Diseño experimental para la mezcla 3, Areniscas de la Formación La Luna Superior (Afluente quebrada la Sorda AQS, estación 1)

Paso 1: Aleatorización de tratamientos o corridas

Los resultados obtenidos en el desarrollo experimental no replicado para la mezcla 3, se muestran a continuación, y se presentan por orden de corrida experimental. Cumpliendo con la aleatorización de las corridas experimentales, definidas de forma automática por el software estadístico Minitab.

Orden de corrida de los tratamientos

Orden Corrida	Tamaño (µm)	Temperatura (℃)	Concentración Amoniaco (%)	Tiempo
1	250	25	15	7
2	2000	25	15	9
3	250	40	15	6
4	2000	40	15	7
5	250	25	30	7
6	2000	25	30	8
7	**250**	**40**	**30**	**5**
8	**2000**	**40**	**30**	**5**

Paso 2: Análisis de Varianza

Identificación de efectos

Identificación de efectos

Término	**Efecto**
Constante	
Tamaño (µm)	1,0000
Temperatura (℃)	-2,000
Concentración Amoniaco (%)	-1,0000
Tamaño (µm)* Temperatura (℃)	-0,5000
Tamaño (µm)* Concentración Amoniaco (%)	-0,5000
Temperatura (℃)* Concentración Amoniaco (%)	-0,5000
Tamaño (µm)* Temperatura (℃)* Concentración Amoniaco (%)	0,000000

De acuerdo con la tabla de identificación de efectos, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tamaño tiene un efecto positivo sobre la variable respuesta, esto quiere decir que el incremento del factor tamaño mueve hacia arriba el tiempo de

preparación de la muestra. Por lo tanto, para un tamaño de 2000 micras se espera que el tiempo de preparación sea mayor que para una muestra de tamaño de partícula de 250 micras.

- La temperatura es el factor que tiene más efecto o influencia sobre la variable respuesta, el aumento de factor temperatura mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. Es decir que para una temperatura de 40 el tiempo de preparación sería menor en comparación con una temperatura de 25.

- el incremento de la concentración mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. De esta manera se espera que para concentraciones de 30% de amoniaco el tiempo de preparación sea menor que para concentraciones de 15% de amoniaco.

Diagrama de Pareto

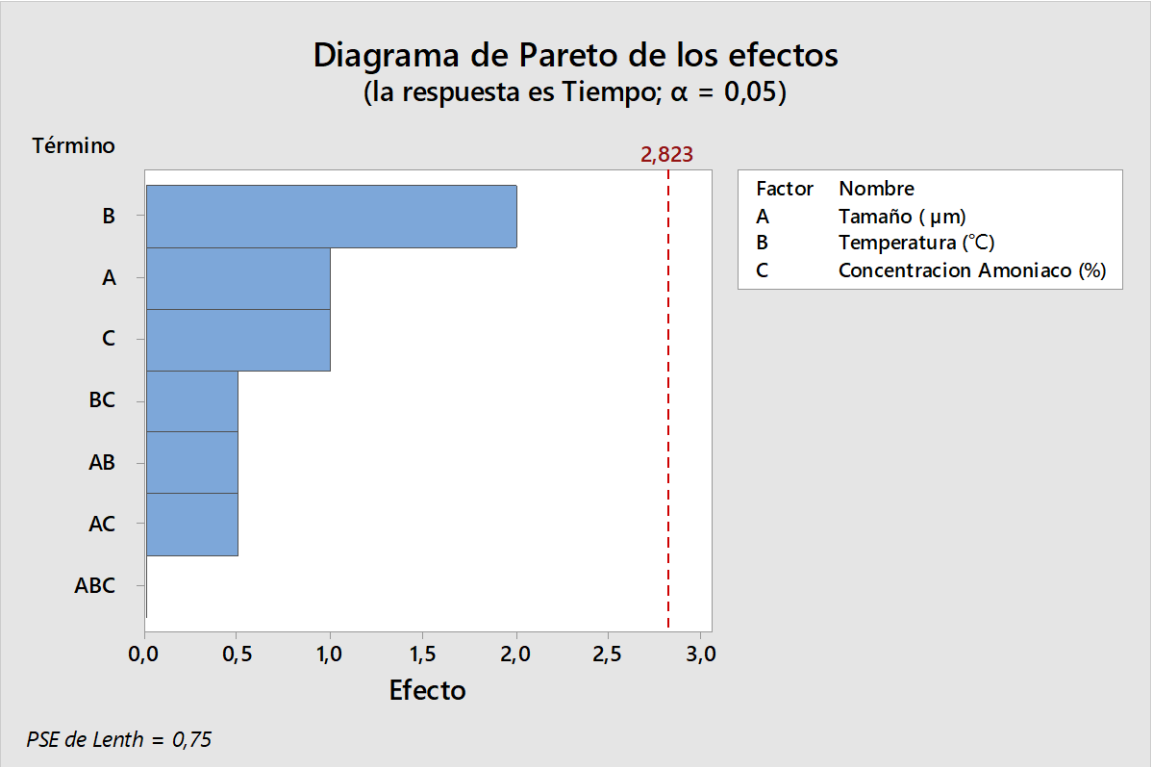


Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

De acuerdo con el Diagrama de Pareto, no se puede tener una confianza del 95% de que alguno de los factores o las interacciones entre los factores tengan un efecto significativo sobre el tiempo de preparación de la muestra.

Paso 3: Verificación del modelo

Como desde el punto de vista de significancia estadística ninguno de los factores o interacciones representa importancia relevante sobre la variable respuesta, se procede a realizar una reducción de términos del modelo, para identificar si alguno de los factores o interacciones toma más importancia. De acuerdo con el diagrama de Pareto, y la tabla de efectos se pueden eliminar las interacciones de dos y tres términos.

Redefiniendo el modelo, se obtendrían los siguientes resultados:

Diagrama de Pareto

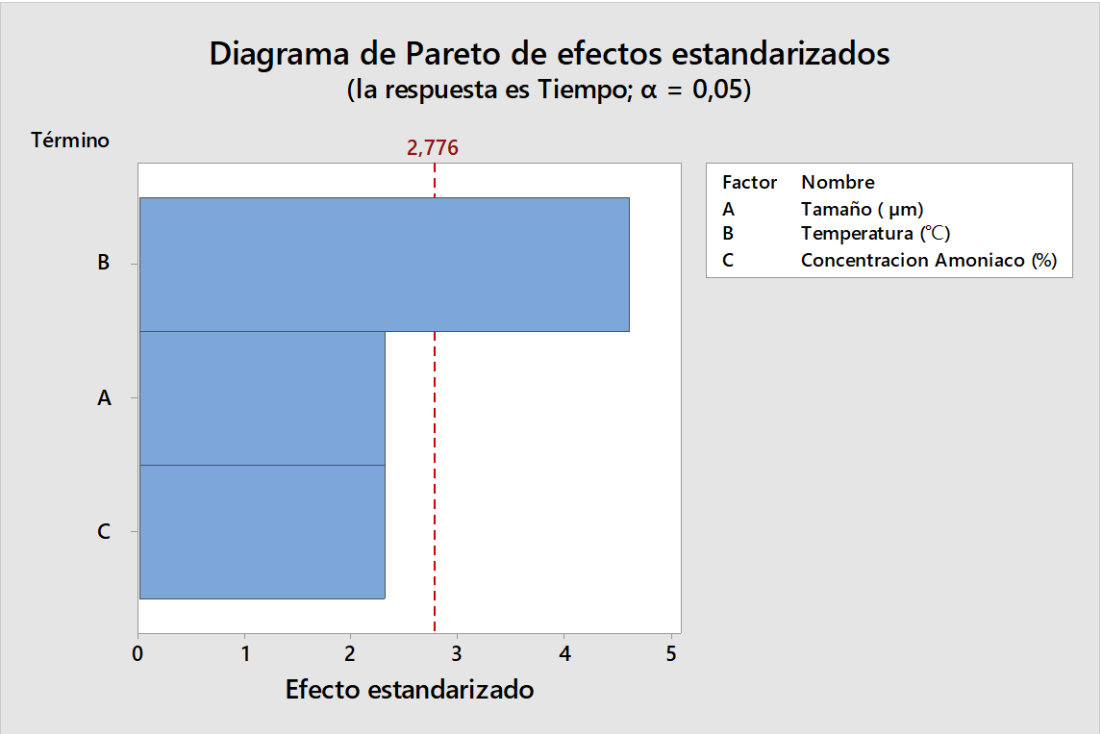


Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

Según el diagrama de Pareto, el efecto más significativo sobre la variable respuesta con un 95% de confiabilidad, está regido por la temperatura. A diferencia del modelo anterior el factor tamaño y concentración se encuentran más cercanos a la línea de referencia de significancia estadística sobre la variable respuesta.

Análisis de varianza

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados ajustado.	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Modelo	12,000	4,0000	10,67	0,022
Lineal	12,000	4,0000	10,67	0,022
Tamaño (µm)	2,000	2,0000	5,33	0,082
Temperatura (℃)	8,000	8,0000	21,33	0,010
Concentración Amoniaco (%)	2,000	2,0000	5,33	0,082
Error	1,500	0,3750		
Total	13,500			

De acuerdo con la tabla de Análisis de varianza se pueden hacer las siguientes observaciones:

- A partir de la suma de cuadrados, se puede calcular la contribución porcentual de cada uno de los términos del modelo. Con frecuencia la contribución porcentual es un buen parámetro para identificar la importancia de cada uno de los términos del modelo. En este caso se puede observar que el factor temperatura rige el proceso, ya que explica el 59.23% de la variabilidad total del tiempo de preparación. Mientras el tamaño y la concentración explican el 29.63%

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura es el factor que tiene efecto significativo sobre la variable respuesta (tiempo). Mientras el tamaño y la concentración con un Valor P de 0.082 muy cercano a 0.05, indica que existe un ligero efecto de estos factores sobre la variable respuesta.

Identificación de efectos

Tabla de efectos

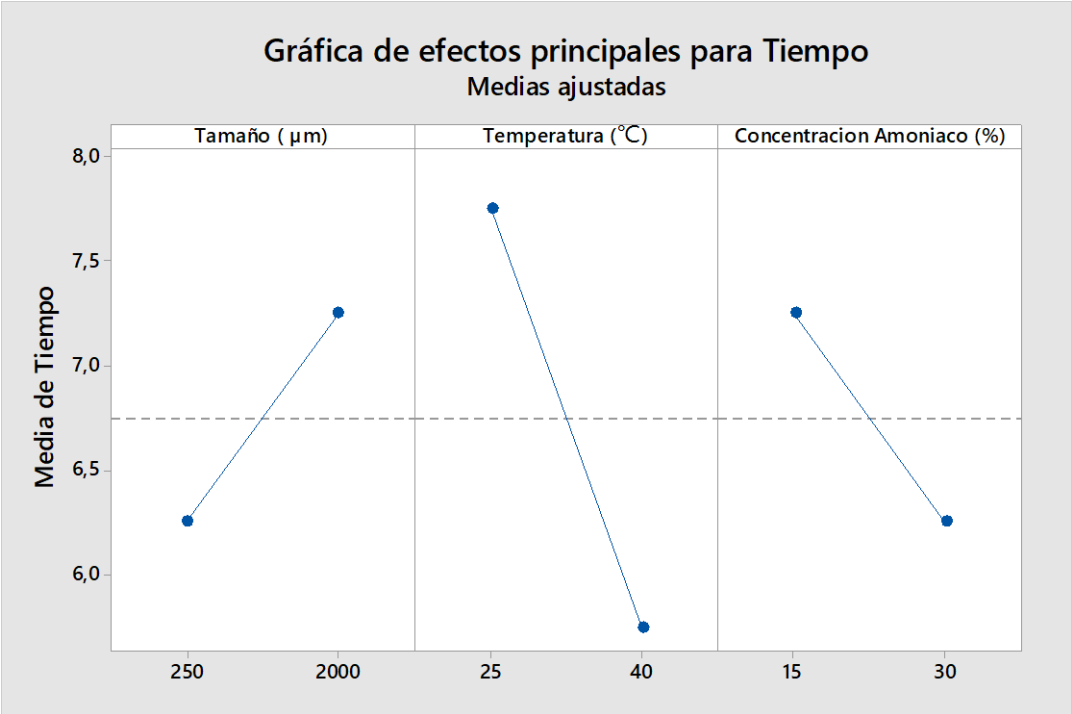
Término	Efecto	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor P
Constante		6,750	0,217	31,18	0,000
Tamaño (µm)	1,000	0,500	0,217	2,31	0,082
Temperatura (℃)	-2,000	-1,000	0,217	-4,62	0,010
Concentración Amoniaco (%)	-1,000	-0,500	0,217	-2,31	0,082

Por medio del estadístico R^2 de predicción, se indica con qué porcentaje el modelo explica la variabilidad de los datos nuevos. Esto quiere decir que con los términos del modelo actual se tiene un R^2 de predicción del 55,56%. Por lo tanto, se podría tener un 44.44% de error en la predicción del tiempo de preparación.

. R^2 de predicción

R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predicción)
88,89%	80,56%	55,56%

Paso 4: Gráficas de efectos principales de los factores.



Gráfica de efectos principales para Tiempo

De acuerdo con la gráfica de efectos principales, el factor que causa mayor diferencia en la variable respuesta es la temperatura, disminuyendo el tiempo de preparación para una temperatura de 40. Por su parte el tamaño y la concentración de amoniaco presentan igual efecto sobre la variable respuesta. El tiempo de preparación disminuye con tamaños de partícula de 250 micras y con concentraciones de 30%.

Paso 6: Ecuación de predicción

A continuación, se establece la ecuación de predicción, para muestras similares a la mezcla 3, que corresponden a muestras tipo Areniscas de la formación La Luna Superior.

