

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Evaluación de técnicas de adherencia de microelementos en
partículas de nitrato de amonio para mejorar su distribución
en una mezcla física de fertilizante**

Trabajo de graduación presentado por
Carol Alejandra Mayorga Méndez
para optar al grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala,

2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



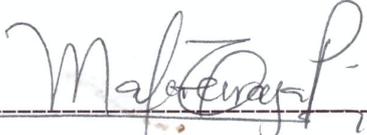
**Evaluación de técnicas de adherencia de microelementos en
partículas de nitrato de amonio para mejorar su distribución
en una mezcla física de fertilizante**

Trabajo de graduación presentado por
Carol Alejandra Mayorga Méndez
para optar al grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala,

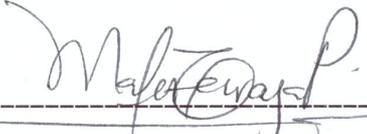
2021

Vo. Bo. :

(f)  _____

PhD. Ing. María Fernanda Terraza

Tribunal Examinador:

(f)  _____

Ph.D. Ing. María Fernanda Terraza

(f) _____

M. Sc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)  _____

M. Sc & MBA. Ing. Luis Ernesto Núñez González

Fecha de aprobación: Guatemala, 15 de febrero de 2021.

PREFACIO

Este trabajo de graduación surgió de la continua búsqueda de un tema de investigación a desarrollar. Leyendo artículos en internet, encontré publicaciones del trabajo de mi asesora y decidí contactarla. Luego de acceder a tomar un café conmigo y conversar acerca de nuestra carrera, ella como profesional y yo aún como estudiante, accedió a asesorarme y ambas planteamos diversas ideas en las que podía trabajar. Hasta que finalmente decidí llevar a cabo el presente trabajo para “Fertilizantes de Guatemala”, empresa de la cual ella es parte.

La realización de la fase experimental se vio atrasada debido a la suspensión de clases presenciales y cuarentena, consecuencia de la pandemia del Covid-19 en marzo del 2020. Comencé a realizar pruebas en agosto del mismo año desde mi casa. Los temas acerca del proceso de adherencia de micronutrientes y el análisis de suelo para la formulación del fertilizante más adecuado fueron temas de mi interés durante toda la investigación. Debo decir que aprendí mucho durante su elaboración y que estoy muy contenta con el producto elaborado. Me pareció muy interesante trabajar de la mano con una empresa para la investigación de un fertilizante que ahora será producido.

Quiero empezar agradeciendo a Dios por la bendición de poder estudiar esta carrera, por darme fortaleza y sabiduría cada día, guiarme durante estos cinco años y llenarme de conocimiento. A mis papás por su apoyo incondicional, por creer en mí siempre, por su esfuerzo que permitió que pudiera cumplir mi sueño de estudiar en la UVG y por sus oraciones en los momentos más importantes. A mi hermano por su consejo y ejemplo.

Gracias a la Dra. María Fernanda Terraza (Mafer) por su asesoría, apoyo y, compartir su conocimiento y experiencias conmigo durante la elaboración del presente trabajo. A la empresa “Fertilizantes de Guatemala” por otorgarme la confianza de poder llevar a cabo este proyecto de investigación.

A la Universidad del Valle de Guatemala por formarme como una profesional de excelencia. Al Departamento de Ingeniería Química por los conocimientos y habilidades enseñados para convertirme en Ingeniera Química. Y a mis amigos de la carrera por hacer de estos años una experiencia inolvidable, por su amistad incondicional y por trabajar siempre como un verdadero equipo de trabajo.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO.....	v
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	4
III. JUSTIFICACIÓN.....	5
IV. MARCO TEÓRICO.....	6
V. METODOLOGÍA.....	30
VI. RESULTADOS.....	38
VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
VIII. CONCLUSIONES.....	71
IX. RECOMENDACIONES.....	73
X. BIBLIOGRAFÍA.....	74
XI. ANEXOS.....	77
XII. GLOSARIO.....	133

