

# PERFECCIONAMIENTO DE LAS ECUACIONES UTILIZADAS EN LA PRODUCCIÓN DE CLÍNKER EN CEMENTERA CUBANA

Elia N. Cabrera Álvarez<sup>1</sup>, Yoandy Rodríguez Tamayo y Carlos Alberto Álvarez Bravo  
Dpto. de Matemática, Facultad de Ciencias Económicas Empresariales  
Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba,  
Dirección Postal: Ave. 32 # 4903-A e/ 49 y 51. Cienfuegos.

## ABSTRACT

Statistical modeling has been widely used in several applications articulating theoretical, methodological and computational aspects of statistical models. This research was carried out in Cementos Cienfuegos SA (CCSA), in Cienfuegos province, Cuba, with the purpose of get more precise calculation equations in order to predict the percentages of the clínker mineral phases produced in kiln 3 of said industry. In this industry modified Bogue's equations are used to calculate the percentages of the clínker mineral phases from the main oxides in the raw material, those that overestimate or underestimate the real percentage of the mineral phases in the clínker. Predictive equations are obtained through the Multiple Linear Regression Analysis, after an exploratory data analysis. Was used the Statgraphics Centurion XV statistical package. The models obtained improve the percentage of adjustment obtained previously and were statistically validated to make the predictions of the mineral phases of the clínker with greater precision and reliability, contributing to the fulfillment of objectives 8, 9 and 11 of the 2030 Agenda and decision making in the construction sector, one of the strategically prioritized in Cuba.

**KEY WORDS:** statistical modeling, clínker, prediction equations

**MSC:** 62J05; 62J86

## RESUMEN

La modelación estadística ha sido ampliamente utilizada en múltiples aplicaciones articulando aspectos teóricos, metodológicos y computacionales. La presente investigación se realizó en la empresa Cementos Cienfuegos S.A (CCSA), de la provincia de Cienfuegos, Cuba, con el propósito de obtener ecuaciones de cálculo más precisas para predecir los porcentajes de las fases minerales del clínker producido en el horno 3 de dicha industria. En esta industria se utilizan ecuaciones de Bogue modificadas para calcular los porcentajes de las fases minerales del clínker a partir de los principales óxidos en la harina, las que sobrestiman o subestiman el porcentaje real de las fases minerales en el clínker. Las ecuaciones predictivas se obtienen por intermedio del Análisis de regresión lineal múltiple, previo análisis exploratorio de los datos. Se utilizó el paquete Statgraphics Centurion XV. Los modelos obtenidos mejoran el porcentaje de ajuste obtenido con anterioridad y fueron validados estadísticamente. Dichos resultados contribuyen al cumplimiento de los objetivos 8, 9 y 11 de la Agenda 2030 y a la toma de decisiones en el sector de la construcción, uno de los priorizados estratégicamente en Cuba.

**PALABRAS CLAVE:** modelación estadística, clínker, ecuaciones de predicción

## 1. INTRODUCCIÓN

El cemento es uno de los principales materiales utilizados en la industria de la construcción. La demanda y producción a nivel mundial tiene diferentes comportamientos de acuerdo con la región y el desarrollo de los diferentes países.

El proceso de clínkerización es la parte más importante del proceso de fabricación de cemento que deriva en emisiones atmosféricas que afectan el medio ambiente, por lo que la eficiencia en este proceso es fundamental para reducir dichas emisiones. Investigadores en esta temática como Condezo [5], Tobón y López [12], plantean que el proceso de clínkerización consiste en llevar la harina cruda homogenizada al horno rotatorio a altas temperaturas. En la salida del horno se produce la fusión de varios componentes y se forman gránulos conocidos como clínker. La calidad del clínker a la salida del horno depende de la temperatura de éste, el tiempo de residencia de la harina en el horno, la granulometría y la correcta composición de los óxidos: CaO; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Si<sub>2</sub>O; SO<sub>3</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

En CCSA algunos de estos parámetros son garantizados por las instalaciones supervisadas mediante el proceso de control de calidad en el laboratorio de la planta. Las principales fases en el clínker son: alita (C3S),

---

<sup>1</sup> [elita@ucf.edu.cu](mailto:elita@ucf.edu.cu)

belita (C2S), celita (C3A) y ferrita (C4AF), además, pueden estar presente cristales de cal libre, periclasa y sulfatos alcalinos, entre otros [10]. Las proporciones, la cristalinidad y la textura de estas fases minerales en el clínker controlan propiedades tan importantes en el cemento como: fraguado, calor de hidratación, reactividad y desarrollo de resistencias [11], [8]. De ahí la importancia de cuantificarlas con precisión.