Tiempo = 11,94 + 0,000571 Tamaño (µm) - 0,1333 Temperatura (℃)
- 0,0667 Concentración Amoniaco (%)

De acuerdo con la ecuación de predicción para el tiempo de preparación, se obtienen los siguientes datos:

Intervalo de confianza para el tiempo

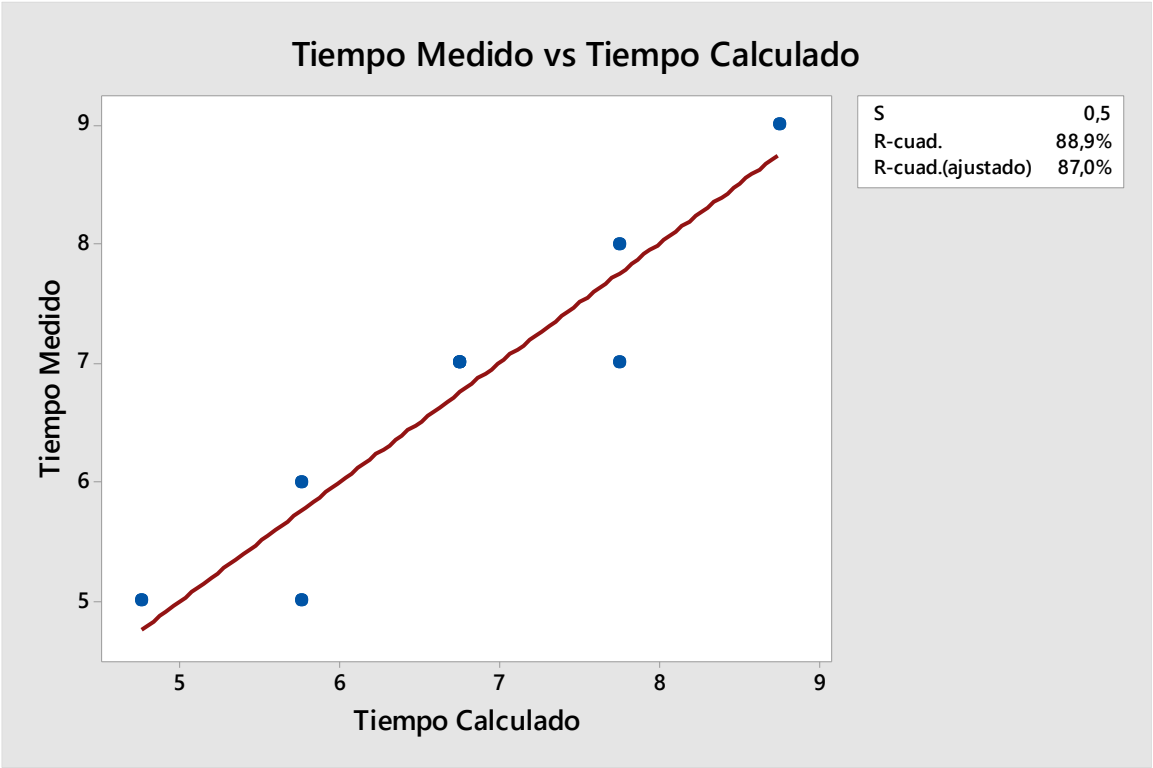
Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo	Tiempo predicción	Confianza inferior	Confianza superior	Predicción inferior	Predicción superior
250	25	15	7	7,75	6,54776	8,95224	5,66767	9,8323
2000	25	15	9	8,75	7,54776	9,95224	6,66767	10,8323
250	40	15	6	5,75	4,54776	6,95224	3,66767	7,8323
2000	40	15	7	6,75	5,54776	7,95224	4,66767	8,8323
250	25	30	7	6,75	5,54776	7,95224	4,66767	8,8323
2000	25	30	8	7,75	6,54776	8,95224	5,66767	9,8323
250	40	30	5	4,75	3,54776	5,95224	2,66767	6,8323
2000	40	30	5	5,75	4,54776	6,95224	3,66767	7,8323

Los límites de confianza, superior e inferior, indican el intervalo de confianza con un nivel de 95%, esto quiere decir que se tiene la seguridad en un 95% de que el intervalo de confianza contiene los valores medios del tiempo de respuesta, para los factores y niveles involucrados en el modelo.

Por otro lado, los límites de predicción superior e inferior, indican el intervalo de predicción con un nivel de confianza del 95%, esto quiere que, para la generación de un nuevo ensayo, bajo las mismas condiciones se esperaría que el tiempo de preparación de la muestra caiga dentro del intervalo de predicción.

Es importante observar que, para este tipo de muestra, el tiempo de preparación no presenta una diferencia importante en función del tratamiento realizado. Debido a esto es que es más complejo determinar cuál o cuáles son los factores que rigen el proceso.

En la siguiente grafica se puede observar el ajuste entre los tiempos medidos, es decir los tiempos reales tomados en el laboratorio versus los tiempos de predicción o tiempos calculados generados a partir de la ecuación de predicción para el tiempo.

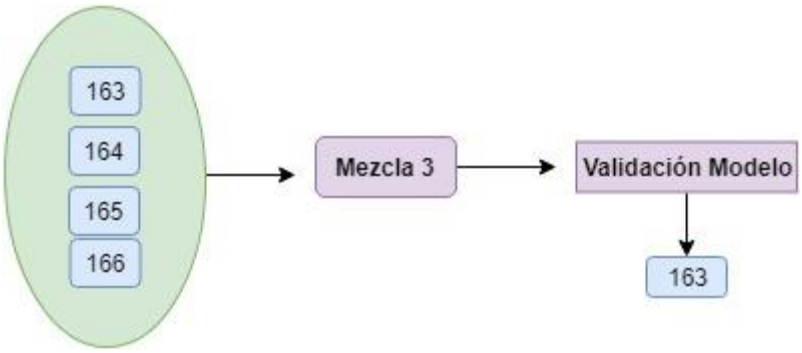


Tiempo medido vs Tiempo calculado

Según la gráfica se puede observar un buen ajuste entre los valores medidos, y los valores calculados a partir de la ecuación de predicción. Sin embargo, esto no es suficiente para validar el modelo, ya que se deben hacer nuevos ensayos para verificar la predicción del modelo en la generación de nuevos datos.

Paso 7: Validación del modelo

Para realizar la evaluación del ajuste del modelo planteado se realizó una prueba experimental. Es importante tener en cuenta que esta validación no se realiza exactamente con la misma muestra, es decir no se realiza con la mezcla 3, esto se debe a que en la práctica no se estudian mezclas sino muestras particulares para el estudio de palinofacies. Es importante recordar que la mezcla se realizó a partir de muestras similares de una zona de la Formación La Luna Superior. Esto quiere decir que la muestra para la validación del modelo generado, se realiza a partir de una muestra que hace parte de la mezcla 3.



Muestras para validación del modelo de la mezcla 3

. Validación modelo de la mezcla 3

Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo Medido	Tiempo Calculado	Intervalo de predicción	% de Error
2000	40	30	8	5,75	3,66767 - 7,8323	39.13

R^2 de predicción: 55,56%

A partir de la tabla anterior, se observa que es posible calcular el tiempo de preparación de una muestra de Arenisca de la formación La Luna Superior, mediante el modelo obtenido. En la prueba de validación se obtuvo un porcentaje de error del 39.13%, que se ubica por debajo del porcentaje de error del R^2 de predicción que es del 44.44%, y además el tiempo medido se ubica en el límite superior del intervalo de predicción.

Resumen Diseño Experimental para Areniscas, de la Formación La Luna Superior.

Resumen Diseño Experimental para Areniscas, de la Formación La Luna Superior.

		Contribución porcentual	Valor P	Efecto	Nivel óptimo del factor
Factores	Concentración Amoniaco (%)	14.81	0.082	-0.5	30
	Temperatura (℃)	59.23	0.010	-1	40
	Tamaño (µm)	14.81	0.082	0.5	250
Ecuación Predicción	Tiempo = 11,94 + 0,000571 Tamaño (µm) - 0,1333 Temperatura (℃) - 0,0667 Concentración Amoniaco (%)				
R^2 de Predicción	55,56%				
Validación	La validación se ajustó al modelo, error predicción modelo: 44.44, error validación: 39.13%				

De acuerdo con el resumen del diseño experimental se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Según la contribución porcentual calculada a partir de la suma de los cuadrados, los factores involucrados en el modelo explican el 88.85% de la variabilidad total. Siendo el termino más importante o influyente sobre la variable respuesta la temperatura.

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura es el factor que tiene efecto significativo sobre la variable respuesta (tiempo). Mientras el tamaño y la concentración con un Valor P de 0.082 muy cercano a 0.05, indica que existe un ligero efecto de estos factores sobre la variable respuesta.

- Con un ajuste de R^2 de predicción de 55,56% sugiere que existen otros factores que merecen ser tenidos en cuenta para trabajos futuros. También sugiere que se deben realizar replicas para ajustar los datos a un mejor modelo, que intervalos de predicción más pequeños y un porcentaje de predicción más elevado.

Con el objetivo de disminuir el tiempo de preparación, para Areniscas de la formación La Luna Superior, se destacan los siguientes escenarios:

Escenarios recomendados para la preparación

Escenario	**Tamaño**	**Temperatura**	**Concentración**	**Tiempo**
1	250	25	15	7
2	2000	25	15	9
3	250	40	30	5
4	2000	40	30	5

Los escenarios sugieren que no hay cambios significativos en el tiempo de preparación de las muestras. Usar el escenario 1 o 3 no evidencia un cambio del tiempo drástico, pero si evidencia un ahorro de energía y reactivos. Por otro lado, realizar un experimento en el escenario 4 con respecto al 2 sugiere un ahorro de tiempo del 44.44%

6.1.4 Diseño experimental para la mezcla 4, Calizas Carbonosas de la Formación La Luna Superior (Afluente quebrada la Sorda AQS, estación 2)

Paso 1: Aleatorización de tratamientos o corridas

Los resultados obtenidos en el desarrollo experimental no replicado para la mezcla 3, se muestran a continuación, y se presentan por orden de corrida experimental. Cumpliendo con la aleatorización de las corridas experimentales, definidas de forma automática por el software estadístico Minitab.

Orden de corrida de los tratamientos

Orden Corrida	Tamaño (µm)	Temperatura (℃)	Concentración Amoniaco (%)	Tiempo
1	250	25	15	8
2	2000	25	15	12
3	250	40	15	5
4	2000	40	15	7
5	250	25	30	6
6	2000	25	30	9
7	**250**	**40**	**30**	**3**
8	2000	40	30	6

Paso 2: Análisis de Varianza

Identificación de efectos

. Identificación de efectos

Término	Efecto
Constante	
Tamaño (µm)	3,000
Temperatura (℃)	-3,500
Concentración Amoniaco (%)	-2,000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃)	-0,5000
Tamaño (µm) *Concentración Amoniaco (%)	-0,000000
Temperatura (℃) *Concentración Amoniaco (%)	0,5000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃)* Concentración Amoniaco (%)	0,5000

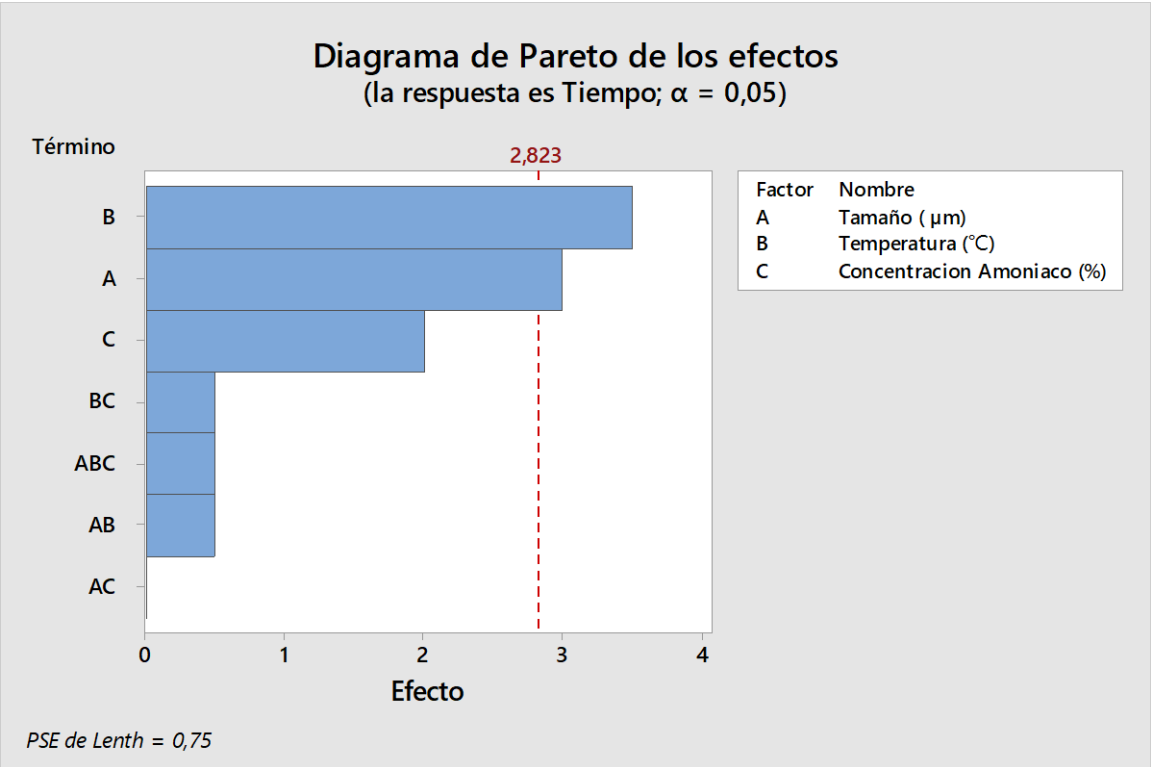
De acuerdo con la tabla de identificación de efectos, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tamaño tiene un efecto positivo sobre la variable respuesta, esto quiere decir que el incremento del factor tamaño mueve hacia arriba el tiempo de preparación de la muestra. Por lo tanto, para un tamaño de 2000 micras se espera que el tiempo de preparación sea mayor que para una muestra de tamaño de partícula de 250 micras.

- La temperatura es el factor que tiene más efecto o influencia sobre la variable respuesta, el aumento de factor temperatura mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. Es decir que para una temperatura de 40 el tiempo de preparación sería menor en comparación con una temperatura de 25.

- el incremento de la concentración mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. De esta manera se espera que para concentraciones de 30% de amoniaco el tiempo de preparación sea menor que para concentraciones de 15% de amoniaco.