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Fertilizantes portadores de micronutrientes.....	9
Cuadro 2. Porcentajes mínimos sugeridos de micronutrientes y cantidades aplicadas a fertilizadas en rangos recomendados.....	9
Cuadro 3. Efectividad de aceites y ceras adherentes para el recubrimiento de fertilizantes granulares con micronutrientes.....	10
Cuadro 4. Composiciones porcentuales de nutrientes primarios en fertilizantes simples y multinutrientes.....	13
Cuadro 5. Límites de detección (ng/ml) para algunos elementos mediante espectroscopia de absorción atómica.....	27
Cuadro 6. Conductancias iónicas a dilución infinita en agua a 25°C.....	29
Cuadro 7. Variables de control, independientes y de respuesta para el método de adherencia de micronutrientes a fertilizante.....	31
Cuadro 8. Nombre de los productos adherentes utilizados para la evaluación de su efectividad.....	32
Cuadro 9. Variables de control, independientes y de respuesta para la técnica de recubrimiento sobre fertilizante.....	33
Cuadro 10. Porcentajes máximos de adherencia de 60 gramos de boro en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	38
Cuadro 11. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	38
Cuadro 12. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	39
Cuadro 13. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	39

Cuadro 14. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	39
Cuadro 15. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	40
Cuadro 16. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	40
Cuadro 17. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	40
Cuadro 18. Porcentajes máximos de adherencia de una mezcla de 100 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	41
Cuadro 19. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 100 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	41
Cuadro 20. Porcentajes máximos de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	42
Cuadro 21. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	43
Cuadro 22. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	44
Cuadro 23. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C).....	45
Cuadro 24. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	45

Cuadro 25. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	47
Cuadro 26. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	50
Cuadro 27. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	51
Cuadro 28. Porcentajes máximos de adherencia de una mezcla de 60 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	53
Cuadro 29. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 60 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	53
Cuadro 30. Determinación cuantitativa de la presencia de boro en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.....	54
Cuadro 31. Determinación cuantitativa de la presencia de cobre en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.....	55
Cuadro 32. Determinación cuantitativa de la presencia de manganeso en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.....	55
Cuadro 33. Determinación cuantitativa de la presencia de cinc en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.....	56
Cuadro 34. Porcentajes máximos de adherencia de una mezcla de 477 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 10 kilogramos nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes en un proceso de mezcla simple a una escala 10 veces mayor que las pruebas anteriores.....	56
Cuadro 35. Determinación de las propiedades químicas y físicas de la tierra luego de la liberación del fertilizante nitrogenado con micronutrientes y adherentes a partir de un análisis de suelos.....	57

Cuadro 36. Comparación del costo incremental de producción, por tonelada métrica de nitrato de amonio y un porcentaje de micronutrientes al 10% m/m, entre una mezcla física convencional y recubiertas con adherentes A, B y C.....	58
Cuadro 37. Porcentaje de segregación de polvos sobre el peso total de las muestras con el tiempo para la determinación de la vida de anaquel.....	59
Cuadro 38. Pesos de las muestras de adherencia de 60 gramos de boro en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	77
Cuadro 39. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	78
Cuadro 40. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	78
Cuadro 41. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	79
Cuadro 42. Pesos de las muestras de adherencia de una mezcla de 100 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.....	79
Cuadro 43. Pesos de las muestras de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	80
Cuadro 44. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	81
Cuadro 45. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	82
Cuadro 46. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.	85

Cuadro 47. Pesos de las muestras de adherencia de una mezcla de 60 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.....	87
Cuadro 48. Pesos de las muestras de adherencia de una mezcla de 477 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 10 kilogramos nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes en un proceso de mezcla simple a una escala 10 veces mayor que las pruebas anteriores.	88
Cuadro 49. Parámetros de humedad de las materias primas utilizadas en la experimentación y producto final con adherente C.	88
Cuadro 50. Modelo matemático que describe curva de calibración para sodio.....	89
Cuadro 51. Modelo matemático que describe curva de calibración para cobre.....	90
Cuadro 52. Modelo matemático que describe curva de calibración para manganeso....	91
Cuadro 53. Modelo matemático que describe curva de calibración para cinc.....	92
Cuadro 54. Determinación de boro por espectroscopia de absorción atómica.....	93
Cuadro 55. Determinación de cobre por espectroscopia de absorción atómica.....	97
Cuadro 56. Determinación de manganeso por espectroscopia de absorción atómica.....	101
Cuadro 57. Determinación de cinc por espectroscopia de absorción atómica.....	104
Cuadro 58. Preparación de muestras de tierra y fertilizante multinutriente recubierto enviadas a análisis de suelos.	108
Cuadro 59. Pesos de las muestras para la determinación del porcentaje de segregación de polvos sobre el peso total de las muestras con el tiempo para la determinación de la vida de anaquel.	108
Cuadro 60. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 1.Mx.A...	111
Cuadro 61. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 2.Mx.A...	112
Cuadro 62. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 1.Mx.B...	113
Cuadro 63. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 2.Mx.B...	114
Cuadro 64. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 1.Mx.C...	115
Cuadro 65. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 2.Mx.C...	116
Cuadro 66. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra control....	117