Álvarez, Cortés y Moreira [1], elaboraron un método a partir del cual se obtiene un grupo de ecuaciones para el cálculo de los porcentajes de las fases minerales del clínker antes de la obtención de dicho producto utilizando los porcentajes de los óxidos en la materia prima mediante las ecuaciones de Bogue las que sobrestiman o subestiman el porcentaje real de las fases minerales en el clínker.

Es objetivo de este estudio es obtener ecuaciones de predicción más precisas a partir de las ecuaciones estimadas por Álvarez, Cortés y Rodríguez [2], para predecir los porcentajes de las fases minerales clínker, a partir del conocimiento de los porcentajes de estos óxidos en la harina, como base para la toma de decisiones en el proceso de producción del clínker garantizando la calidad del producto y una disminución en las pérdidas por producciones de baja calidad.

## 2. ECUACIONES DE PREDICCIÓN PARA EL CÁLCULO DE LAS FASES MINERALES EN EL CLÍNKER

Varias son las metodologías desarrolladas para la cuantificación de los porcentajes de las fases minerales del clínker, entre ellas, la difracción de Rayos-X (ASTM C1365-98), cálculo potencial de Bogue (ASTM C150-94) y la microscopía óptica Holderbank [11], Calderón [3], y Cámara[4]. En Tobón y López [12], se propone el conteo manual de puntos ASTM o análisis digital de imágenes García-Márquez [7].

La forma general de los modelos estadísticos paramétricos puede ser representada por la expresión:

$$Y_i = f(x_i; \theta) + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

Donde:

$f(x_i; \theta)$  es una familia determinada por una forma funcional específica, indexada en el espacio paramétrico  $\Theta$ , siendo  $\theta$ , el parámetro de interés.

En el modelo de regresión múltiple de una variable respuesta  $Y$  sobre  $p$  variables explicativas  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  es:

$$Y_i = \alpha + \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_j + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

Donde  $x_i^t = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$  son las  $i$ -ésimas observaciones de las variables explicativas y los  $\beta_j$  son los coeficientes asociados que junto con  $\alpha$  son los parámetros de interés.

Es preciso destacar que el algoritmo planteado por Álvarez, Cortés y Moreira [1], considera la obtención de 5 ecuaciones que permiten predecir los porcentajes de los principales óxidos en el clínker a partir del conocimiento de los porcentajes de estos óxidos en la harina. Dichos modelos fueron sustituidos en las Ecuaciones de Bogue, las que representan el porcentaje de los principales óxidos (cantidades de los compuestos principales en el clínker) presentes en el clínker. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$C_3S = 4.071C_aO - (7.6S_iO_2 + 6.718Al_2O_3 + 1.43Fe_2O_3 + 2.852SO_3)$$

$$C_2S = 2.867S_iO_2 - 0.7544C_3S$$

$$C_3A = 2.65Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3$$

Como resultado, se obtiene un conjunto de ecuaciones que permiten predecir los porcentajes de las fases minerales del clínker, también, a partir del conocimiento de los porcentajes de los óxidos en la harina.

## 3. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DE LAS ECUACIONES DE PREDICCIÓN

Se propuso un procedimiento para el ajuste del modelo de regresión, donde se comprueban supuestos del método de Mínimos cuadrados. El método de Mínimos Cuadrados Ordinarios ofrece algunas propiedades

estadísticas muy atractivas por lo que se considera uno de los métodos más efectivos y populares [9]. Desde el punto de vista de Harrel [10], este modelo se usa con frecuencia y sus parámetros que se interpretan fácilmente sobre todo después de linealizar el modelo. Dicho procedimiento se organizó metodológicamente en tres etapas para la obtención de las ecuaciones predictivas:

**Etapla 1- Recopilación de la información y preparación de los datos.**

**Etapla 2- Obtención de las ecuaciones de ajuste para las fases minerales del clínker.**

**Etapla 3- Validación de las ecuaciones de ajuste.**

En la Etapa 1 fueron considerados dos momentos: la selección de la muestra y el Análisis Exploratorio de Datos (EDA), en el que se integraron el análisis gráfico, la detección de atípicos y el análisis descriptivo.