Diagrama de Pareto



. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

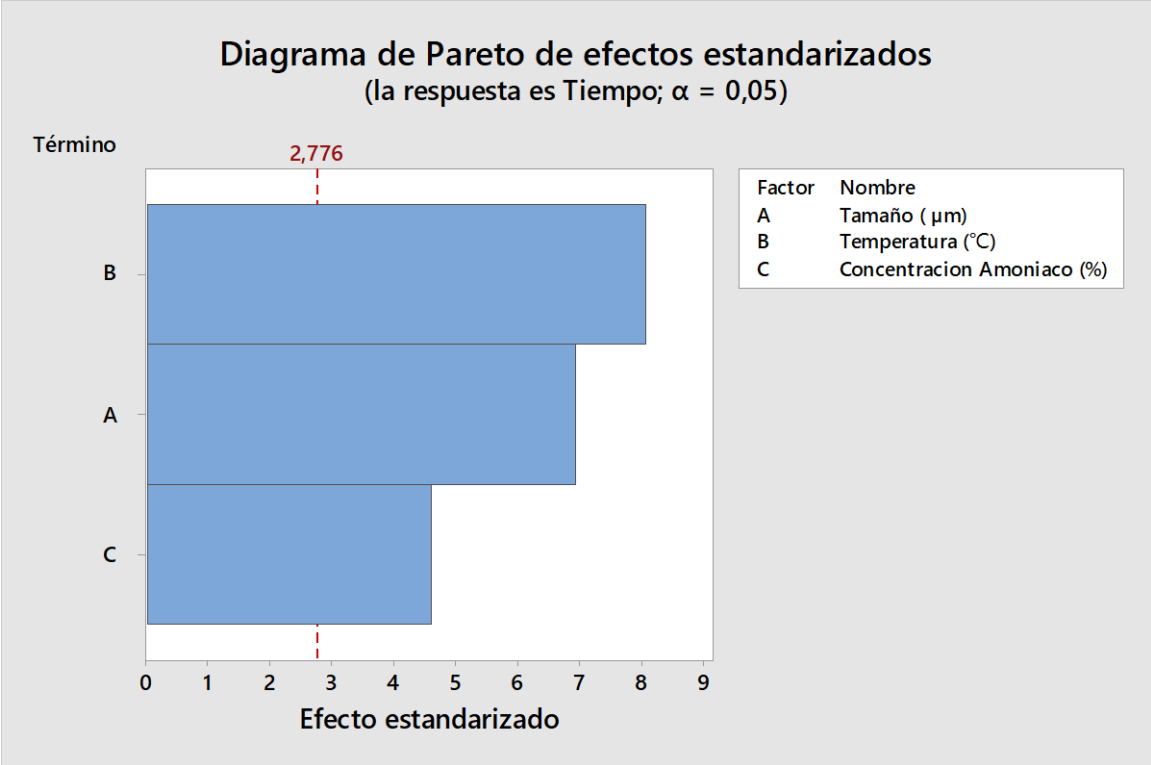
De acuerdo con el Diagrama de Pareto, se puede decir que con un 95% de confiabilidad los factores temperatura y tamaño tienen un efecto significativo sobre la variable respuesta. Sin embargo, las interacciones de dos y tres términos se encuentran muy alejados de la línea de referencia de significancia estadística. Por otro lado, la concentración se encuentra algo cercana a la línea de referencia.

Paso 3: Verificación del modelo

Como las interacciones se encuentran muy alejadas de la línea de referencia de significancia estadística, se procede a realizar una reducción de términos del modelo, dejando solo los factores sin ningún tipo de interacciones. De acuerdo con el diagrama de Pareto, y la tabla de efectos se pueden eliminar las interacciones de dos y tres términos.

Redefiniendo el modelo, se obtendrían los siguientes resultados:

Diagrama de Pareto



. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

De acuerdo con los términos del nuevo modelo, los factores tamaños, temperatura y concentración, con una confiabilidad del 95% tienen efectos significativos sobre el tiempo de preparación de la muestra. Siendo más importante el efecto de la temperatura, seguido del tamaño y la concentración de amoniaco.

Análisis de varianza

. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados ajustado.	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Modelo	50,500	16,8333	44,89	0,002
Lineal	50,500	16,8333	44,89	0,002
Tamaño (µm)	18,000	18,0000	48,00	0,002
Temperatura (℃)	24,500	24,5000	65,33	0,001
Concentración Amoniaco (%)	8,000	8,0000	21,33	0,010
Error	1,500	0,3750		
Total	52,000			

De acuerdo con la tabla de Análisis de varianza se pueden hacer las siguientes observaciones:

- A partir de la suma de cuadrados, se puede calcular la contribución porcentual de cada uno de los términos del modelo. Con frecuencia la contribución porcentual es un buen parámetro para identificar la importancia de cada uno de los términos del modelo. En este caso se puede observar que el factor temperatura tiene mayor incidencia en el proceso, ya que explica el 47.11% de la variabilidad total del tiempo de preparación. Mientras el tamaño explica el 34.6% y la concentración explica el 15.4%

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura, el tamaño y la concentración tienen efectos significativos sobre la variable respuesta (tiempo).

Identificación de efectos

. Tabla de efectos

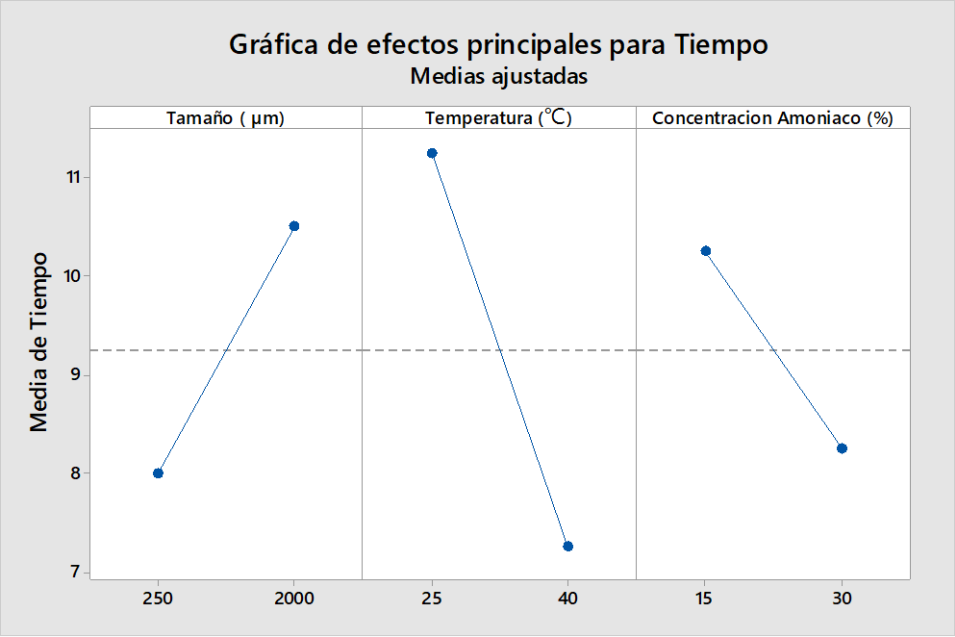
Término	Efecto	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor P	Término
Constante		7,000	0,217	32,33	0,000	
Tamaño (µm)	3,000	1,500	0,217	6,93	0,002	1,00
Temperatura (℃)	-3,500	-1,750	0,217	-8,08	0,001	1,00
Concentración Amoniaco (%)	-2,000	-1,000	0,217	-4,62	0,010	1,00

Por medio del estadístico R^2 de predicción, se indica con qué porcentaje el modelo explica la variabilidad de los datos nuevos. Esto quiere decir que con los términos del modelo actual se tiene un R^2 de predicción del 84,46%. Por lo tanto, se podría tener un 11,54% de error en la predicción del tiempo de preparación.

. R^2 de predicción

R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predicción)
97,12%	94,95%	88,46%

Paso 4: Gráficas de efectos principales de los factores.



Gráfica de efectos principales para Tiempo

De acuerdo con la gráfica de efectos principales, el factor que causa mayor diferencia en la variable respuesta es la temperatura, disminuyendo el tiempo de preparación para una temperatura de 40. Por su parte el tamaño es el segundo factor que más causa diferencias en los tiempos de preparación de las muestras, disminuyendo el tiempo de preparación hacia tamaños de 250 micras. Finalmente, la concentración de amoniaco disminuye el tiempo de preparación de las muestras, para concentraciones del 30%.

Paso 6: Ecuación de predicción

A continuación, se establece la ecuación de predicción, para muestras similares a la mezcla 4, que corresponden a muestras tipo Calizas Carbonosas de la formación La Luna Superior.

Tiempo = 15,65 + 0,001714 Tamaño (µm) - 0,2333 Temperatura (℃)
- 0,1333 Concentración Amoniaco (%)

De acuerdo con la ecuación de predicción para el tiempo de preparación, se obtienen los siguientes datos:

. Intervalo de confianza para el tiempo

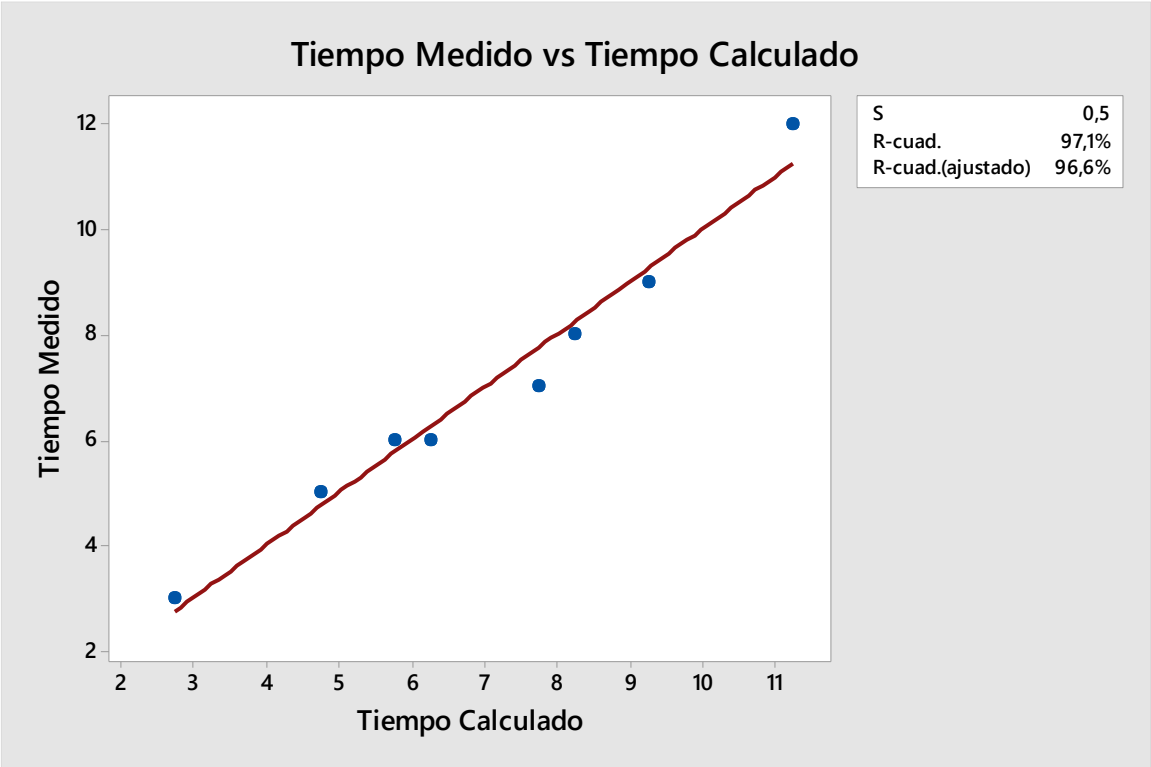
Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo	Tiempo predicción	Confianza inferior	Confianza superior	Predicción inferior	Predicción superior
250	25	15	8	8,25	7,0478	9,4522	6,16767	10,3323
2000	25	15	12	11,25	10,0478	12,4522	9,16767	13,3323
250	40	15	5	4,75	3,5478	5,9522	2,66767	6,8323
2000	40	15	7	7,75	6,5478	8,9522	5,66767	9,8323
250	25	30	6	6,25	5,0478	7,4522	4,16767	8,3323
2000	25	30	9	9,25	8,0478	10,4522	7,16767	11,3323
250	40	30	3	2,75	1,5478	3,9522	0,66767	4,8323
2000	40	30	6	5,75	4,5478	6,9522	3,66767	7,8323

Los límites de confianza, superior e inferior, indican el intervalo de confianza con un nivel de 95%, esto quiere decir que se tiene la seguridad en un 95% de que el intervalo de confianza contiene los valores medios del tiempo de respuesta, para los factores y niveles involucrados en el modelo.

Por otro lado, los límites de predicción superior e inferior, indican el intervalo de predicción con un nivel de confianza del 95%, esto quiere que, para la generación de un nuevo ensayo, bajo las mismas condiciones se esperaría que el tiempo de preparación de la muestra caiga dentro del intervalo de predicción.

Se puede observar que hay una disminución de tiempo importante a partir del aumento de la temperatura y de la concentración de amoniaco. Por ejemplo, para tamaños de 2000 micras y 250 micras con temperatura de 25 y concentración del 15% de amoniaco al comparar esta combinación con niveles de temperatura de 40 y 30%., se evidencia una disminución en el tiempo del 50% para tamaños de 2000 micras y del 62.5% para tamaños de 250 micras.

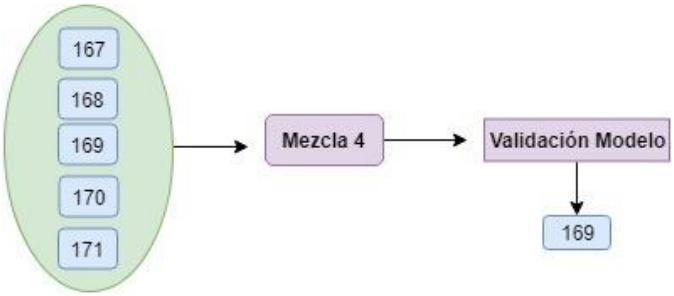
En la siguiente grafica se puede observar el ajuste entre los tiempos medidos, es decir los tiempos reales tomados en el laboratorio versus los tiempos de predicción o tiempos calculados generados a partir de la ecuación de predicción para el tiempo.



. Tiempo medido vs Tiempo calculado

Según la gráfica se puede observar un excelente ajuste entre los valores medidos, y los valores calculados a partir de la ecuación de predicción. Sin embargo, esto no es suficiente para validar el modelo, ya que se deben hacer nuevos ensayos para verificar la predicción del modelo en la generación de nuevos datos.