Cuadro 67. Coeficientes de difusión individuales de los iones a dilución infinita en la solución del suelo según la ecuación de Nernst.	117
Cuadro 68. Ficha técnica mezcladora.....	123
Cuadro 69. Ficha técnica molino de discos	123

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Matriz química de compatibilidad entre fertilizantes.....	16
Figura 2. Humedad relativa de fertilizantes comunes a 25 °C.....	24
Figura 3. Segregación en mezclas de fertilizante y micronutrientes a distintos tamaños de partícula.....	25
Figura 4. Técnica de observación de segregación en mezclas debido a la forma cónica que se forma.....	26
Figura 5. Esquema de la difusión de micronutrientes en la solución del suelo.	29
Figura 6. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.....	43
Figura 7. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente B agregado.....	44
Figura 8. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado	48
Figura 9. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente B agregado.....	48
Figura 10. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente C agregado.....	49
Figura 11. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.....	51

Figura 12. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente B agregado.....	52
Figura 13. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente C agregado.....	52
Figura 14. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 60 gramos de micronutrientes en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.....	54
Figura 15. Curva de calibración para sodio mediante espectroscopia de absorción atómica.....	89
Figura 16. Curva de calibración para cobre mediante espectroscopia de absorción atómica.....	90
Figura 17. Curva de calibración para manganeso mediante espectroscopia de absorción atómica.....	91
Figura 18. Curva de calibración para cinc mediante espectroscopia de absorción atómica.....	92
Figura 19. Mezcladora de tambor giratorio con 2 aspas.....	124
Figura 20. Molino de discos y tornillo sin fin ajustador de hierro fundido recubierto con estaño.....	124
Figura 21. 60 gramos de octoborato de sodio.....	125
Figura 22. Adición de 60 gramos del compuesto de octoborato de sodio a 1 kilogramo de nitrato de amonio	125
Figura 23. 30 gramos de sulfato de cobre.....	126
Figura 24. Adición de 30 gramos del compuesto de sulfato de cobre a 1 kilogramo de nitrato de amonio.....	126
Figura 25. 30 gramos de sulfato de manganeso.....	127
Figura 26. Adición de 30 gramos del compuesto de sulfato de manganeso a 1 kilogramo de nitrato de amonio.....	127

Figura 27. Polvo no adherido de sulfato de manganeso al nitrato de amonio en el fondo de la mezcladora.....	128
Figura 28. 30 gramos de sulfato de cinc.....	128
Figura 29. Adición de 30 gramos del compuesto de sulfato de cinc a 1 kilogramo de nitrato de amonio.....	129
Figura 30. Kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente A con mezcla de 60 gramos de micronutrientes.....	129
Figura 31. Kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente B con mezcla de 60 gramos de micronutrientes.....	130
Figura 32. Kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente C con mezcla de 60 gramos de micronutrientes.....	130
Figura 33. 10 kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente A con mezcla de 477 gramos de micronutrientes.....	131
Figura 34. 10 kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente B con mezcla de 477 gramos de micronutrientes.....	131
Figura 35. 10 kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente C con mezcla de 477 gramos de micronutrientes.....	132

RESUMEN

El objetivo general del proyecto de graduación era evaluar el proceso de adherencia de micronutrientes en un fertilizante nitrogenado al mezclar nitrato de amonio con las materias primas de octoborato de sodio, sulfato de cinc monohidratado, sulfato de manganeso monohidratado y sulfato de cobre pentahidratado junto con agentes adherentes a su superficie para aumentar la eficiencia de la distribución homogénea del producto final en anaquel. Para ello se plantearon tres objetivos específicos: (i) determinar los porcentajes máximos de adherencia del boro, cinc, cobre y manganeso en el nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple sin adición de adherentes por medio de la técnica de mezcla a granel en fertilizantes granulares; (ii) evaluar la efectividad de tres productos adherentes para recubrir las partículas con los micronutrientes para mejorar su distribución en una mezcla física por medio de la técnica de recubrimiento en fertilizantes granulares y; (iii) evaluar las características finales del fertilizante recubierto multinutriente a partir de la segregación, porcentaje de polvo, vida de anaquel, costo incremental y liberación de micronutrientes en suelo para incrementar su calidad como producto final.