En la Etapa 2, las ecuaciones de ajuste fueron determinadas por el Análisis de Regresión Lineal partiendo de la verificación de supuestos necesarios, el Análisis de correlación y finalmente la estimación de las ecuaciones para los porcentajes de las 4 fases (Alita, Belita, Celita y Ferrita) a partir de las ecuaciones ya validadas por Álvarez, Cortés y Rodríguez [2].

La obtención de las ecuaciones de ajuste para las cuatro fases minerales del clínker se realizó por el método Paso a Paso, de acuerdo con Walpole, Myer y Myer [14], que justifica el modelo final seleccionado.

En la etapa 3. De acuerdo con lo descrito por García-Márquez [7], son varios los métodos y coeficientes que pueden utilizarse para validar las ecuaciones de regresión entre ellos se utilizó la Prueba de la regresión múltiple, el cálculo de los coeficientes de determinación  $R^2$  y  $R^2$  ajustado y los errores estándar. Otra forma de verificar el ajuste de las ecuaciones obtenidas es mediante el análisis de residuos, de manera gráfica o analíticamente, mediante diferentes pruebas como la Durbin Watson, para determinar si hay correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

#### 4. RESULTADOS

En Álvarez Cortés y Rodríguez [2], se demuestra que el porcentaje de cada óxido en el clínker depende del porcentaje del mismo óxido en la harina y ya se han determinado las relaciones funcionales existentes entre los porcentajes de los óxidos en el clínker y en la harina. Corregido Corrección

**Resultados de la Etapa 1. Recopilación de la información y preparación de los datos.**

La muestra estuvo conformada por 909 observaciones recogidas durante el período comprendido entre Mayo 2019 y Agosto 2019 en el horno 3, único en funcionamiento en CCSA. Del análisis visual para los óxidos en el clínker que ofrece el EDA, pueden observarse valores atípicos según los gráficos de caja de cada uno de los óxidos en el clínker (figura 1). Se detectaron valores atípicos donde resaltan varios valores por debajo del cuartil 25 y por encima del cuartil 75.

De este análisis se detectaron 4 valores atípicos correspondientes al dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), 6 en la variable óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 2 casos en la variable óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 6 casos en la variable óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y 15 casos en el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). Sin embargo, el tratamiento dado a los valores atípicos encontrados, por no ser valores extremos, fue sustituirlos por la trimedia o media recortada al 5% por ser éste un estimador robusto que suaviza el valor de los extremos y es poco sensible a las desviaciones de los supuestos inherentes a los modelos probabilísticos Freixa [6]. Por las mismas razones en el análisis descriptivo fue utilizado como índice de localización la media recortada o trimedia. A partir de estas consideraciones se obtienen rangos intercuartílicos aceptables en cada uno de los óxidos como se observa en la tabla 1 que serán las variables predictoras para la obtención de los modelos de ajuste.

Del propio análisis descriptivo, fueron visualmente contrastados los valores promedio (trimedia) y rango intercuartílico de los 5 óxidos en el clínker con los valores típicos según las especificaciones técnicas del clínker, según criterio de Valle [13], quien hace referencia a la importancia del control de la calidad de sus parámetros químicos y físicos para respaldar que el producto que se pone a disposición de los clientes cumpla con los parámetros establecidos.

De este análisis se observan en general aproximados a los promedios obtenidos, con excepción del  $\text{SO}_3$  cuyos promedios y rangos de variación están más alejados y en el caso del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  supera el cuartil superior. Estas reflexiones permiten presumir que luego de las transformaciones realizadas a los valores atípicos se logra mayor concentración de valores hacia el promedio y menos variabilidad. (Tabla 1).