Paso 7: Validación del modelo



. Muestras para validación del modelo de la mezcla 4

. Validación modelo de la mezcla 4

Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo Medido	Tiempo Calculado	Intervalo de predicción	% de Error
2000	40	30	7	5,75	3,66767 - 7,8323	21,74%

R^2 de predicción: 88,46%

A partir de la tabla anterior, se observa que el tiempo medido se encuentra dentro del intervalo de predicción, sin embargo, al comparar el tiempo calculado con el tiempo medido, se observa un error del 21,74% por encima del porcentaje de error de R^2 de predicción que es del 11,54%. A pesar de estas diferencias el modelo es válido para calcular el tiempo de preparación de una Caliza Carbonosa de la Formación La Luna superior, ya que esta muestra no es exactamente la mezcla 4, sino una de las muestras que hace parte de la mezcla 4.

Resumen Diseño Experimental para Areniscas, de la Formación La Luna Superior.

Resumen Diseño Experimental para Areniscas, de la Formación La Luna Superior.

		Contribución porcentual	Valor P	Efecto	Nivel óptimo del factor
Factores	Concentración Amoniaco (%)	15.4	0.010	-2	30
	Temperatura (℃)	47.11	0.001	-1.750	40
	Tamaño (µm)	34.6	0.002	1.5	250
Ecuación Predicción					

	Tiempo = 15,65 + 0,001714 Tamaño (µm) - 0,2333 Temperatura (°C) - 0,1333 Concentración Amoniaco (%)
R^2 de Predicción	88,46%
Validación	La validación se ajustó parcialmente modelo, error predicción modelo: 11,54, error validación: 21,74%. El valor de tiempo medido se ubicó dentro del intervalo de predicción

De acuerdo con el resumen del diseño experimental se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Según la contribución porcentual calculada a partir de la suma de los cuadrados, los factores involucrados en el modelo explican el 97.11% de la variabilidad total. Siendo el termino más importante o influyente sobre la variable respuesta la temperatura.

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura, la concentración y el tamaño tienen efectos significativos sobre la variable respuesta (tiempo).

Con el objetivo de disminuir el tiempo de preparación, para Areniscas de la formación La Luna Superior, se destacan los siguientes escenarios:

. Escenarios recomendados para la preparación

Escenario	Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo
1	250	40	15	5
2	2000	40	15	7
3	250	40	30	3
4	2000	40	30	6

Se puede observar que la característica común entre los diferentes escenarios con el objetivo de disminuir el tiempo de preparación es operar a una temperatura de 40 grados.

6.1.5 Diseño experimental para la mezcla 5, Carbones de la Formación Umir Inferior (Quebrada la Sorda QS)

Paso 1: Aleatorización de tratamientos o corridas

Los resultados obtenidos en el desarrollo experimental no replicado para la mezcla 5, se muestran a continuación, y se presentan por orden de corrida experimental. Cumpliendo con la aleatorización de las corridas experimentales, definidas de forma automática por el software estadístico Minitab.

Orden de corrida de los tratamientos

Orden Corrida	Tamaño (µm)	Temperatura (℃)	Concentración Amoniaco (%)	Tiempo
1	250	25	15	35
2	2000	25	15	52
3	250	40	15	25
4	2000	40	15	35
5	250	25	30	35
6	2000	25	30	47
7	250	40	30	18
8	2000	40	30	31

Paso 2: Análisis de Varianza

Identificación de efectos

Identificación de efectos

Término	**Efecto**
Constante	
Tamaño (µm)	13,000
Temperatura (℃)	-15,000
Concentración Amoniaco (%)	-4,000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃)	-1,5000
Tamaño (µm) *Concentración Amoniaco (%)	-0,5000
Temperatura (℃) *Concentración Amoniaco (%)	-1,5000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃)* Concentración Amoniaco (%)	2,000

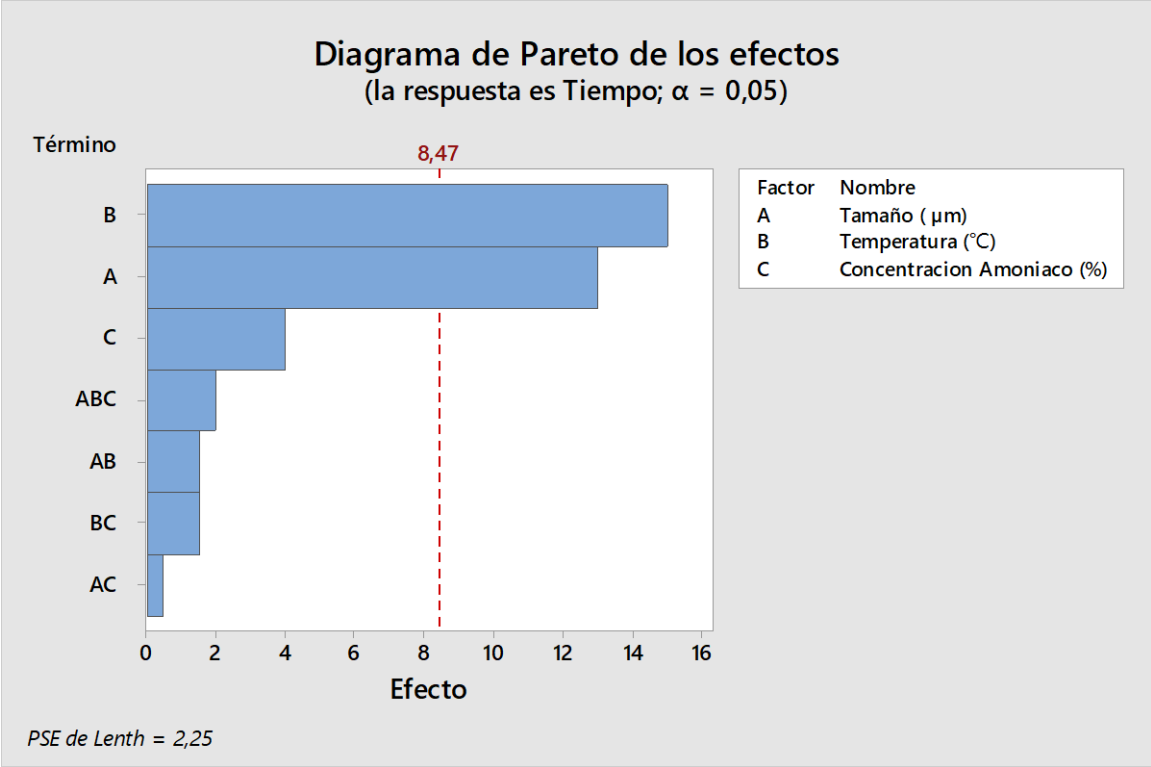
De acuerdo con la tabla de identificación de efectos, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tamaño tiene un efecto positivo sobre la variable respuesta, esto quiere decir que el incremento del factor tamaño mueve hacia arriba el tiempo de preparación de la muestra. Por lo tanto, para un tamaño de 2000 micras se espera que el tiempo de preparación sea mayor que para una muestra de tamaño de partícula de 250 micras.

- La temperatura es el factor que tiene más efecto o influencia sobre la variable respuesta, el aumento de factor temperatura mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. Es decir que para una temperatura de 40 el tiempo de preparación sería menor en comparación con una temperatura de 25.

- El incremento de la concentración mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. De esta manera se espera que para concentraciones de 30% de amoniaco el tiempo de preparación sea menor que para concentraciones de 15% de amoniaco.

Diagrama de Pareto



.

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

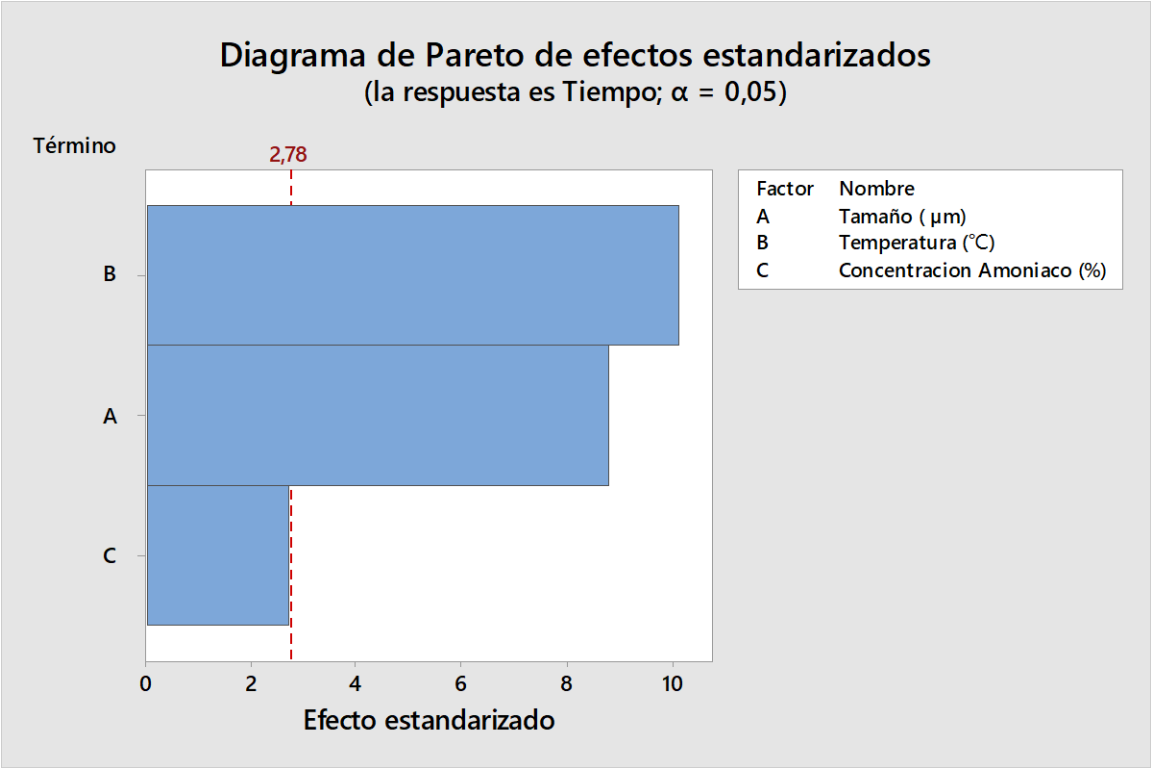
De acuerdo con el Diagrama de Pareto, se tiene un 95% de confiabilidad que la temperatura y el tamaño de partícula tienen un efecto significativo sobre el tiempo de preparación de la muestra. Mientras las interacciones de 2 y 3 términos se encuentran muy alejados de la línea de referencia de significancia estadística. Si bien la concentración se encuentra relativamente alejada de la línea de referencia, se puede considerar este término en la generación de un nuevo modelo, si en el nuevo modelo generado sigue siendo un factor alejado de la línea de referencia se podría eliminar.

Paso 3: Verificación del modelo

A partir del Diagrama de Pareto y de la tabla de identificación de efectos, se procede a realizar una reducción del modelo, eliminando la interacción entre factores.

Redefiniendo el modelo, se obtendrían los siguientes resultados:

Diagrama de Pareto



. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

Según el nuevo Diagrama de Pareto la temperatura y el tamaño siguen siendo factores que producen efectos significativos sobre la variable respuesta. En tanto la concentración de amoniaco a diferencia del anterior modelo, toma fuerza o significancia ubicándose en el límite de la línea de referencia, de acuerdo con esto, el factor concentración se tendrá en cuenta en el modelo definitivo.

Análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrados ajustado.	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Modelo	820,00	273,333	62,48	0,001
Lineal	820,00	273,333	62,48	0,001
Tamaño (µm)	338,00	338,000	77,26	0,001
Temperatura (°C)	450,00	450,000	102,86	0,001
Concentración Amoniaco (%)	32,00	32,000	7,31	0,054
Error	17,50	4,375		
Total	837,50			

De acuerdo con la tabla de Análisis de varianza se pueden hacer las siguientes observaciones:

- A partir de la suma de cuadrados, se puede calcular la contribución porcentual de cada uno de los términos del modelo. Con frecuencia la contribución porcentual es un buen parámetro para identificar la importancia de cada uno de los términos del modelo. En este caso se puede observar que el factor temperatura explica el 53.73% de la variabilidad total del tiempo de preparación, el tamaño explica el 40.46% y finalmente la concentración explica el 3.8%.

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura y el tamaño son factores que producen efectos significativos sobre la variable respuesta (tiempo). Mientras la concentración con un Valor P de 0.054 muy cercano a 0.05, indica que existe un ligero efecto de este factor sobre la variable respuesta.

Identificación de efectos

Tabla de efectos

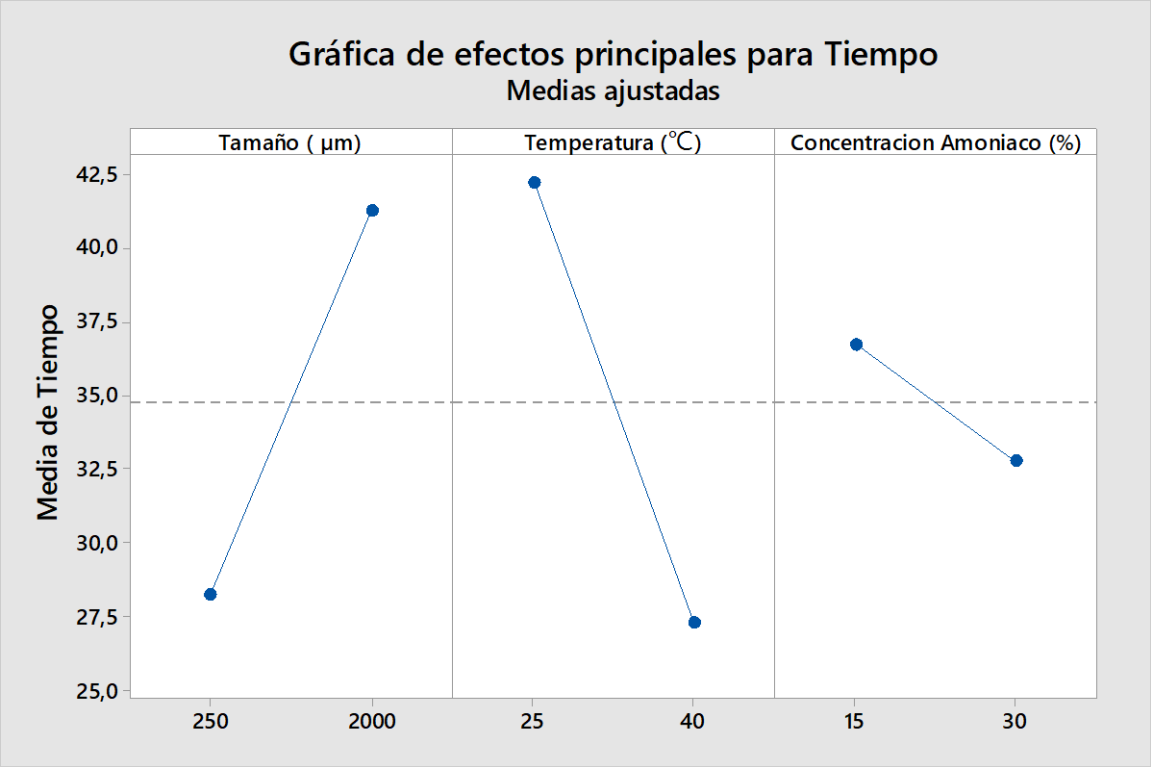
Término	Efecto	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor P
Constante		34,750	0,740	46,99	0,000
Tamaño (µm)	13,000	6,500	0,740	8,79	0,001
Temperatura (℃)	-15,000	-7,500	0,740	-10,14	0,001
Concentración Amoniaco (%)	-4,000	-2,000	0,740	-2,70	0,054

Por medio del estadístico R^2 de predicción, se indica con qué porcentaje el modelo explica la variabilidad de los datos nuevos. Esto quiere decir que con los términos del modelo actual se tiene un R^2 de predicción del 91,64%. Por lo tanto, se podría tener un 8,26% de error en la predicción del tiempo de preparación.

