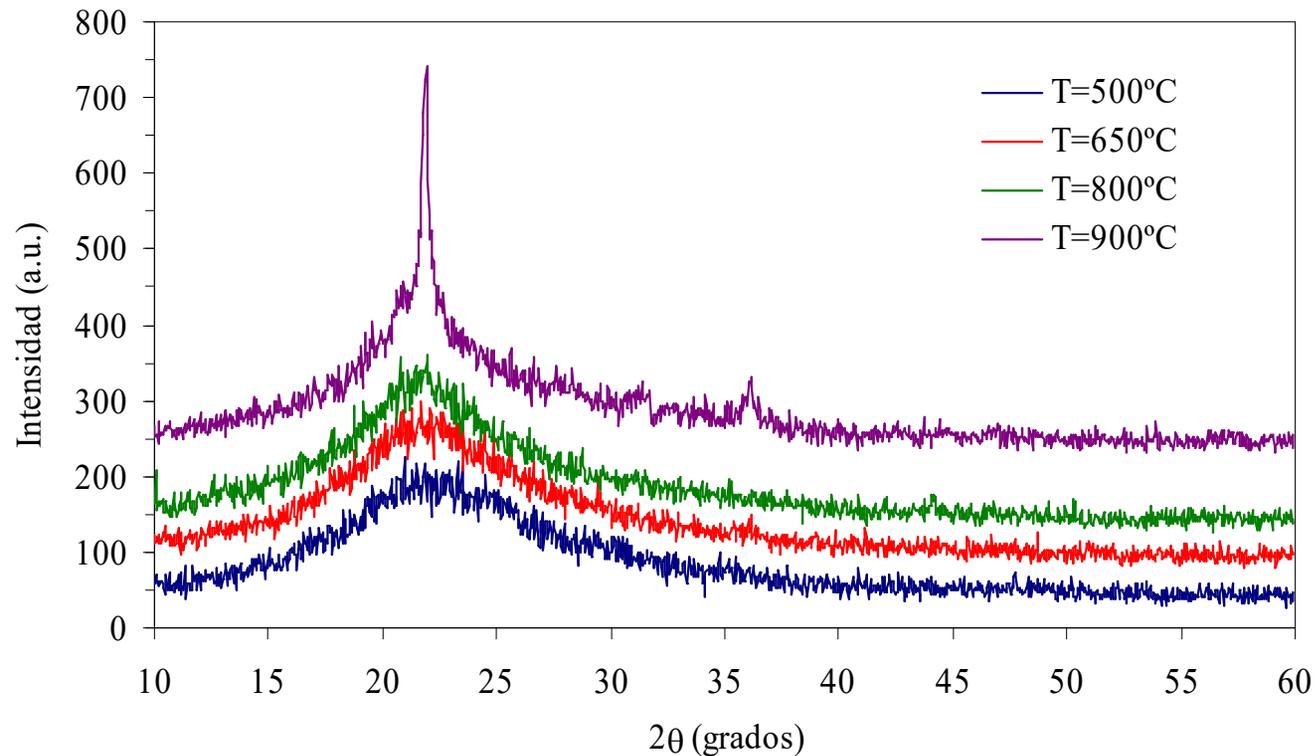
## Temperatura de Quema

### Pérdidas por Ignición (LOI) a 1000°C



# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

## Temperatura de Quema DRX de CCA (Behak, 2007)



# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

## Temperatura de Quema

Behak (2007)	$T < 650^{\circ}\text{C}$ : Remanente orgánico no admisible
	$T > 800^{\circ}\text{C}$ : Estructura cristalina no deseable
	Quema de cáscara de arroz a $T = 650^{\circ}\text{C}-800^{\circ}\text{C}$ por 4h $\rightarrow$ CCA de máxima reactividad
Boateng y Skeete (1990)	Cáscara de arroz quemada a $T = 550^{\circ}\text{C}-700^{\circ}\text{C}$ generalmente produce $\text{SiO}_2$ amorfa
	$T > 900^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Formas cristalinas no deseables
Rahman (1986)	Quema de cáscara de arroz a $T = 800^{\circ}\text{C}$ produce CCA con $< 3\%$ de orgánico

# FACTORES QUE AFECTAN REACTIVIDAD DE CENIZAS

## Tiempo de Quema

Mehta (1979)	SiO <sub>2</sub> esencialmente amorfa con T < 500°C en t prolongado o hasta 680°C con t < 1 min
Yeoh et al. (1979)	CCA amorfa con T hasta 900°C si t < 1 h; SiO <sub>2</sub> cristalina a T = 1000°C con t > 5 min
Smith y Kamwanja (1986)	SiO <sub>2</sub> cristalina en pequeñas proporciones a T < 800°C mantenidas durante 12 h
Nair et al. (2008)	T de 500°C y 700°C y t > 12 h favorecen producción de CCA reactivas

# MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE CENIZA ÓPTIMA

Método RCI (Thompson, 1966)

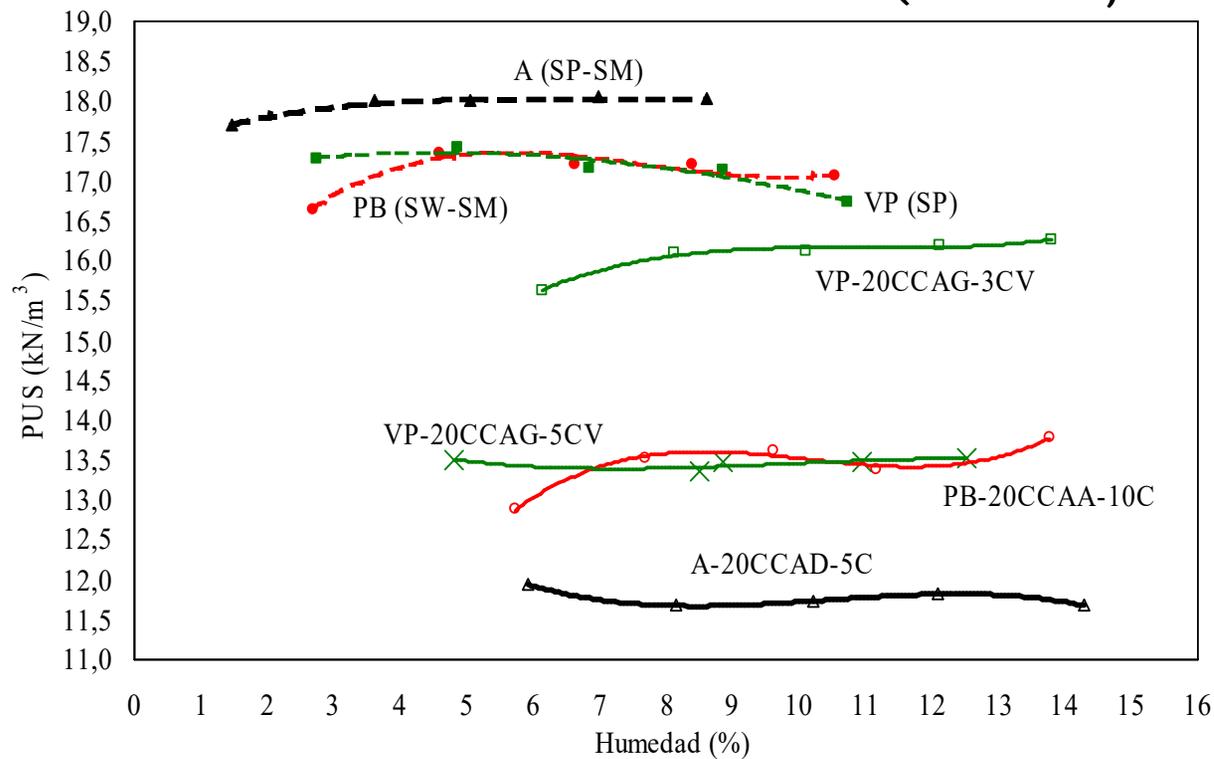
- Moldear probetas de suelo con diferentes porcentajes de ceniza
- Curar las probetas durante 28 días a temperatura de  $22,8^{\circ}\text{C}$  o 48 h a temperatura de  $48,9^{\circ}\text{C}$
- Ensayar probetas a compresión inconfiada

## Criterio generalmente adoptado

Porcentaje óptimo de ceniza es el que produce máxima RCI

# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Compactación CCA (Behak, 2017)