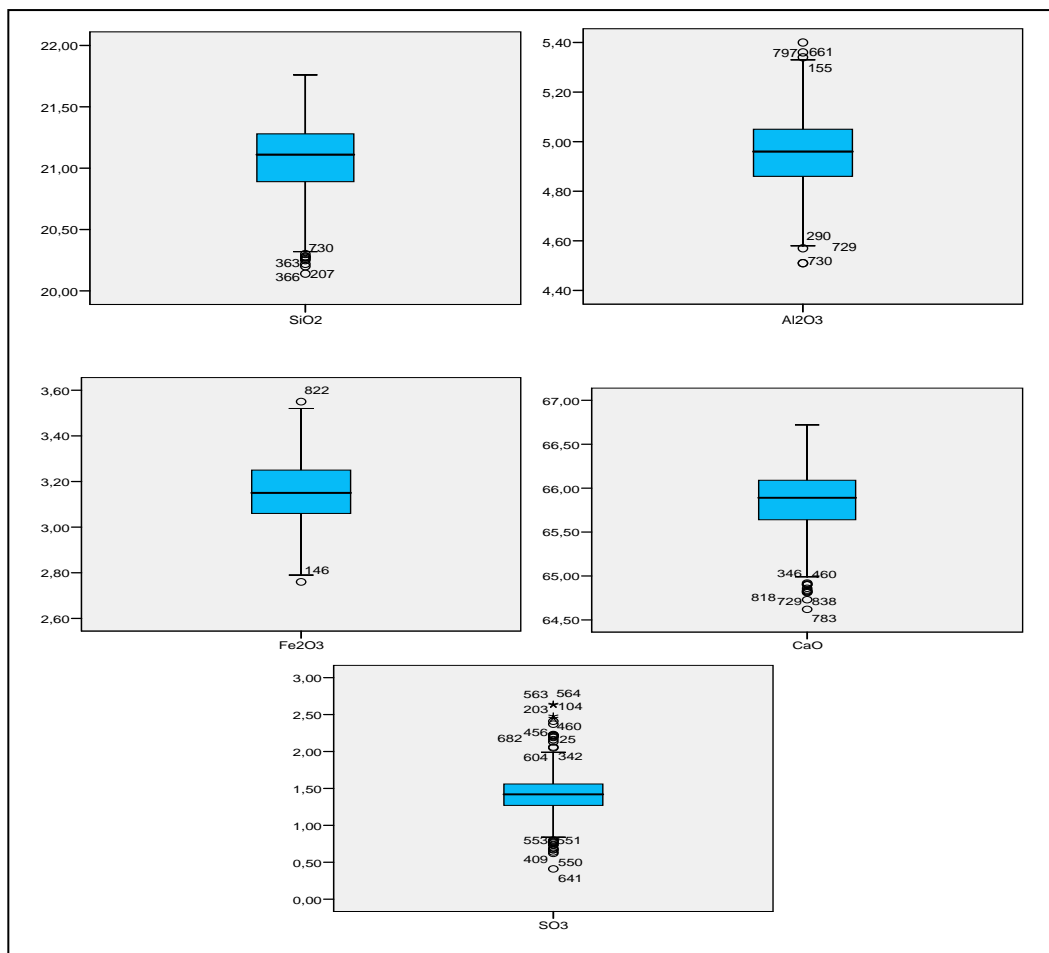


Figura 1. Análisis visual. Gráficos de caja correspondientes a los 5 óxidos del clínker. Considerando como variables dependientes las 4 fases en el clínker Alita (C3S), Belita (C2S), Celita (C3A) y Ferrita (C4AF) se muestra un resumen estadístico según los principales índices de localización y dispersión (tabla 2), los que serán útiles para la posterior verificación de supuestos.

Tabla 1. Resumen estadístico para los óxidos

| Óxidos                         | Valor típico establecido | Media Recortada 5% | Cuartil inferior | Cuartil superior | Rar Intercu: |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 20,9                     | 21,082             | 20,89            | 21,28            | 0,3          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,1                      | 4,95815            | 4,86             | 5,05             | 0,1          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,5                      | 3,15357            | 3,06             | 3,25             | 0,1          |
| CaO                            | 65                       | 65,8639            | 65,64            | 65,8             | 0,2          |

### Resultados de la Etapa 2. Obtención de las ecuaciones de ajuste.

La obtención de las ecuaciones de ajuste para las cuatro fases minerales del clínker se realizó por el método Paso a Paso que justifica el modelo final seleccionado.