. R^2 de predicción

R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predicción)
97,91%	96,34%	91,64%

Paso 4: Gráficas de efectos principales de los factores.



Gráfica de efectos principales para Tiempo

De acuerdo con la gráfica de efectos principales, se puede observar que existen fuertes diferencias para el tiempo de preparación con respecto a la temperatura y concentración del proceso, disminuyendo el tiempo de preparación de forma significativa para temperaturas de 40 y tamaños de partícula de 250 micras. Por otro lado, el cambio de concentración de amoniaco no genera grandes diferencias en los tiempos de preparación.

Paso 6: Ecuación de predicción

A continuación, se establece la ecuación de predicción, para muestras similares a la mezcla 5, que corresponden a muestras tipo Carbón de la formación Umir Inferior.

Tiempo = 64,89 + 0,007429 Tamaño (µm) - 1,0000 Temperatura (°C)
- 0,2667 Concentración Amoniaco (%)

De acuerdo con la ecuación de predicción para el tiempo de preparación, se obtienen los siguientes datos:

Intervalo de confianza para el tiempo

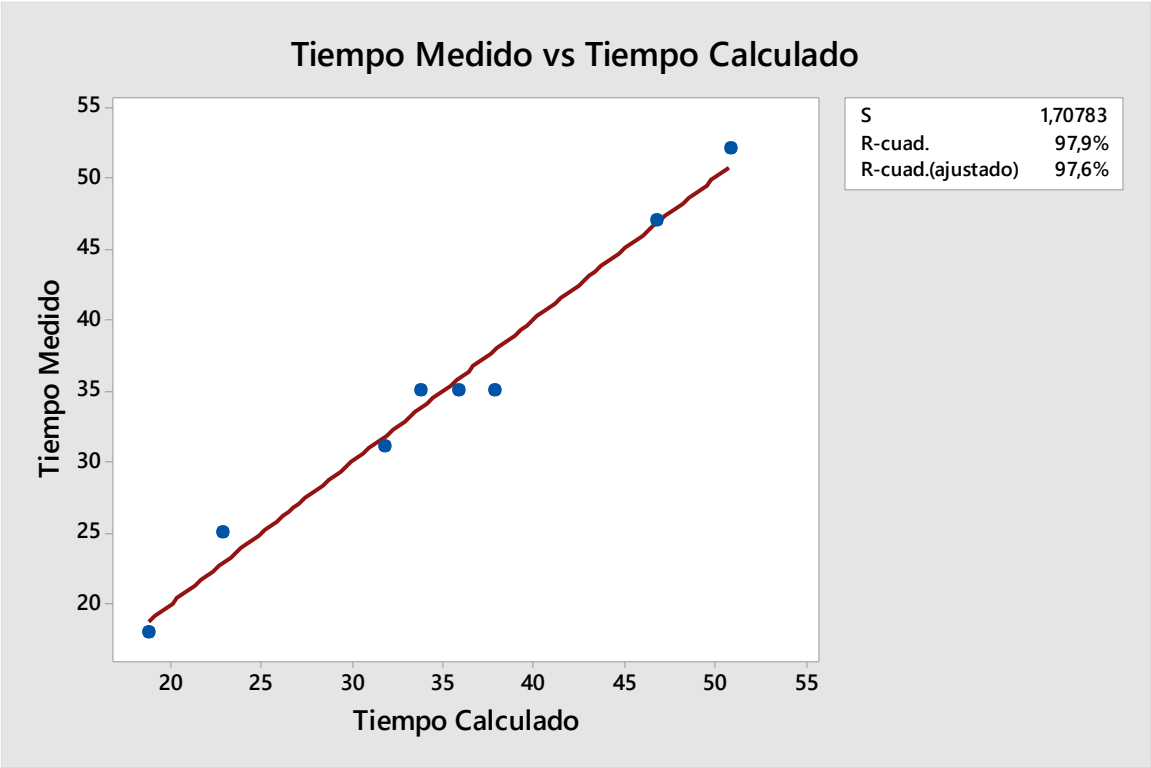
Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo	Tiempo predicción	Confianza inferior	Confianza superior	Predicción inferior	Predicción superior
250	25	15	35	37,75	33,6436	41,8564	30,6375	44,8625
2000	25	15	52	50,75	46,6436	54,8564	43,6375	57,8625
250	40	15	25	22,75	18,6436	26,8564	15,6375	29,8625
2000	40	15	35	35,75	31,6436	39,8564	28,6375	42,8625
250	25	30	35	33,75	29,6436	37,8564	26,6375	40,8625
2000	25	30	47	46,75	42,6436	50,8564	39,6375	53,8625
250	40	30	18	18,75	14,6436	22,8564	11,6375	25,8625
2000	40	30	31	31,75	27,6436	35,8564	24,6375	38,8625

Los límites de confianza, superior e inferior, indican el intervalo de confianza con un nivel de 95%, esto quiere decir que se tiene la seguridad en un 95% de que el intervalo de confianza contiene los valores medios del tiempo de respuesta, para los factores y niveles involucrados en el modelo.

Por otro lado, los límites de predicción superior e inferior, indican el intervalo de predicción con un nivel de confianza del 95%, esto quiere que, para la generación de un nuevo ensayo, bajo las mismas condiciones se esperaría que el tiempo de preparación de la muestra caiga dentro del intervalo de predicción. Sin embargo, el intervalo de predicción es demasiado grande debido a que se tiene poca información con una fuerte desviación en los tiempos, lo que sugiere que para ensayo sería apropiado realizar una réplica con el objetivo de disminuir los intervalos de predicción. Por lo tanto, en este caso es más confiable el R^2 de predicción que en el intervalo de predicción.

En el diseño experimental de esta muestra se puede observar que existen grandes diferencias del tiempo de preparación de la muestra en función de cada uno de las combinaciones realizadas, la mayor diferencia se encuentra al pasar de 52 días, a 18 días.

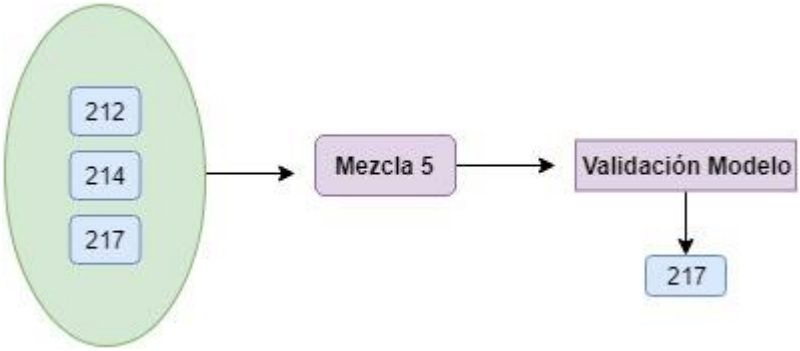
En la siguiente grafica se puede observar el ajuste entre los tiempos medidos, es decir los tiempos reales tomados en el laboratorio versus los tiempos de predicción o tiempos calculados generados a partir de la ecuación de predicción para el tiempo.



Tiempo medido vs Tiempo calculado

Según la gráfica se puede observar un excelente ajuste entre los valores medidos, y los valores calculados a partir de la ecuación de predicción. Sin embargo, esto no es suficiente para validar el modelo, ya que se deben hacer nuevos ensayos para verificar la predicción del modelo en la generación de nuevos datos.

Paso 7: Validación del modelo



Muestras para validación del modelo de la mezcla 5

Validación modelo de la mezcla 5

Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo Medido	Tiempo Calculado	Intervalo de predicción	% de Error
250	40	30	17	18,75	11,6375 - 25,8625	9,33

R^2 de predicción: 91,64%

A partir de la tabla anterior, se observa que es posible calcular el tiempo de preparación de una muestra de Carbón de la Formación Umir Inferior, mediante el modelo obtenido. En la prueba de validación se obtuvo un porcentaje de error del 9,33%, que es un valor muy cercano al porcentaje de error de predicción que es del 8,36%.

Resumen Diseño Experimental para Carbones, de la Formación Umir Inferior.

Resumen Diseño Experimental para Carbones, de la Formación Umir Inferior.

		Contribución porcentual	Valor P	Efecto	Nivel óptimo del factor
Factores	Concentración Amoniaco (%)	3.8	0.054	-4	30
	Temperatura (℃)	53.73	0.001	-15	40
	Tamaño (µm)	40.46	0.001	13	250
Ecuación Predicción	Tiempo = 64,89 + 0,007429 Tamaño (µm) - 1,0000 Temperatura (℃) - 0,2667 Concentración Amoniaco (%)				
R^2 de Predicción	91,64%				
Validación	La validación se ajustó al modelo, error predicción modelo: 8,36%, error validación: 9,33%				

De acuerdo con el resumen del diseño experimental se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Según la contribución porcentual calculada a partir de la suma de los cuadrados, los factores involucrados en el modelo explican el 97.99% de la variabilidad total. Siendo el termino más importante o influyente sobre la variable respuesta la temperatura.

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura y el tamaño tienen efectos significativos sobre la variable respuesta (tiempo). Mientras la concentración con un Valor P de 0.054 muy cercano a 0.05, indica que existe un ligero efecto de este factor sobre la variable respuesta.

Con el objetivo de disminuir el tiempo de preparación, para Carbones de la formación Umir inferior, se destacan los siguientes escenarios:

Escenarios recomendados para la preparación

Escenario	Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo
1	2000	25	15	52
2	250	40	15	25
3	2000	40	15	35
4	250	40	30	18
5	2000	40	30	31

El escenario 1, no destaca en función del tiempo de preparación, pero es importante exponerlo para mostrar la variación del tiempo de preparación al aumentar al disminuir el tamaño de partícula, o al aumentar la temperatura y la concentración de amoniaco. El escenario más propicio en cuanto a tiempo de preparación es el 4, que a diferencia del 2 al variar únicamente la concentración se tiene una diferencia de preparación de 7 días. Por otro lado, el escenario 5 no presenta una diferencia sustancial en el tiempo al cambiar la concentración como se puede ver el escenario 3. Esto quiere decir que la concentración juega un papel importante para los tamaños de 250 micras.

6.1.6 Diseño experimental para la mezcla 6, Carbones de la Formación Umir Intermedia Superior (Km 26)

Paso 1: Aleatorización de tratamientos o corridas

Los resultados obtenidos en el desarrollo experimental no replicado para la mezcla 6, se muestran a continuación, y se presentan por orden de corrida experimental. Cumpliendo con la aleatorización de las corridas experimentales, definidas de forma automática por el software estadístico Minitab.

Orden de corrida de los tratamientos

Orden Corrida	Tamaño (µm)	Temperatura (℃)	Concentración Amoniaco (%)	Tiempo
1	250	25	15	53
2	2000	25	15	72
3	250	40	15	35
4	2000	40	15	37
5	250	25	30	49
6	2000	25	30	54

7	250	40	30	30
8	2000	40	30	32

Paso 2: Análisis de Varianza

Identificación de efectos

Identificación de efectos

Término	**Efecto**
Constante	
Tamaño (µm)	7,000
Temperatura (℃)	-23,50
Concentración Amoniaco (%)	-8,000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃)	-5,000
Tamaño (µm) *Concentración Amoniaco (%)	-3,500
Temperatura (℃) *Concentración Amoniaco (%)	3,000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃) *Concentración Amoniaco (%)	3,500

De acuerdo con la tabla de identificación de efectos, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tamaño tiene un efecto positivo sobre la variable respuesta, esto quiere decir que el incremento del factor tamaño mueve hacia arriba el tiempo de preparación de la muestra. Por lo tanto, para un tamaño de 2000 micras se espera que el tiempo de preparación sea mayor que para una muestra de tamaño de partícula de 250 micras.

- La temperatura es el factor que tiene más efecto o influencia sobre la variable respuesta, el aumento de factor temperatura mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. Es decir que para una temperatura de 40 el tiempo de preparación sería menor en comparación con una temperatura de 25.

- el incremento de la concentración mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. De esta manera se espera que para concentraciones de 30% de amoniaco el tiempo de preparación sea menor que para concentraciones de 15% de amoniaco.