### Suelo

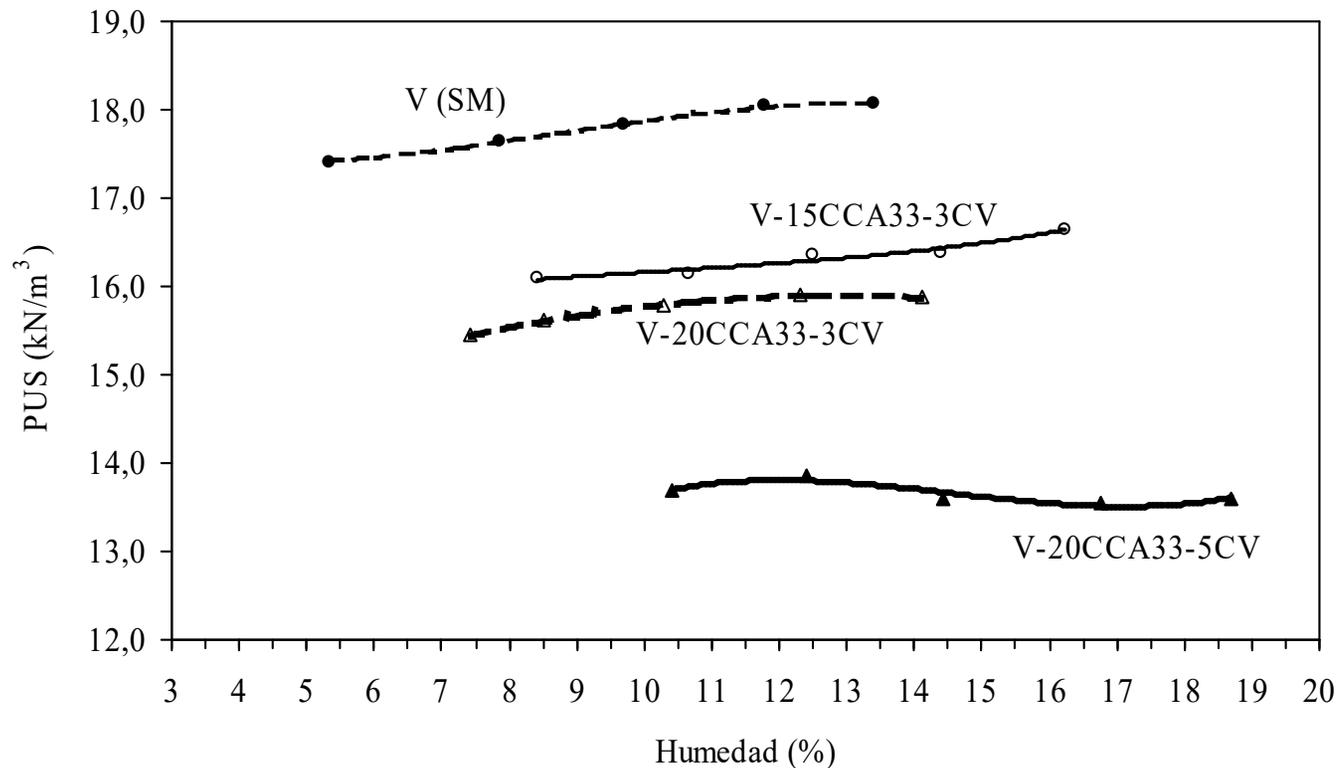
PB: Pérez Bustos  
A: Arenisca de Tacuarembó  
VP: Villa Passano

### CCA

A: Arrozur  
D: Demelfor  
G: Galofer

# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Compactación CCA (Behak, 2017)