### Verificación de los supuestos

La verificación de la normalidad en las variables dependientes se realizó por intermedio de la Prueba de Anderson-Darling, comprobándose este requisito según la contrastación de las probabilidades asintóticas correspondientes al estadígrafo las que son todas superiores al 5% (nivel de significación prefijado), la menor de ellas se obtuvo en la Ferrita ( $p=0,068$ ), además se comprobó mediante el análisis del sesgo y la curtosis estandarizadas mostradas con anterioridad.

Las correlaciones bivariadas por mediación del coeficiente de correlación de Pearson, no mostraron en su generalidad altas correlaciones, sin embargo, al realizar la Prueba T se pudo constatar que todas las correlaciones, aunque no sean tan altas ni tan fuertes, son significativas y ello es suficiente para encontrar ecuaciones ajustadas que permitan predecir el valor estimado de cada una de las fases del clínker en función de sus principales óxidos con un nivel de confianza del 95,0%.

**Tabla 2.** Resumen estadístico para las fases minerales del clínker

| Fases                        | Media Recortada 5% | Rango Intercuartílico | Sesgo Estándar | Curtosis Estándar |
|------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| C3S<br>ALITA                 | 66,06              | 1,95                  | -1,97          | 2,00              |
| C2SXRF<br>BELITA             | 10,60              | 1,90                  | -0,56          | 2,00              |
| C3A<br>CELITA                | 7,799              | 0,58                  | 0,83           | 0,90              |
| C <sub>4</sub> AF<br>FERRITA | 9,596              | 0,56                  | 1,46           | -0,74             |

#### Estimación de ecuaciones.

De los análisis de regresión según el método Paso a paso, de cada fase con los óxidos del clínker se obtienen en todos los casos altas correlaciones con coeficientes de determinación mayores que 0,97 lo que indica un buen ajuste, mientras con la Prueba de Regresión múltiple en los cuatro análisis para un 5% de significación prefijado y un valor P nulo, confirma la significación de las variables independientes. El cuadrado medio del error alcanzó en el último paso, (tabla 3) valores que demuestran la fortaleza de los ajustes obtenidos:

**Tabla 3.** Cuadrado Medio del Error (CME)

| Ecuaciones estimadas    | Estadístico Durbin-Watson | CME en el último paso |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Estimación para Alita   | 2,00566<br>(P=0,4560)     | CME = 0.00106142      |
| Estimación para Belita  | 2,03755<br>(P=0,2857)     | CME = 0.000932311     |
| Estimación para Celita  | 2,03126<br>(P=0,3187)     | CME = 0.0000950141    |
| Estimación para Ferrita | 2,00219<br>(P=0,4868)     | CME = 0.0000796885    |

Por su parte el Estadístico Durbin-Watson con ( $P > 0,05$ ) permite concluir que no existe autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Luego de halladas las ecuaciones para los porcentajes de las 4 fases (Alita, Belita, Celita y Ferrita) fueron sustituidas en estas, las ecuaciones ya validadas y además comprobada su capacidad de pronóstico por Álvarez, Cortés y Rodríguez [2], para predecir los porcentajes de los principales óxidos en el clínker conociendo los porcentajes de estos óxidos en la harina, que son las siguientes:

$$CaO = 61.642 + 0.097CaOH \quad (3)$$

$$SiO_2 = 18.791 + 0.171SiO_2H \quad (4)$$

$$SO_3 = 1.444 + 0.541SO_3H \quad (5)$$

$$Al_2O_3 = 2.162 + 0.908Al_2O_3H \quad (6)$$

$$Fe_2O_3 = 1.303 + 1.007Fe_2O_3H \quad (7)$$

Una síntesis de los resultados por pasos se comenta a continuación para cada fase.