Para la determinación de los porcentajes máximos de adherencia se realizaron mezclas físicas individuales agregando a 1 kilogramo de nitrato de amonio cada micronutriente. Los sulfatos de cinc, manganeso y cobre en un 3% m/m y el octoborato de sodio en un 6% m/m. Luego se realizaron pruebas con una mezcla de todos los micronutrientes en un 10% m/m. Se evaluó la efectividad de los adherentes A, B y C al determinar el volumen necesario de cada uno, por kilogramo de fertilizante nitrogenado, para adherir los metales en mezclas individuales y una mezcla de todos los micronutrientes. Para la evaluación de las características finales se obtuvieron los polvos adheridos y no adheridos en cada muestra. Se midió la segregación de cada una después de 2 a 4 meses de almacenamiento. Se calculó el costo incremental del fertilizante recubierto multinutriente para los 3 adherentes y se comprobó, mediante un análisis de suelos, la liberación de cada metal en la tierra.

En la preparación de micronutrientes para el proceso de adherencia se utilizó un molino de discos y tornillo sin fin ajustador para la reducción de tamaño de partícula de las sales y un tamiz No. 120 para la separación de los finos. En el proceso de mezclado se utilizó una mezcladora tipo tambor con dos aspas internas y para la evaluación de adherencia se utilizaron balanzas analíticas.

Se determinó que los compuestos con mayor porcentaje de adherencia individual sin adherentes son el octoborato de sodio con un $90.677 \pm 1.643\%$ y el sulfato de cobre con $86.980 \pm 1.664\%$. Y los de muy baja adherencia son el sulfato de cinc con $32.412 \pm 7.571\%$ y el sulfato de manganeso con $3.867 \pm 2.177\%$ y para la mezcla de micronutrientes se determinó un porcentaje promedio del $31.066 \pm 1.241\%$. Estos resultados confirman la necesidad de evaluar adherentes para mejorar las condiciones del producto final, en el que se requiere un mínimo de 90% de adherencia.

Se comprobó la efectividad de los 3 adherentes para el recubrimiento del nitrato de amonio con los cuatro micronutrientes obteniendo porcentajes máximos de adherencia individuales mayores al 95%. A partir de la comparación entre volúmenes de los adherentes A, B y C por kilogramo de nitrato de amonio, se determinó que el más eficiente para la adherencia de una mezcla de micronutrientes al 6% m/m es de 6 ml/kg para el A, 11 ml/kg para el B y 5 ml/kg para el C. Se demostró que el adherente C fue el que presentó mayores porcentajes de adherencia utilizando un menor volumen por kilogramo de nitrato de amonio.

Se observó en las características finales del fertilizante recubierto con micronutrientes almacenado, que luego de un periodo de tiempo de 2 a 4 meses la media del porcentaje de segregación aumenta en promedio un 0.20% después de transcurrido su máximo período de anaquel. Se calculó que tiene un costo incremental, con respecto a una mezcla física convencional, entre \$30 a \$ 70 por tonelada métrica dependiendo del adherente utilizado en su formulación.

Y que sí existe un aumento en la concentración de los micronutrientes en el suelo al fertilizar la tierra con el producto final recubierto. Se recomienda agregar el aglutinante en forma de spray para mejores resultados, al tener una mayor superficie de contacto que al hacerlo por medio de goteo. Y evitar exceder un tiempo de mezclado total de más de 5 minutos, ya que se observó la segregación de las perlas de nitrato de amonio.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en la empresa, que por motivos de confidencialidad se expresará como, “Fertilizantes de Guatemala” no existe un proceso estandarizado para adherir micronutrientes a los fertilizantes nitrogenados de partículas de nitrato de amonio. Y se desconocen las propiedades del fertilizante mezclado con los microelementos y recubierto con adherentes para un manejo de anaquel óptimo. El objetivo general del trabajo de graduación era el de evaluar el proceso de adherencia de los microelementos boro, cobre, manganeso y cinc con agentes adherentes a la superficie de las partículas de nitrato de amonio, para aumentar la calidad del producto final.