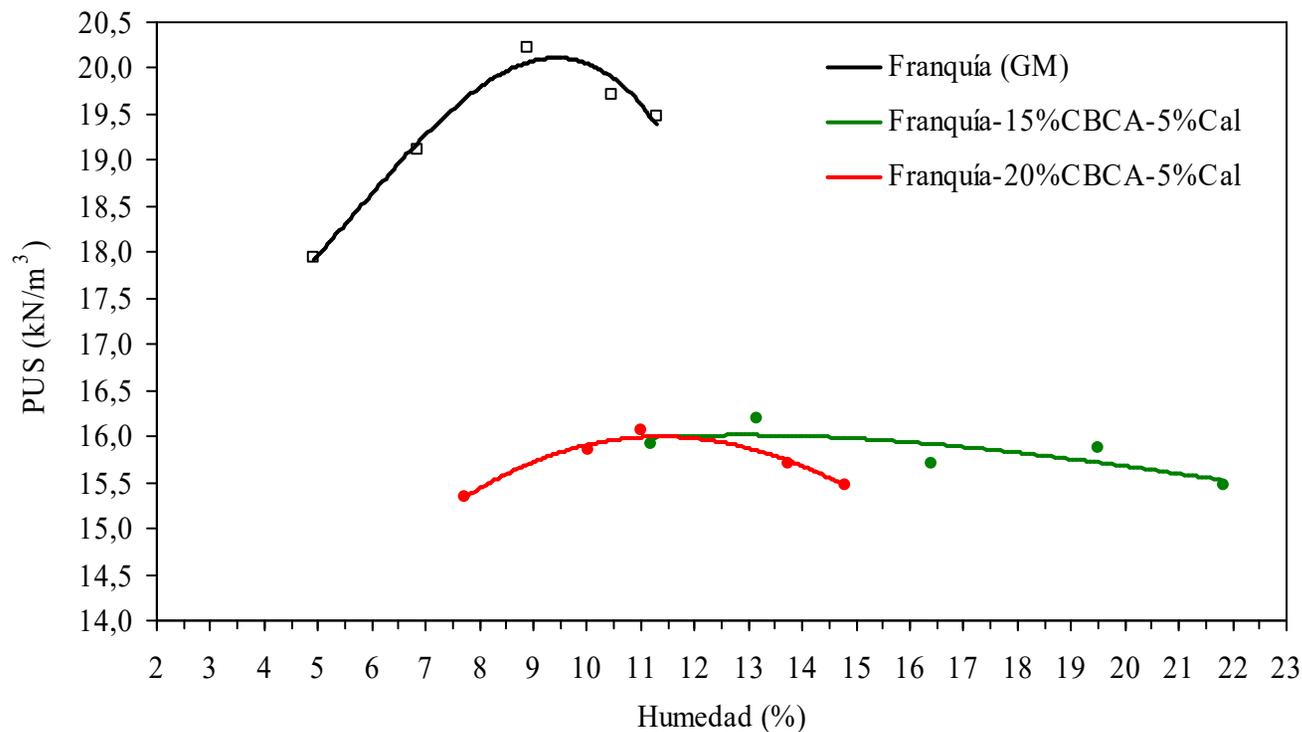
V: Arena de Vergara

33: CCA de Arrozal 33

# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Compactación

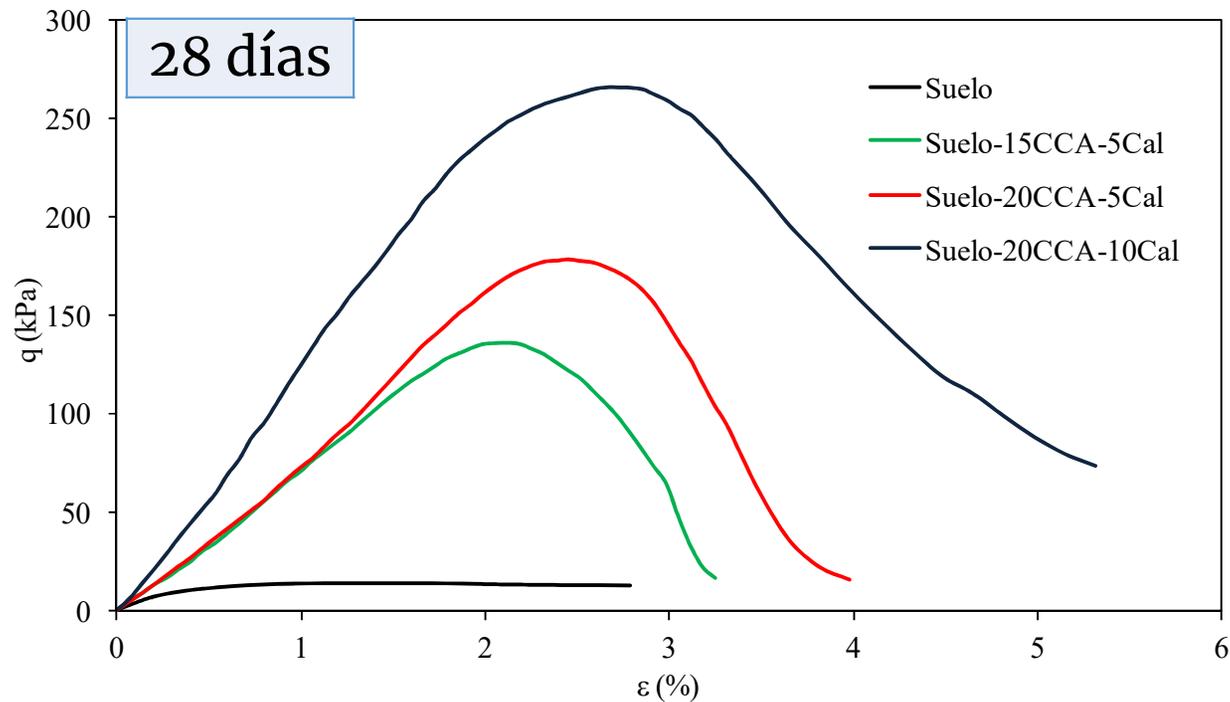
Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (Behak et al., 2015)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Comportamiento Tensión-Deformación Efecto del Contenido de Ceniza