#### Resultados para la fase C3S: (Alita). Ecuación final ajustada

La ecuación ajustada es la siguiente:

$$C3S = -0,302242 - 7,60342SiO_2 - 6,7157Al_2O_3 - 1,41809Fe_2O_3 + 4,07575CaO - 2,84388SO_3$$

Luego de sustituir (3), (4), (5), (6) y (7) en la ecuación ajustada se obtiene:

Ecuación final ajustada para estimar la fase C3S (ALITA)

$$C3S = 87,4606 - 1,3002SiO_2H - 6,09979AL_2O_3H - 1,4280Fe_2O_3H + 0,3952CaOH - 1,5401SO_3H$$

**Resultados para la fase C2S: (Belita). Ecuación final ajustada**

El modelo final se obtiene igualmente en 5 pasos. Las 5 variables independientes incorporadas mejoraron los coeficientes de ajuste en cada paso de un 59,83%, con la inclusión del óxido de mayor aporte ( $SiO_2$ ) en el paso 1, a un 99,98% en el paso 5. Las restantes variables fueron introducidas en el siguiente orden:  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SO_3$  y  $Fe_2O_3$ .

La ecuación ajustada es la siguiente:

$$C2S = 0,266552 + 8,60333SiO_2 + 5,06538AL_2O_3 + 1,0676Fe_2O_3 - 3,07523CaO + 2,14447SO_3$$

Luego de sustituir (3), (4), (5), (6) y (7) en la ecuación ajustada se obtiene:

**Ecuación final ajustada para estimar la fase C2S (BELITA)**

$$C2S = -12,192448 + 1,4712SiO_2H + 4,5994AL_2O_3H + 1,0751Fe_2O_3H - 0,2983CaOH + 1,1602SO_3H$$

**Resultados para la fase C3A: (Celita). Ecuación final ajustada**

El modelo final se obtiene en este caso en solo 2 pasos. Las 2 variables independientes incorporadas mejoraron los coeficientes de ajuste en cada paso de un 73,19% con la inclusión del óxido de mayor aporte ( $Al_2O_3$ ) en el paso 1, a un 99,95% en el paso 2 con la inclusión del  $Fe_2O_3$ .

La ecuación ajustada es la siguiente:

$$C3A = -0,0220653 + 2,65325AL_2O_3 - 1,69004Fe_2O_3$$

Luego de sustituir (6) y (7) en la ecuación ajustada se obtiene:

**Ecuación final ajustada para estimar la fase C3A (CELITA)**

$$C3A = 3,5121347 + 2,4092AL_2O_3H - 1,7019Fe_2O_3H$$

**Resultados para la fase C4AF: (Ferrita). Ecuación final ajustada**

En el caso de la estimación de la Ferrita solamente resultó significativo el óxido  $Fe_2O_3$  con el que se logró un ajuste de 99,9% para describir la relación entre las fases C4AF y las 5 variables independientes.

La ecuación ajustada es la siguiente:

$$C4AF = 0,00190878 + 3,042237Fe_2O_3$$

Luego de sustituir (3.5) en la ecuación ajustada se obtiene:

**Ecuación final ajustada para estimar la fase C4AF (FERRITA)**

$$C4AF = 3,9661 + 3,0637Fe_2O_3H$$

La valoración del ajuste de los modelos obtenidos se realiza de acuerdo con las especificaciones del procedimiento propuesto, teniendo en cuenta, los resultados de la Prueba de la Regresión Múltiple para contrastar los coeficientes de las variables independientes, la Prueba estadística de Durbin-Watson para conocer la posible presencia de autocorrelación en los de residuos y por último la interpretación de los coeficientes de determinación  $R^2$  y  $R^2$  modificado.

**Análisis comparativo**

El ajuste obtenido para las ecuaciones predictoras de las fases mineralógicas del clínker en todos los casos, ( $R^2 > 0,98$ ) supera el ajuste obtenido por Álvarez, Cortés y Moreira [1]. Igualmente fue satisfactorio el análisis de los residuos de los modelos con promedios casi nulos. En la tabla 4 se contrastan los porcentajes promedios de acuerdo con las ecuaciones finales obtenidas y sus intervalos de confianza, con los intervalos establecidos para garantizar las exigencias de los clientes.