Diagrama de Pareto

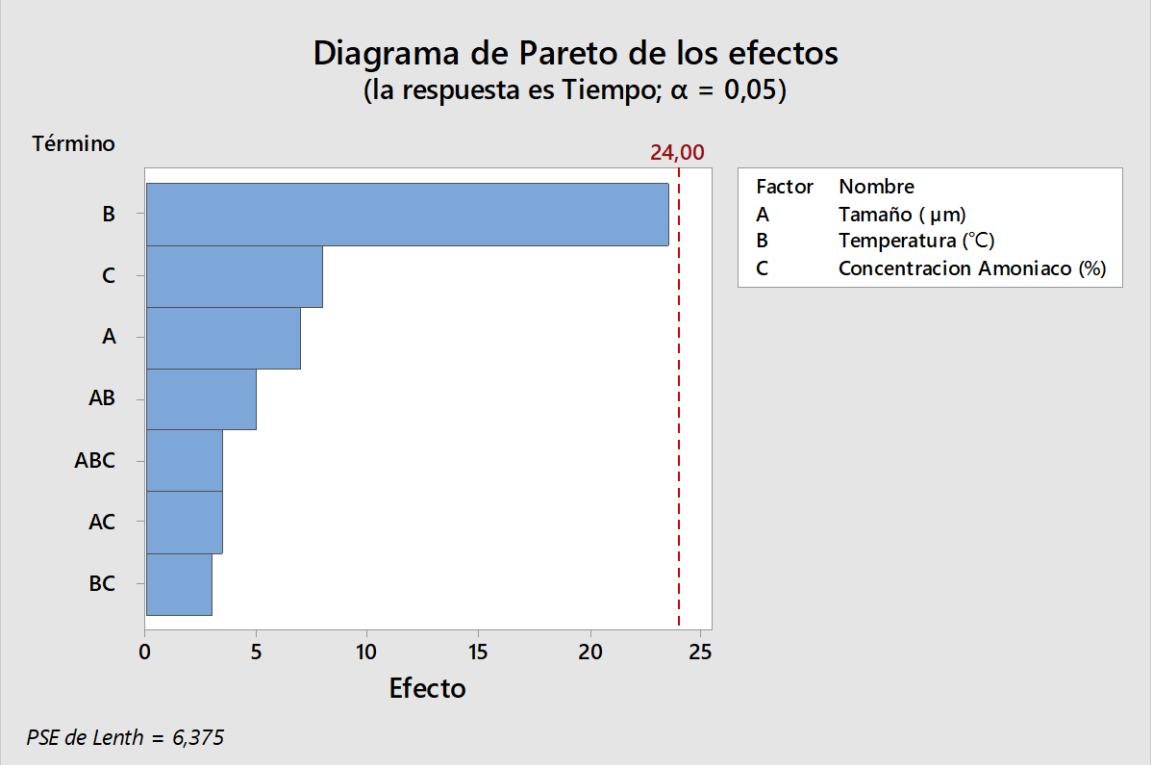


Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

De acuerdo con el Diagrama de Pareto, no se puede tener una confianza del 95% de que alguno de los factores o las interacciones entre los factores tengan un efecto significativo sobre el tiempo de preparación de la muestra.

Paso 3: Verificación del modelo

Como desde el punto de vista de significancia estadística ninguno de los factores o interacciones representa importancia relevante sobre la variable respuesta, se procede a realizar una reducción de términos del modelo, para identificar si alguno de los factores o interacciones toma más importancia. De acuerdo con el diagrama de Pareto, y la tabla de efectos se pueden eliminar las interacciones de dos y tres términos.

Redefiniendo el modelo, se obtendrían los siguientes resultados:

Diagrama de Pareto

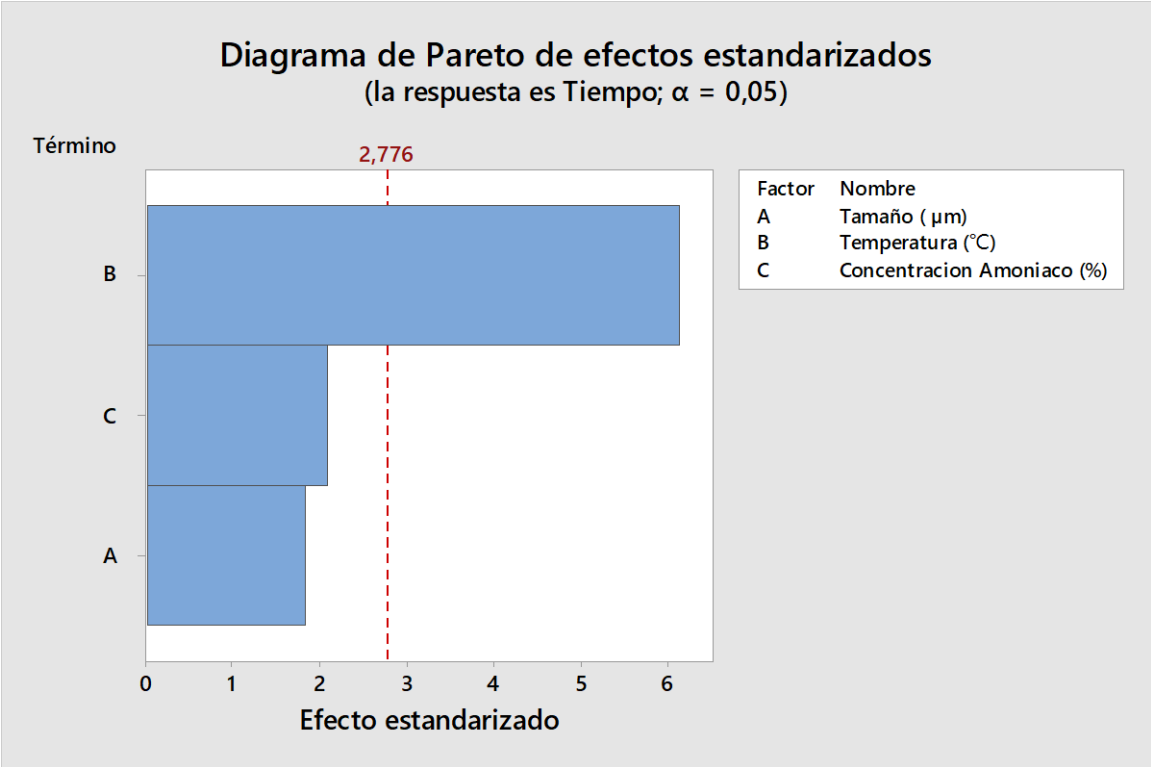


Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

Según el diagrama de Pareto, el efecto más significativo sobre la variable respuesta con un 95% de confiabilidad, está regido por la temperatura. A diferencia del modelo anterior el factor tamaño y concentración se encuentran más cercanos a la línea de referencia de significancia estadística sobre la variable respuesta.

Análisis de varianza

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados ajustado.	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Modelo	1330,50	443,50	15,16	0,012
Lineal	1330,50	443,50	15,16	0,012
Tamaño (µm)	98,00	98,00	3,35	0,141
Temperatura (°C)	1104,50	1104,50	37,76	0,004
Concentración Amoniaco (%)	128,00	128,00	4,38	0,105

Error	117,00	29,25		
Total	1447,50			

De acuerdo con la tabla de Análisis de varianza se pueden hacer las siguientes observaciones:

- A partir de la suma de cuadrados, se puede calcular la contribución porcentual de cada uno de los términos del modelo. Con frecuencia la contribución porcentual es un buen parámetro para identificar la importancia de cada uno de los términos del modelo. En este caso se puede observar que el factor temperatura rige el proceso, ya que explica el 76.3% de la variabilidad total del tiempo de preparación. Mientras el tamaño y la concentración explican el 15.6%

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura es el factor que tiene efecto significativo sobre la variable respuesta (tiempo). Mientras el tamaño y la concentración con un Valor P de 0.141 y 0.105 respetivamente desde el punto de vista estadístico no representan significancia. Sin embargo, si no se tienen en cuenta estos dos factores en el modelo definitivo se vería afectado el R^2 de predicción.

Identificación de efectos

Tabla de efectos

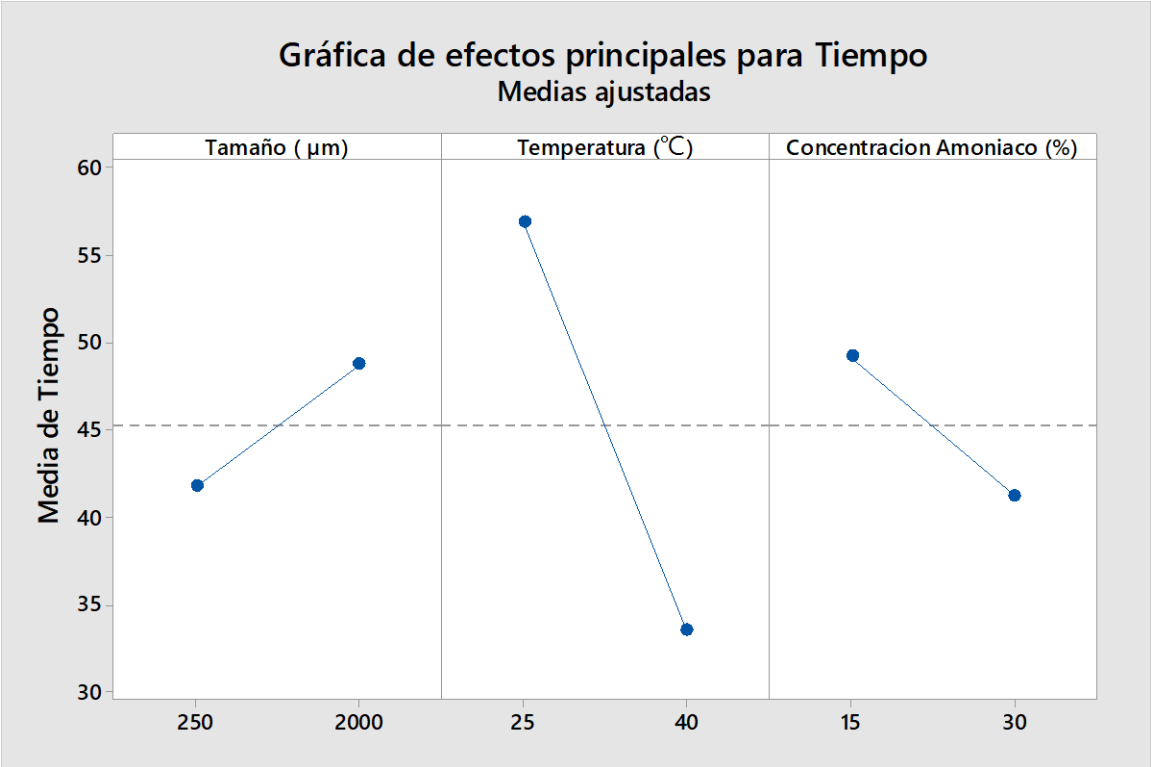
Término	Efecto	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor P
Constante		45,25	1,91	23,66	0,000
Tamaño (µm)	7,00	3,50	1,91	1,83	0,141
Temperatura (℃)	-23,50	-11,75	1,91	- 6,14	0,004
Concentración Amoniaco (%)	-8,00	- 4,00	1,91	-2,09	0,105

Por medio del estadístico R^2 de predicción, se indica con qué porcentaje el modelo explica la variabilidad de los datos nuevos. Esto quiere de que con los términos del modelo actual se tiene un R^2 de predicción del 67,67%. Por lo tanto, se podría tener un 32,33% de error en la predicción del tiempo de preparación.

. R^2 de predicción

R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predicción)
91,92%	85,85%	67,67%

Paso 4: Gráficas de efectos principales de los factores.



Gráfica de efectos principales para Tiempo

De acuerdo con la gráfica de efectos principales, se puede observar que las diferencias marcadas en el tiempo medio de preparación de la muestra se deben a los cambios de temperatura de 25 a 40. Mientras para el tamaño de partícula y la concentración de amoniaco si bien también hay cambios entre el tiempo de preparación, estos cambios son más sutiles.

Paso 6: Ecuación de predicción

A continuación, se establece la ecuación de predicción, para muestras similares a la mezcla 3, que corresponden a muestras tipo Areniscas de la formación La Luna Superior.

Tiempo = 103,7 + 0,00400 Tamaño (µm) - 1,567 Temperatura (°C)
- 0,533 Concentración Amoniaco (%)

De acuerdo con la ecuación de predicción para el tiempo de preparación, se obtienen los siguientes datos:

Intervalo de confianza para el tiempo

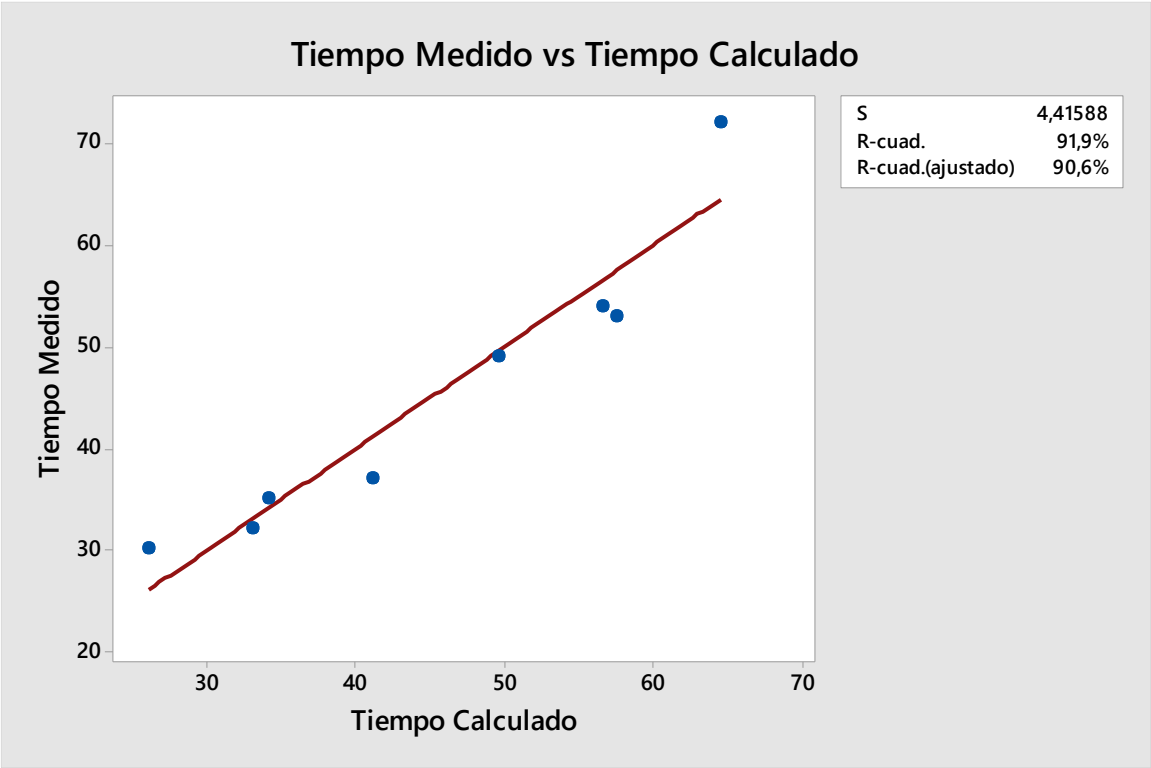
Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo	Tiempo predicción	Confianza inferior	Confianza superior	Predicción inferior	Predicción superior
250	25	15	53	57,5	46,8821	68,1179	39,1093	75,8907
2000	25	15	72	64,5	53,8821	75,1179	46,1093	82,8907
250	40	15	35	34,0	23,3821	44,6179	15,6093	52,3907
2000	40	15	37	41,0	30,3821	51,6179	22,6093	59,3907
250	25	30	49	49,5	38,8821	60,1179	31,1093	67,8907
2000	25	30	54	56,5	45,8821	67,1179	38,1093	74,8907
250	40	30	30	26,0	15,3821	36,6179	7,6093	44,3907
2000	40	30	32	33,0	22,3821	43,6179	14,6093	51,3907

Los límites de confianza, superior e inferior, indican el intervalo de confianza con un nivel de 95%, esto quiere decir que se tiene la seguridad en un 95% de que el intervalo de confianza contiene los valores medios del tiempo de respuesta, para los factores y niveles involucrados en el modelo.