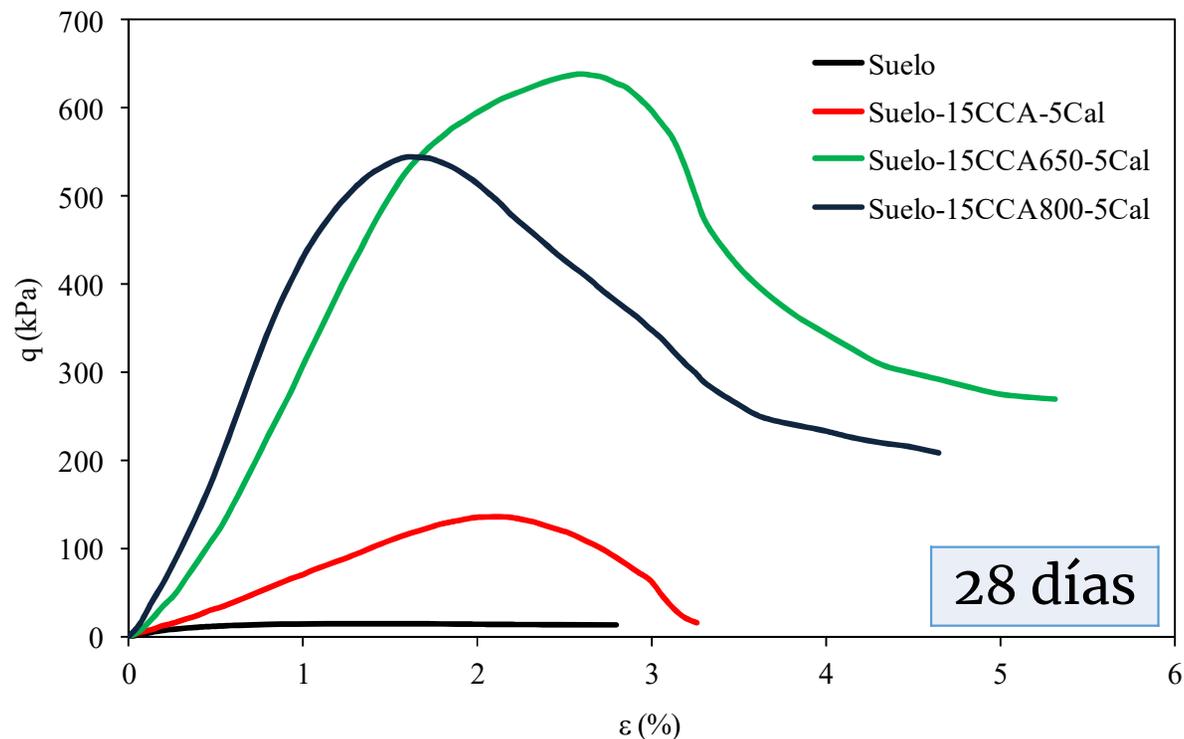
Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur–Cal Hidratada (Behak, 2007)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Comportamiento Tensión-Deformación Efecto del Tipo y Temperatura de Quema

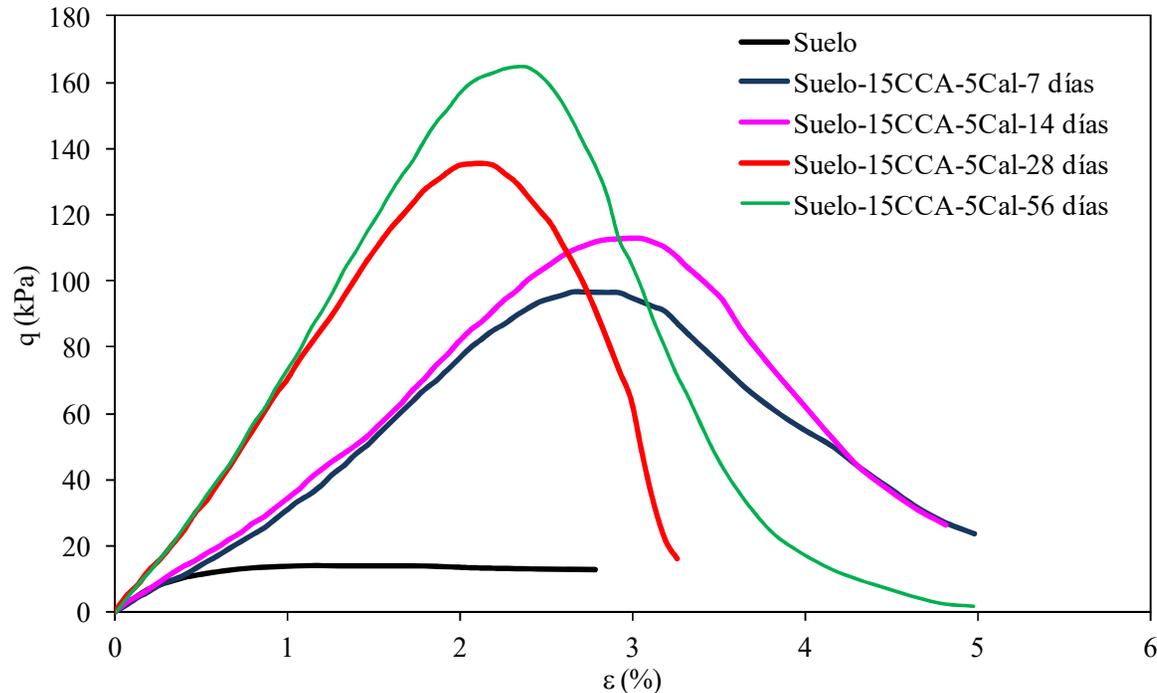
Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur-Cal Hidratada (Behak, 2007)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Comportamiento Tensión-Deformación Efecto del Tiempo