Según puede observarse en cada caso los intervalos de confianza obtenidos al 95% para las estimaciones promedio, tanto en las ecuaciones para estimar los porcentajes de los principales óxidos como las correspondientes a las cuatro fases, están contenidos en el intervalo que precisa las especificaciones del cliente, adicionalmente los errores estándar que acompañan a la estimación puntual de las medias, son significativamente bajos por lo que puede concluirse que las ecuaciones estimadas garantizan los requisitos del cliente.

Adicionalmente se seleccionó una muestra de 101 observaciones correspondientes al mes de enero del 2020, con el objetivo de evaluar dichos valores en las ecuaciones obtenidas por Álvarez, Cortés y Moreira [1] y los obtenidos en la investigación actual. Ambos valores se contrastan con el valor ideal establecido para la fabricación del clínker en CCSA. Dichos resultados se muestran en la tabla 5.

**Tabla 4.** Intervalos de confianza del 95.0%

| Ecuaciones<br>obtenidas<br>(Óxidos y Fases) | Intervalo de confianza para la estimación promedio |                 | Intervalos que garantizan<br>los requisitos del cliente |                    |      |      |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|--------------------|------|------|
|                                             | Media                                              | Error Estándar. | Límite<br>Inferior                                      | Límite<br>Superior |      |      |
|                                             |                                                    |                 | Límite Inferior                                         | Límite Superior    |      |      |
| SiO <sub>2</sub>                            | 21.0745                                            | 0.00969705      | 21.0014                                                 | 21.0935            | 20,3 | 21,3 |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 4.95782                                            | 0.00462742      | 4.94875                                                 | 4.98966            | 4,5  | 6,1  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 3.1544                                             | 0.004466        | 3.14565                                                 | 3.16315            | 2,4  | 4,5  |
| CaO                                         | 65.8536                                            | 0.0114978       | 65.831                                                  | 65.8761            | 64,4 | 66,7 |
| SO <sub>3</sub>                             | 1.42619                                            | 0.00833474      | 1.40986                                                 | 1.44253            | 1    | 2    |
| C <sub>3</sub> S                            | 66.0379                                            | 0.0792222       | 65.8827                                                 | 66.1932            | 58   | 68   |
| C <sub>2</sub> S                            | 10.6016                                            | 0.07861         | 10.4476                                                 | 10.7557            | 9    | 14   |
| C <sub>3</sub> A                            | 7.8012                                             | 0.0145857       | 7.77261                                                 | 7.82979            | 5    | 12   |
| C <sub>4</sub> AF                           | 9.59877                                            | 0.0135905       | 9.57213                                                 | 9.6254             | 9    | 13   |

Los valores promedios obtenidos en la presente investigación son más cercanos al valor típico establecido para esta cementera y aunque las diferencias entre ambos resultados son discretas, a los efectos de la investigación es una diferencia a tener en cuenta por cuanto representa el por ciento en que las ecuaciones obtenidas en la presente investigación mejoran la calidad del clínker y a su vez la cantidad de toneladas de clínker producido, además de influir en factores internos y externos de la planta tales como:

#### Internos

**Tabla 5.** Valores obtenidos para cada fase y sus valores típicos.

| Fases             | Valores obtenidos<br>Investigación anterior | Valores obtenidos<br>Investigación actual | Típico de CCSA |
|-------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|
| C <sub>3</sub> S  | 64,8247882                                  | 64,6815427                                | 63             |
| C <sub>2</sub> S  | 11,4412043                                  | 11,4496109                                | 12             |
| C <sub>3</sub> A  | 7,85071744                                  | 7,85133401                                | 8              |
| C <sub>4</sub> AF | 9,8136188                                   | 9,81914567                                | 11             |

- ✓ Disminución de la carga contaminante.
- ✓ Eficiencia en la operación sobre bases más seguras, cumplimiento de los requisitos legales y licencias ambientales.
- ✓ Mayor orientación hacia los objetivos y estrategia de la empresa.
- ✓ Disminución de los costos ambientales (Racionalidad Ambiental ALARA)