Por otro lado, los límites de predicción superior e inferior, indican el intervalo de predicción con un nivel de confianza del 95%, esto quiere que, para la generación de un nuevo ensayo, bajo las mismas condiciones se esperaría que el tiempo de preparación de la muestra caiga dentro del intervalo de predicción. Sin embargo, el intervalo de predicción es demasiado grande debido a que se tiene poca información con una fuerte desviación en los tiempos, lo que sugiere que para ensayo sería apropiado realizar una réplica con el objetivo de disminuir los intervalos de predicción. Por lo tanto, en este caso es más confiable en el R^2 de predicción que en el intervalo de predicción.

En el diseño experimental de esta muestra se puede observar que existen grandes diferencias del tiempo de preparación de la muestra en función de cada uno de las combinaciones realizadas, la mayor diferencia se encuentra al pasar de 72 días, a 30 días.

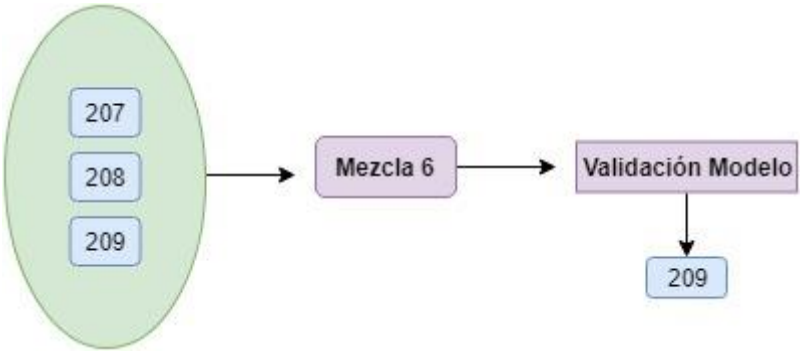
En la siguiente grafica se puede observar el ajuste entre los tiempos medidos, es decir los tiempos reales tomados en el laboratorio versus los tiempos de predicción o tiempos calculados generados a partir de la ecuación de predicción para el tiempo.



Tiempo medido vs Tiempo calculado

Según la gráfica se puede observar un buen ajuste entre los valores medidos, y los valores calculados a partir de la ecuación de predicción. Sin embargo, esto no es suficiente para validar el modelo, ya que se deben hacer nuevos ensayos para verificar la predicción del modelo en la generación de nuevos datos.

Paso 7: Validación del modelo



Muestras para validación del modelo de la mezcla 6

Validación modelo de la mezcla 6

Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo Medido	Tiempo Calculado	Intervalo de predicción	% de Error
2000	40	30	23	33	14,6093 - 51,3907	30.30

R^2 de predicción: 67,67%

A partir de la tabla anterior, se observa que es posible calcular el tiempo de preparación de una muestra de Carbón de la Formación Umir Intermedia Superior, mediante el modelo obtenido. En la prueba de validación se obtuvo un porcentaje de error del 30.30%, que se ubica por debajo del porcentaje de error del R^2 de predicción que es del 32.33%.

Resumen Diseño Experimental para los carbones, de la Formación Umir Intermedia Superior.

Resumen Diseño Experimental para los carbones, de la Formación Umir Intermedia Superior.

		Contribución porcentual	Valor P	Efecto	Nivel óptimo del factor
Factores	Concentración Amoniaco (%)	8.84	0.105	-8	30
	Temperatura (℃)	76.3	0.004	-23,5	40
	Tamaño (µm)	6.8	0.141	7	250
Ecuación Predicción	Tiempo = 103,7 + 0,00400 Tamaño (µm) - 1,567 Temperatura (℃) - 0,533 Concentración Amoniaco (%)				
R^2 de Predicción	67,67%				
Validación	La validación se ajustó al modelo, error predicción modelo: 32,33, error validación: 30,30%				

De acuerdo con el resumen del diseño experimental se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Según la contribución porcentual calculada a partir de la suma de los cuadrados, los factores involucrados en el modelo explican el 91.94% de la variabilidad total. Siendo el termino más importante o influyente sobre la variable respuesta la temperatura.

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura es el factor que tiene efecto significativo sobre la variable respuesta (tiempo). Mientras el tamaño y la concentración con un Valor P de 0.141 y 0.105 lejano a 0.05, indica desde el punto de vista estadístico no tienen mucho peso, pero a partir de la tabla de efectos y

Diagrama de Pareto se determinó la importancia de que estos factores hagan parte del modelo.

Con el objetivo de disminuir el tiempo de preparación, para carbones de la Formación Umir Intermedia Superior Luna Superior, se destacan los siguientes escenarios:

Escenarios recomendados para la preparación

Escenario	Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo
1	2000	25	15	72
2	250	40	15	35
3	2000	40	15	37
4	250	40	30	30
5	2000	40	30	32

El escenario 1, no destaca en función del tiempo de preparación, pero es importante exponerlo para mostrar la variación del tiempo de preparación al aumentar al disminuir el tamaño de partícula, o al aumentar la temperatura y la concentración de amoniaco. El escenario más propicio en cuanto a tiempo de preparación es el 4, que a diferencia del 2 al variar únicamente la concentración se tiene una diferencia de preparación de 5 días. De igual forma sucede con el escenario 5 y 3 que, al variar la concentración, cambia el tiempo de preparación en 5 días.

6.1.7 Diseño experimental para la mezcla 7, Caliza Carbonosa de la Formación La Luna Inferior (Km 40)

Paso 1: Aleatorización de tratamientos o corridas

Los resultados obtenidos en el desarrollo experimental no replicado para la mezcla 7, se muestran a continuación, y se presentan por orden de corrida experimental. Cumpliendo con la aleatorización de las corridas experimentales, definidas de forma automática por el software estadístico Minitab.

Orden de corrida de los tratamientos

Orden Corrida	Tamaño (µm)	Temperatura (℃)	Concentración Amoniaco (%)	Tiempo
1	250	25	15	11
2	2000	25	15	13
3	250	40	15	7
4	2000	40	15	10
5	250	25	30	9
6	2000	25	30	12

7	250	40	30	5
8	2000	40	30	7

Paso 2: Análisis de Varianza

Identificación de efectos

Identificación de efectos

Término	**Efecto**
Constante	
Tamaño (µm)	2,500
Temperatura (℃)	-4,000
Concentración Amoniaco (%)	-2,000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃)	-0,000000
Tamaño (µm) *Concentración Amoniaco (%)	0,000000
Temperatura (℃) *Concentración Amoniaco (%)	-0,5000
Tamaño (µm) *Temperatura (℃) *Concentración Amoniaco (%)	-0,5000

De acuerdo con la tabla de identificación de efectos, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- El tamaño tiene un efecto positivo sobre la variable respuesta, esto quiere decir que el incremento del factor tamaño mueve hacia arriba el tiempo de preparación de la muestra. Por lo tanto, para un tamaño de 2000 micras se espera que el tiempo de preparación sea mayor que para una muestra de tamaño de partícula de 250 micras.

- La temperatura es el factor que tiene más efecto o influencia sobre la variable respuesta, el aumento de factor temperatura mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. Es decir que para una temperatura de 40 el tiempo de preparación sería menor en comparación con una temperatura de 25.

- el incremento de la concentración mueve hacia abajo el tiempo de preparación de la muestra. De esta manera se espera que para concentraciones de 30% de amoniaco el tiempo de preparación sea menor que para concentraciones de 15% de amoniaco.

Diagrama de Pareto

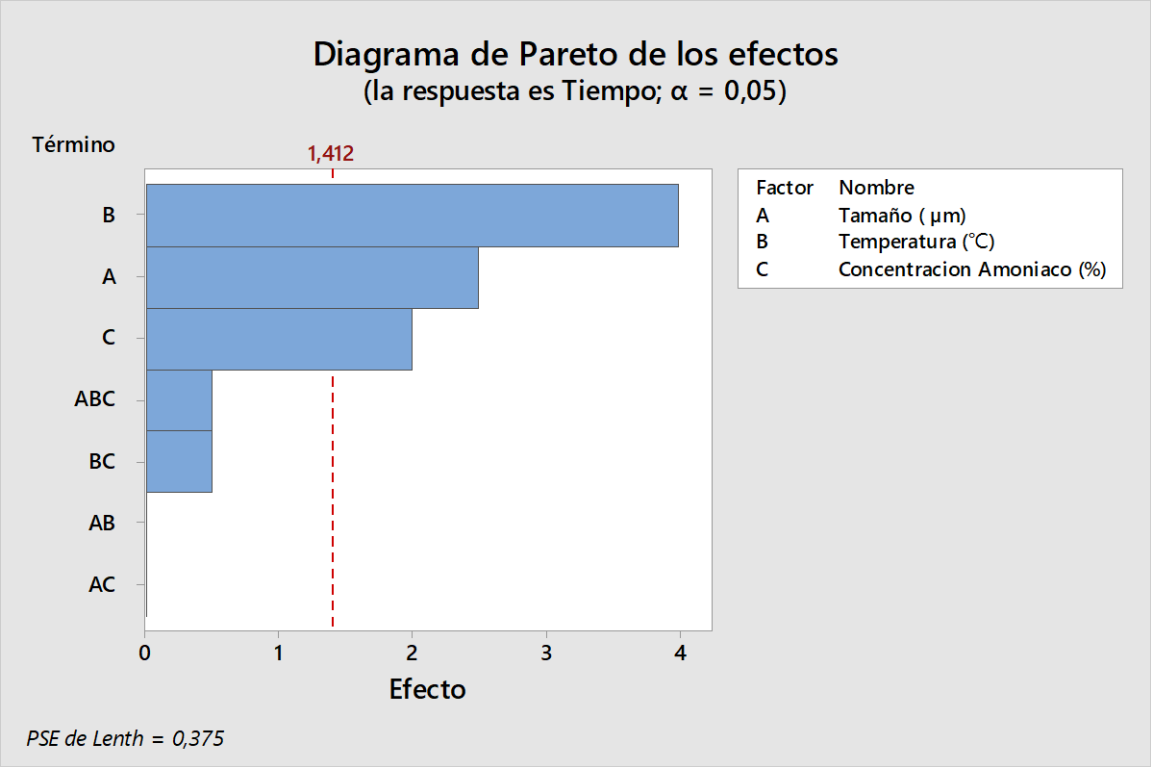


Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

De acuerdo con el Diagrama de Pareto con un 95% de confiabilidad los factores temperatura, tamaño, y concentración tiene efectos significativos sobre el tiempo de preparación de la muestra. Por otro lado, las interacciones de 2 y 3 términos se encuentran alejas de la línea de referencia de significancia estadística, lo que indica que su efecto sobre la variable respuesta no tendría mucha importancia.

Paso 3: Verificación del modelo

Como desde el punto de vista de significancia estadística las interacciones de 2 y 3 términos no representan importancia relevante sobre la variable respuesta, se procede a realizar una reducción de términos del modelo.

Redefiniendo el modelo, se obtendrían los siguientes resultados:

Diagrama de Pareto

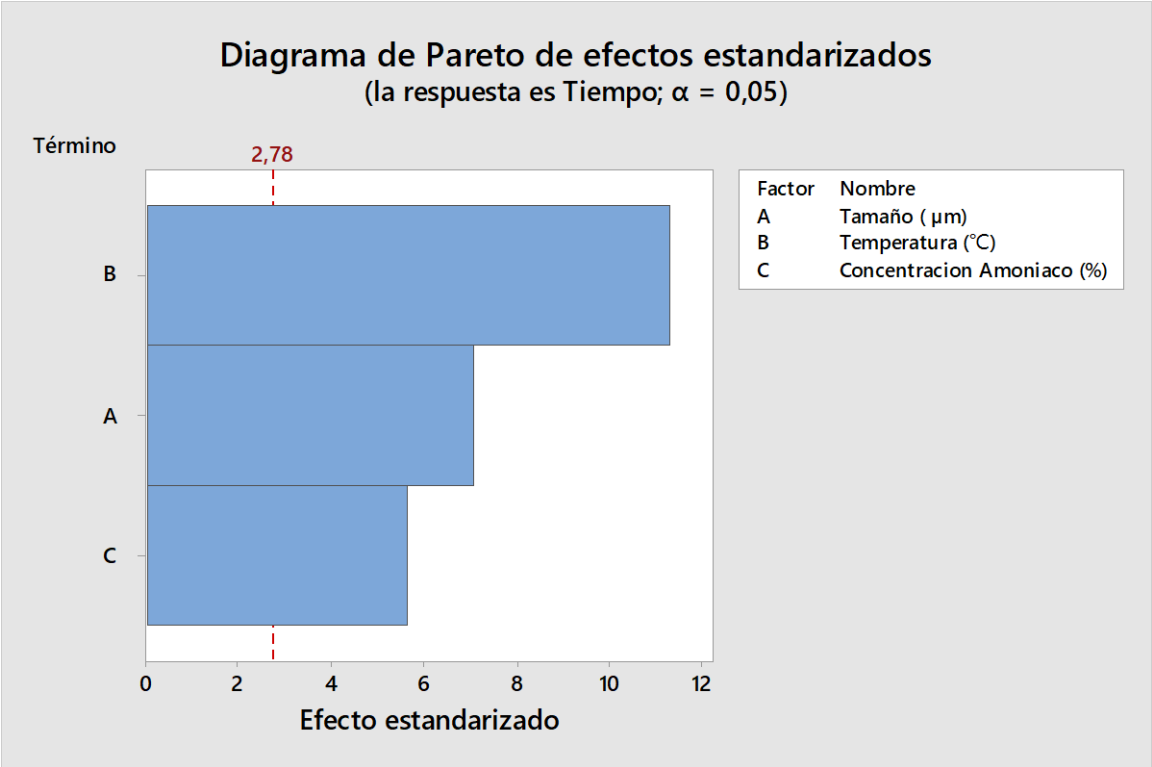


Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

De acuerdo con el Diagrama de Pareto el efecto del factor temperatura es el más importante seguido del tamaño y la concentración.