La técnica de mezcla a granel se utiliza para agregar nutrientes secundarios o micronutrientes a fertilizantes granulados produciendo un grado de fertilizante recomendado. Si el micronutriente representa menos del 5% del peso total de la mezcla, la literatura recomienda que el micronutriente no debe agregarse en forma granular. En estos casos es necesario que tengan un tamaño de partícula muy fino que pase por un tamiz No. 100 o de menor número para ser efectivos. Durante el mezclado y almacenamiento puede ocurrir segregación.

Para reducir el problema de segregación se recomienda agregar un adherente que asegure la adherencia a los gránulos del fertilizante primario. A través de la técnica de recubrimiento en fertilizantes granulares, se pueden aplicar agentes adherentes a la superficie durante el mezclado. Es recomendable agregar una pequeña cantidad antes de la adición de los micronutrientes al fertilizante primario y luego el resto.

Para la elaboración del trabajo de graduación se realizó la preparación de los micronutrientes a través de la molienda y tamizado para asegurar que el tamaño de partícula fuera igual o menor a 0.125 mm y se utilizó una mezcladora tipo tambor con aspas internas para la realización de las pruebas de mezclas físicas durante 1 minuto. Para la determinación de los porcentajes máximos de adherencia individuales se realizaron pruebas en las que se agregaba a 1 kilogramo de nitrato de

amonio los sulfatos de cinc, cobre y manganeso al 3% m/m y, octoborato de sodio al 6% m/m. Una vez determinados los porcentajes de cada uno, se realizaron pruebas con una mezcla de micronutrientes al 10% m/m.

Para comprobar la efectividad de los adherentes A, B y C nuevamente se realizaron pruebas individuales de mezclado simple entre nitrato de amonio y los metales de manganeso, cobre, cinc y boro para determinar el volumen en mililitros de cada uno por kilogramo de fertilizante necesarios para adherir las sales. El mezclado se realizó en tres etapas, cada una por 1 minuto: primero se colocó 1 ml de adherente con un gotero al nitrato de amonio, luego se agregó la sal y por último el resto de adherente mililitro por mililitro, midiendo el porcentaje de polvos no adheridos y adheridos con cada adición volumétrica. A partir de la comparación entre los volúmenes de los adherentes A, B y C por kilogramo de fertilizante nitrogenado para cada metal, se determinó el más efectivo para la adherencia de una mezcla de micronutrientes al 6% m/m.

Las muestras del producto final fueron enviadas al laboratorio para la cuantificación de la concentración de los elementos adheridos por medio de espectroscopia de absorción atómica. Y se enviaron a analizar muestras de tierra negra luego de haber aplicado el fertilizante nitrogenado recubierto con adherentes y micronutrientes para analizar la liberación de micronutrientes en el suelo. Para evaluar la vida de anaquel de las muestras estas fueron almacenadas en empaques con sello hermético, en ambientes libres de humedad y techados. Desde el momento de su mezclado hasta finalizadas las pruebas para determinar el porcentaje de polvos segregados con el tiempo. Fueron tamizadas nuevamente una por una para la determinación del peso de polvo segregado. Por último, se calculó el costo incremental que representa la producción del producto terminado por el uso del molino y adición de adherentes.

Se determinó que los micronutrientes que poseen alta adherencia individual sin adherentes son el octoborato de sodio y sulfato de cobre. Y que el sulfato de manganeso y de cinc poseen una muy baja adherencia individual. Ya que se necesitaba alcanzar un porcentaje de adherencia mayor al 90% por control de calidad, se evaluaron tres adherentes y se comprobó la efectividad de cada uno al aumentar los porcentajes de adherencia máxima individual por arriba del 95%. Al igual que con una mezcla física de todos los micronutrientes obteniendo rendimientos mayores al 97% de adherencia.

La segregación promedio al final del periodo de almacenamiento aumentó en menos de un 1% m/m. Finalmente se comprobó la liberación de los elementos al suelo a partir de un análisis de suelos, al observar un aumento en los niveles de cada uno tras la aplicación del fertilizante a una dosis comercial. Y un costo incremental que va desde \$30 a \$70 por tonelada métrica.