#### Externos

- ✓ Proceso competitivo.
- ✓ Evidencia de las capacidades de la organización frente a clientes actuales y potenciales.
- ✓ Eliminación o disminución de quejas y reclamaciones.
- ✓ Certificación y reconocimiento.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos constituyen una importante aplicación de la matemática aplicada a un problema real con un aporte práctico significativo para en Cementos Cienfuegos S.A. Las cuatro ecuaciones de regresión lineal estimadas para los porcentajes en las fases minerales del clínker, a partir de las propuestas con anterioridad en CCSA, mejoran el ajuste obtenido hasta el momento con las ecuaciones de Bogue y cumplen con los requerimientos de calidad, por lo que son las recomendadas para esta cementera. Al ofrecer coeficientes propios para CCSA facilitan la estabilidad en las operaciones del horno a la vez que contribuyen a la obtención de mejoras en términos de eficiencia en la producción de clínker sobre bases más seguras, con un ahorro de materias primas, portadores energéticos, y la disminución de las emisiones de contaminante a la atmósfera, contribuyendo al desarrollo sostenible en la producción de cemento.

**RECEIVED: JULY, 2020.**  
**REVISED: OCTOBER, 2020.**

## REFERENCIAS

- [1] ÁLVAREZ, C.A., CORTÉS, M.E., Y MOREIRA, M. (2017). Método para determinar las fases minerales del clínker y su influencia en reducir los daños al medio ambiente. **Universidad y Sociedad**, **9**, 293-300.
- [2] ÁLVAREZ, C.A., CORTÉS, M.E., Y RODRÍGUEZ, Y. (2019). Ecuaciones para predecir los porcentajes de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO<sub>3</sub> y SO<sub>3</sub> en el clínker. **Universidad y Sociedad**, **11**, 147-153.
- [3] CALDERÓN, F.(1997): **Resumen de microscopía de clínker en Medellín**. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- [4] CÁMARA, J. R.(1988): Análise microscopica de clínker: **Boletín Informativo de Microscopía**. Sao Paulo.
- [5] CONDEZO, E. (2017). Modelamiento termodinámico del proceso de clínkerización en una planta de producción de cemento a partir de un análisis basado en balances de masa y energía. Trabajo de conclusión de curso. Repositorio Institucional. Universidad Federal de Integración Latinoamericana. Disponible en: <https://dspace.unila.edu.br/123456789/3108> . Consultado 13-7,2020.
- [6] FREIXA, M. (1992): **Análisis exploratorio de datos: Nuevas técnicas estadísticas**. PPU, S.A, Barcelona.
- [7] GARCÍA-MÁRQUEZ, J. M., ANTON, N., GAMBOA, R., MARTÍNEZ, M.A. Y VELAZCO, F. (2003). Automatic quantification of phases and mechanical characterization of materials base don Portland clínker modified with silica and alumina additions. **Journal of Materials Processing Technology**, 4, 286-289.
- [8] GLASSER, F. (2007). The burning of Portland cement. En: **Lea´s chemistry of cement and concrete**, Hewlett, P., Martin, L. 195 – 240. Arnold, London.
- [9] GUJARATI, D. N. (2013): **Econometría**. McGraw-Hill, Mexico.
- [10] HARREL, F. Jr.(2015): **Regresión modeling Strategies**. Springer Series in Statistics, Berlin.
- [11] HOLDERBANK, C. (1975). Química y mineralogía de las materias primas del cemento: Influencia de las propiedades de las materias primas en el proceso de fabricación del cemento. **Curso del Cemento. Lección 2**. Bogotá.
- [12] TOBÓN, J. I. Y LÓPEZ, F. (2007). Replanteamiento de las ecuaciones de Bogue en el cálculo mineralógico del clínker para una cementera colombiana. **Dyna**, 153, 53-60.
- [13] VALLE, D. E. (2018). **Modelo de regresión lineal multivariado aplicado a la relación entre variables químicas del clínker y variables físicas del cemento**. Tesis de maestría. San Carlos De Guatemala. Disponible en: <https://postgrado.ingeniería.usac.edu.gt>. Consultado 18-9,2019.
- [14] WALPOLE, R.E., Myers, R.H., Y Myers, S.L. (2008). **Probabilidad y estadística para ingenieros**. Parte II. 6<sup>th</sup> Edición. Editorial Félix Varela, La Habana.