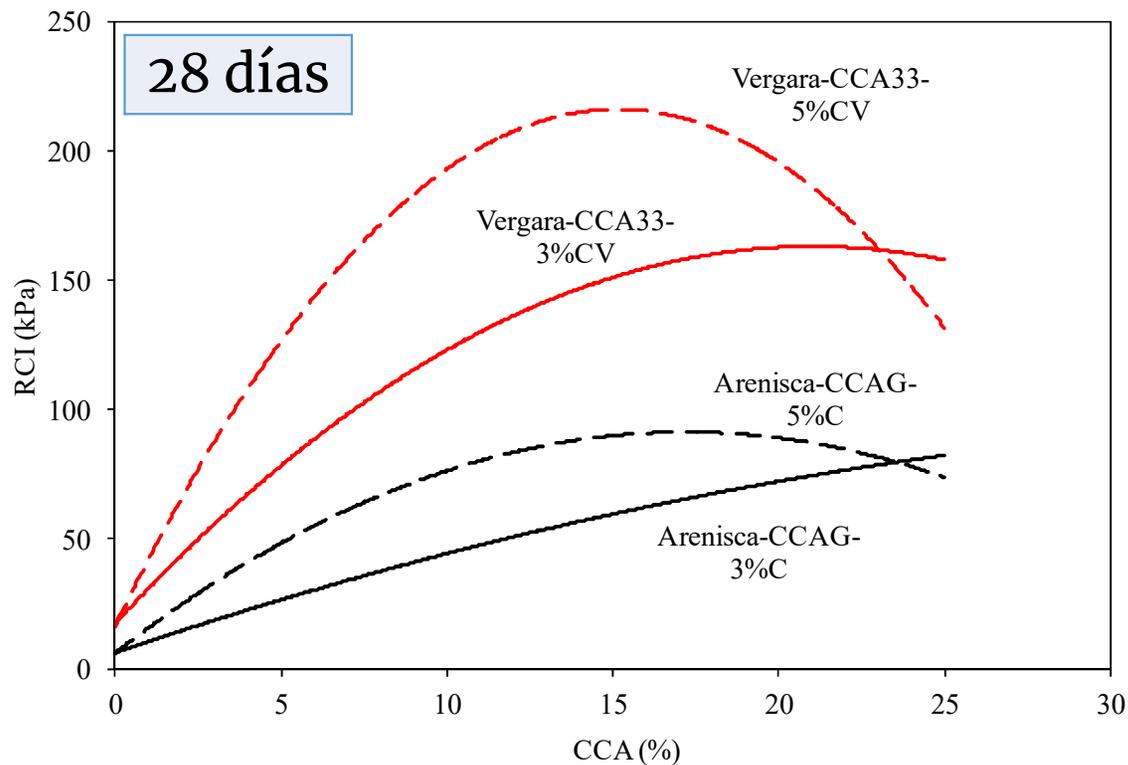
Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur–Cal Hidratada (Behak, 2007)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI)