Análisis de varianza

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados ajustado.	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Modelo	52,500	17,5000	70,00	0,001
Lineal	52,500	17,5000	70,00	0,001
Tamaño (µm)	12,500	12,5000	50,00	0,002
Temperatura (°C)	32,000	32,0000	128,00	0,000
Concentración Amoniaco (%)	8,000	8,0000	32,00	0,005
Error	1,000	0,2500		
Total	53,500			

De acuerdo con la tabla de Análisis de varianza se pueden hacer las siguientes observaciones:

- A partir de la suma de cuadrados, se puede calcular la contribución porcentual de cada uno de los términos del modelo. Con frecuencia la contribución porcentual es un buen parámetro para identificar la importancia de cada uno de los términos del modelo. En este caso se puede observar que el factor temperatura rige el proceso, ya que explica el 59.8% de la variabilidad total del tiempo de preparación. Mientras el tamaño explica el 23,4% y la concentración explica el 15%

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura, el tamaño y la concentración son factores tienen efectos significativos sobre la variable respuesta (tiempo).

Identificación de efectos

Tabla de efectos

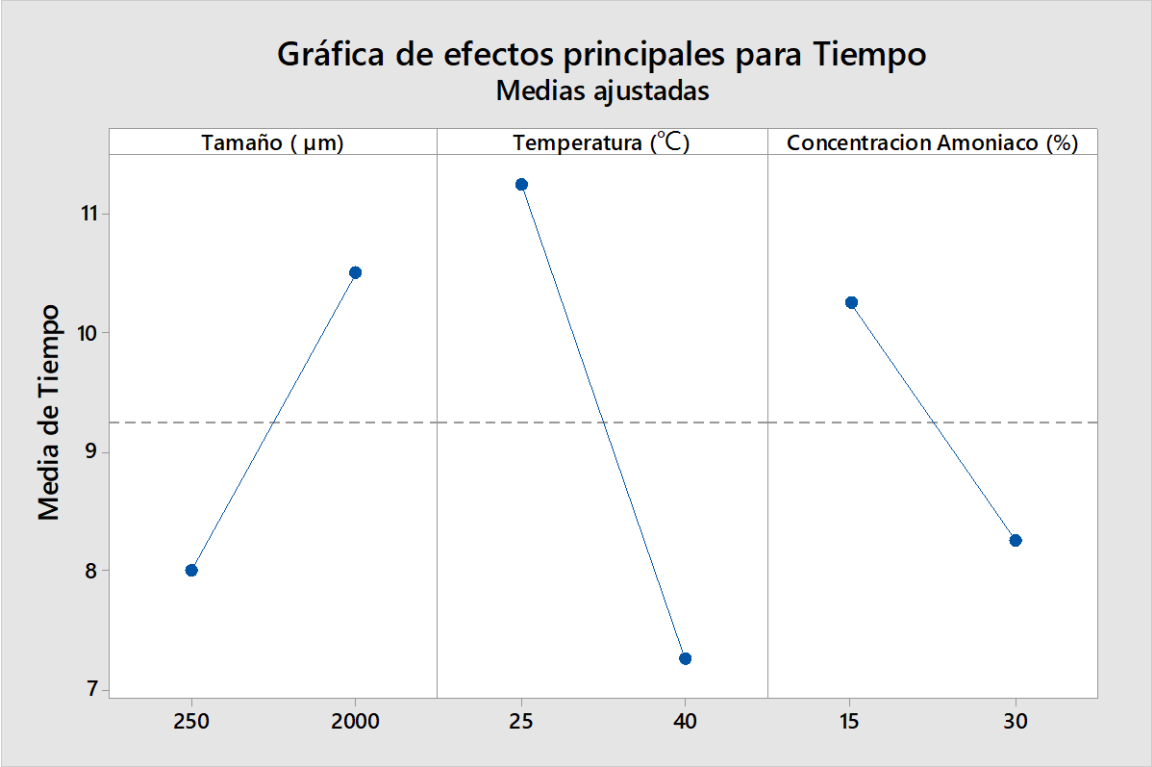
Término	Efecto	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	Valor T	Valor P
Constante		9,250	0,177	52,33	0,000
Tamaño (µm)	2,500	1,250	0,177	7,07	0,002
Temperatura (℃)	-4,000	-2,000	0,177	-11,31	0,000
Concentración Amoniaco (%)	-2,000	-1,000	0,177	-5,66	0,005

Por medio del estadístico R^2 de predicción, se indica con qué porcentaje el modelo explica la variabilidad de los datos nuevos. Esto quiere decir, que con los términos del modelo actual se tiene un R^2 de predicción del 92,52%. Por lo tanto, se podría tener un 7,48% de error en la predicción del tiempo de preparación.

R^2 de predicción

R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predicción)
98,13%	96,73%	92,52%

Paso 4: Gráficas de efectos principales de los factores.



Grafica de efectos principales para Tiempo

De acuerdo con la gráfica de efectos principales, el tiempo medio de preparación se ve más afectado por la temperatura, seguido del tamaño y de la concentración. El tiempo se minimiza para una temperatura de 40, un tamaño de partícula de 250 y una concentración de amoniaco del 30%.

Paso 6: Ecuación de predicción

A continuación, se establece la ecuación de predicción, para muestras similares a la mezcla 7, que corresponden a muestras tipo Calizas Carbonosas de la formación La Luna Inferior.

Tiempo = 19,310 + 0,001429 Tamaño (µm) - 0,2667 Temperatura (°C)
- 0,1333 Concentración Amoniaco (%)

De acuerdo con la ecuación de predicción para el tiempo de preparación, se obtienen los siguientes datos:

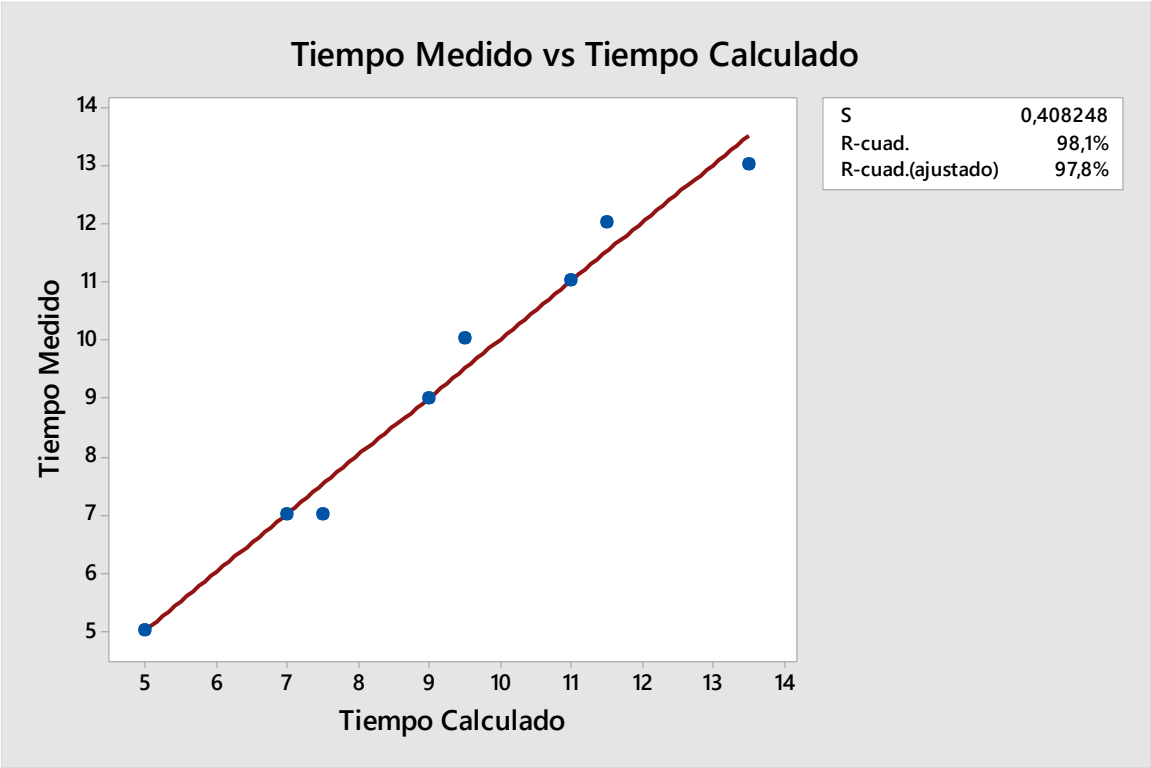
Intervalo de confianza para el tiempo

Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo	Tiempo predicción	Confianza inferior	Confianza superior	Predicción inferior	Predicción superior
250	25	15	11	11,0	10,0184	11,9816	9,2998	12,7002
2000	25	15	13	13,5	12,5184	14,4816	11,7998	15,2002
250	40	15	7	7,0	6,0184	7,9816	5,2998	8,7002
2000	40	15	10	9,5	8,5184	10,4816	7,7998	11,2002
250	25	30	9	9,0	8,0184	9,9816	7,2998	10,7002
2000	25	30	12	11,5	10,5184	12,4816	9,7998	13,2002
250	40	30	5	5,0	4,0184	5,9816	3,2998	6,7002
2000	40	30	7	7,5	6,5184	8,4816	5,7998	9,2002

Los límites de confianza, superior e inferior, indican el intervalo de confianza con un nivel de 95%, esto quiere decir que se tiene la seguridad en un 95% de que el intervalo de confianza contiene los valores medios del tiempo de respuesta, para los factores y niveles involucrados en el modelo.

Por otro lado, los límites de predicción superior e inferior, indican el intervalo de predicción con un nivel de confianza del 95%, esto quiere que, para la generación de un nuevo ensayo, bajo las mismas condiciones se esperaría que el tiempo de preparación de la muestra caiga dentro del intervalo de predicción.

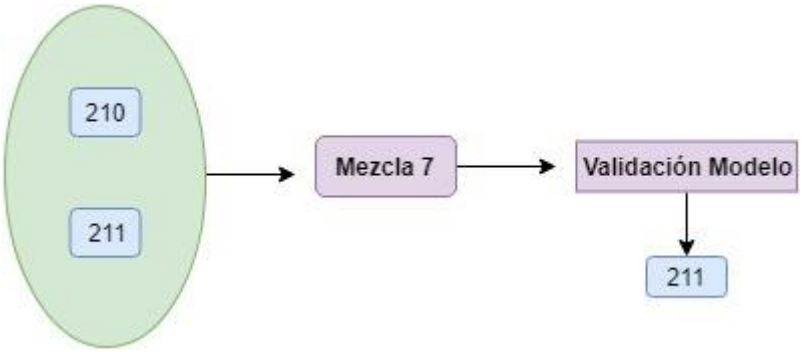
En la siguiente grafica se puede observar el ajuste entre los tiempos medidos, es decir los tiempos reales tomados en el laboratorio versus los tiempos de predicción o tiempos calculados generados a partir de la ecuación de predicción para el tiempo.



Tiempo medido vs Tiempo calculado

Según la gráfica se puede observar un excelente ajuste entre los valores medidos, y los valores calculados a partir de la ecuación de predicción. Sin embargo, esto no es suficiente para validar el modelo, ya que se deben hacer nuevos ensayos para verificar la predicción del modelo en la generación de nuevos datos.

Paso 7: Validación del modelo



Muestras para validación del modelo de la mezcla 7

Validación modelo de la mezcla 7

Tamaño	Temperatura	Concentración	Tiempo Medido	Tiempo Calculado	Intervalo de predicción	% de Error
2000	40	30	8	7,5	5,7998 - 9,2002	6,66%

R^2 de predicción: 92,52%

A partir de la tabla anterior, se observa que es posible calcular el tiempo de preparación de una muestra de Caliza Carbonosa de la formación La Luna Inferior, mediante el modelo obtenido. En la prueba de validación se obtuvo un porcentaje de error del 6,66%, que se ubica por debajo del porcentaje de error del R^2 de predicción que es del 7,48%, y además el tiempo medido se ubica en dentro del intervalo de predicción.

Resumen Diseño Experimental para calizas carbonosas, de la Formación La Luna Inferior.

Resumen Diseño Experimental para calizas carbonosas, de la Formación La Luna Inferior.

		Contribución porcentual	Valor P	Efecto	Nivel óptimo del factor
Factores	Concentración Amoniaco (%)	15	0.005	-2	30
	Temperatura (℃)	59.8	0.000	-4	40
	Tamaño (µm)	23.4	0.002	2.5	250
Ecuación Predicción	Tiempo = 19,310 + 0,001429 Tamaño (µm) - 0,2667 Temperatura (℃) - 0,1333 Concentración Amoniaco (%)				
R^2 de Predicción	92,52%				
Validación	La validación se ajustó al modelo, error predicción modelo: 7,48, error validación: 6,66%				

De acuerdo con el resumen del diseño experimental se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Según la contribución porcentual calculada a partir de la suma de los cuadrados, los factores involucrados en el modelo explican el 97.9% de la variabilidad total. Siendo el termino más importante o influyente sobre la variable respuesta la temperatura.

- Un efecto es significativo cuando su Valor P está por debajo de 0.05, esto quiere decir que con un nivel de confiabilidad del 95% la temperatura, la concentración de amoniaco y el tamaño de partículas tienen efectos significativos sobre la variable respuesta (tiempo).

Con el objetivo de disminuir el tiempo de preparación, para Calizas Carbonosas de la formación La Luna Inferior, se destacan los siguientes escenarios:

Escenarios recomendados para la preparación

Escenarios	**Tamaño**	**Temperatura**	**Concentración**	**Tiempo**
1	250	40	15	7
2	2000	40	15	10
3	250	40	30	5
4	2000	40	30	7

Los escenarios planteados sugieren que el factor más importante para disminuir el tiempo de preparación es la temperatura, y que los tiempos no difieren de forma significativa entre un tratamiento y otro.