### Efecto del Contenido de Ceniza

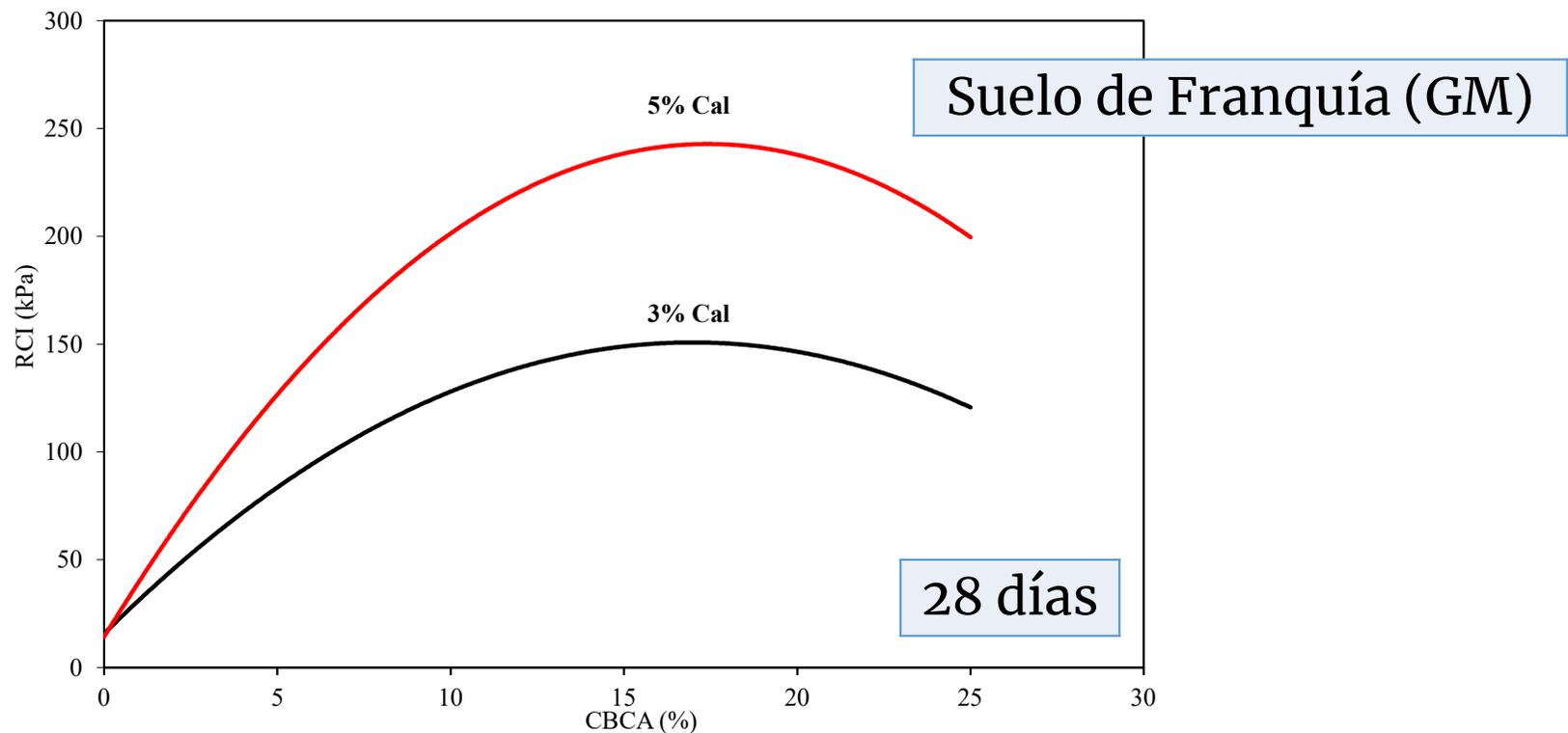


Suelo	
Arenisca	SP-SM
Vergara	SM

# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI)

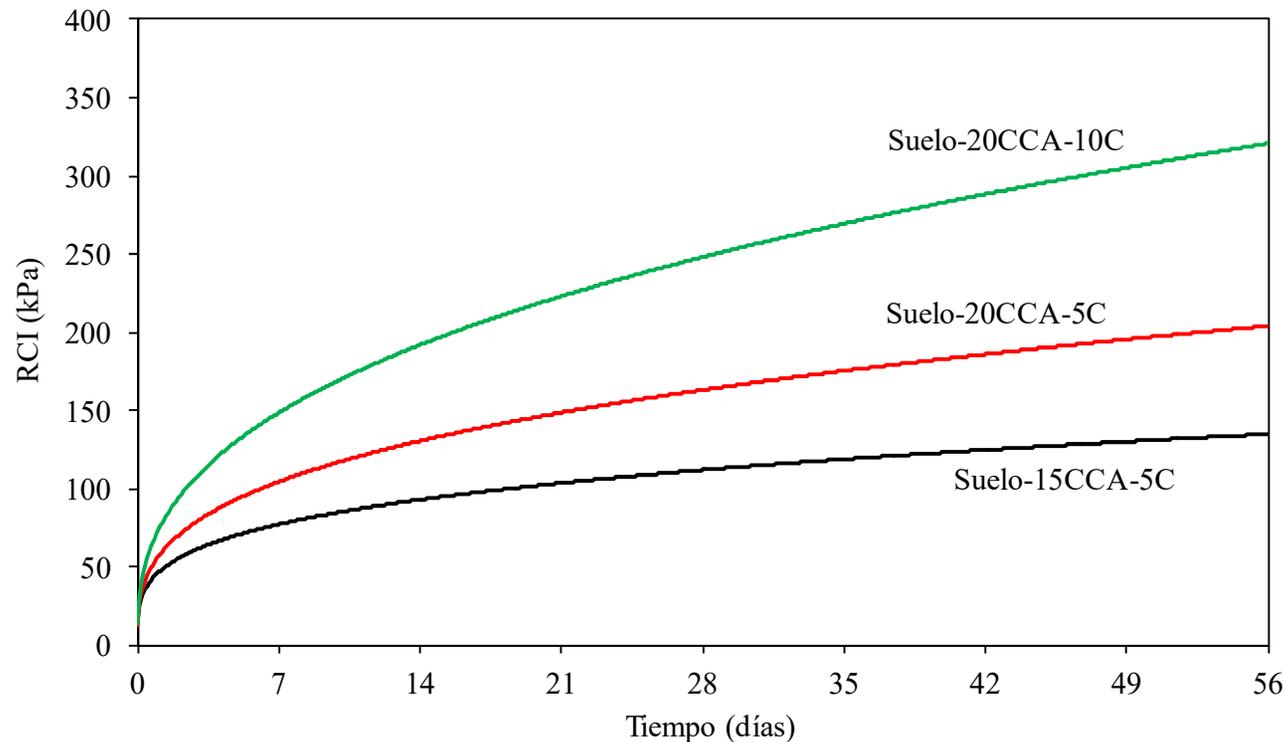
Efecto del Contenido de Ceniza (Behak et al., 2015)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI) Efecto del Tiempo

Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur–Cal Hidratada (Behak, 2007)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI)

### Reactividad de la Ceniza

Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur–Cal Hidratada (Behak, 2007)

28 días

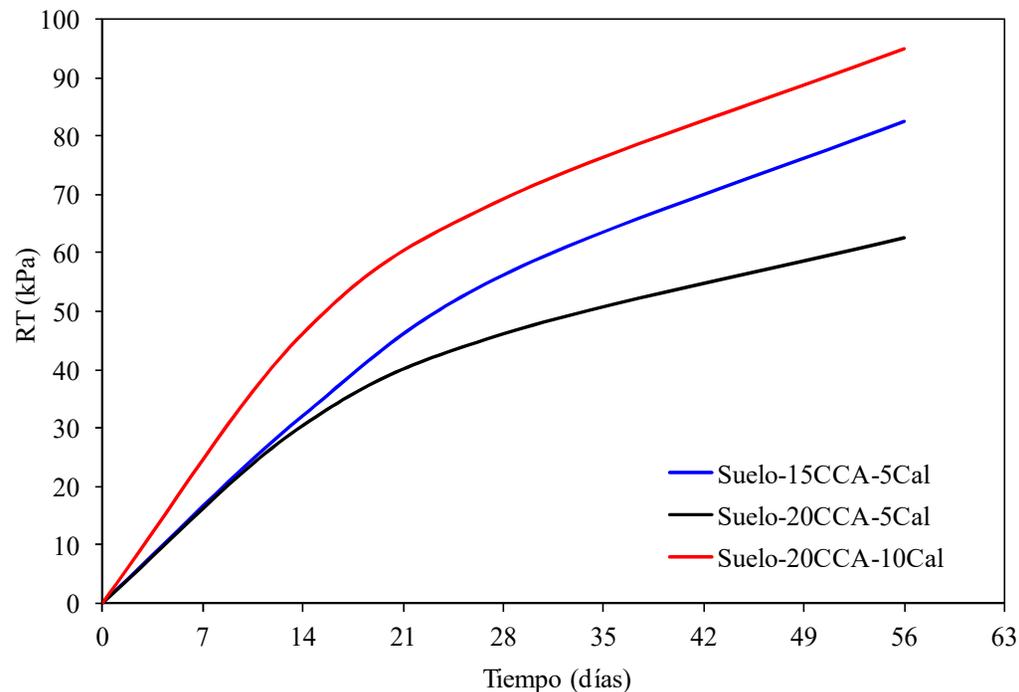
MATERIAL	RCI (kPa)
Suelo	14
Suelo-15CCA-5C	118
Suelo-20CCA-5C	181
Suelo-20CCA-10C	247
Suelo-15CCA650-5C	570
Suelo-15CCA800-5C	504

# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI)

### Efecto del Contenido de Ceniza y el Tiempo

Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur–Cal Hidratada (Behak, 2007)



# EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

## Durabilidad

### Humedecimiento y Secado

### Método de Iowa (Hoover et al., 1958)

Arena Pérez Busto (SW-SM)–CCA Arrozur–Cal Hidratada (Behak, 2007)

MATERIAL	RCI (kPa)		Q <sub>r</sub> (%)
	Sin Ciclos	Con Ciclos	
Suelo-15CCA-5Cal	210	134	64
Suelo-20CCA-5Cal	197	141	72
Suelo-20CCA-10Cal	364	279	77

$Q_r > 80\%$  (Marcon, 1977)