II. OBJETIVOS

A. General

Evaluar el proceso de adherencia de micronutrientes en fertilizante nitrogenado al mezclar nitrato de amonio con las materias primas de octoborato de sodio, sulfato de cinc, sulfato de manganeso y sulfato de cobre junto con agentes adherentes a su superficie para aumentar la eficiencia de distribución homogénea del producto final en anaquel.

B. Específicos

1. Determinar porcentajes máximos de adherencia de microelementos boro, cinc, cobre y manganeso en partículas de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple sin adición de adherentes por medio de la técnica de mezcla a granel en fertilizantes granulares.
2. Evaluar la efectividad de productos adherentes para recubrir partículas de fertilizante de nitrato de amonio con micronutrientes boro, cinc, cobre y manganeso para mejorar su distribución en una mezcla física de fertilizantes por medio de la técnica de recubrimiento en fertilizantes granulares.
3. Evaluar las características finales del fertilizante nitrato de amonio recubierto con micronutrientes a partir de la segregación, porcentaje de polvo, vida de anaquel, costo incremental y liberación de micronutrientes en suelo para incrementar su calidad como producto final.

III. JUSTIFICACIÓN

Las plantas toman los nutrientes que necesitan del aire (carbono y oxígeno) y suelo (todos los demás nutrientes minerales, incluido el agua). El crecimiento se ve limitado cuando existe una deficiencia de alguno de los nutrientes necesarios debido a que cada uno contribuye con una o varias funciones. A través de los fertilizantes eficientes se puede aumentar el rendimiento de los cultivos, especialmente cuando estos incluyen todos los elementos esenciales para las plantas. Tradicionalmente, los fertilizantes incluyen solamente los macronutrientes (nutrientes que se necesitan en mayores cantidades) y carecen de micronutrientes (nutrientes que son absorbidos en pequeñas cantidades). Estos micronutrientes son comúnmente deficientes, y por las pequeñas cantidades en las que se requieren, la forma de aplicación es ineficiente y costosa. Estos son el manganeso, cinc, cobre, boro, hierro, molibdeno y cloro.

La fertilización equilibrada significa proveer al suelo los nutrientes primarios, secundarios y micronutrientes en las cantidades que se necesiten. Uno de los métodos de adición de estos microelementos es a partir de su adherencia a fertilizantes granulados. El nitrato de amonio es un fertilizante simple, por contener únicamente al nitrógeno como nutriente primario. Entre sus características principales está su higroscopicidad, propiedad que le permite adherir a sus superficies partículas de polvo sin causar heterogeneidad.

La segregación o separación de componentes en una mezcla conllevan a una distribución heterogénea. Es por esta razón que diseñar un proceso de adherencia de micronutrientes es necesario para disminuir estas problemáticas y aumentar la calidad del producto final. Conocer el porcentaje máximo de adherencia de cada microelemento y el uso de un recubrimiento compatible con la mezcla, es importante para obtener un producto de calidad. La calidad del producto se determina tras añadir al suelo el fertilizante multinutriente con adherente, y se espera que pueda aumentar su aprovechabilidad al liberar los micronutrientes dentro de cada gránulo por difusión en las proporciones adecuadas conforme a la cantidad añadida.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Fertilizantes:

Sustancias naturales o industrializadas, orgánicas o inorgánicas, que contienen al menos cinco por ciento de uno o más nutrientes esenciales para las plantas. Normalmente se categorizan solo los nutrientes primarios que son fósforo, nitrógeno y potasio. Sin embargo, existen también aquellos que proporcionan elementos secundarios (calcio, magnesio y azufre) y micronutrientes (boro, hierro, cobre, manganeso, cinc, cloro y molibdeno) (UN, 1998).

Los fertilizantes químicos son productos manufacturados que contienen cantidades de uno o más nutrientes primarios. Puede involucrar reacciones químicas o refinación de fertilizantes naturales. Estos últimos se obtienen de depósitos o yacimientos naturales. Su calidad física está determinada por el tamaño de sus partículas, densidad, dureza, resistencia a la humedad y ambiente, libertad de apelmazarse, recubrimiento y la capacidad de liberar los elementos a las plantas en un estado aprovechable (Guerrero, s.f).

B. Nutrientes del suelo:

Pueden clasificarse según las cantidades que son absorbidas por las plantas de la siguiente manera:

1. Clasificación de los nutrientes:

a. Macronutrientes:

Son necesarios en grandes cantidades. Un suelo puede ser deficiente en estos o ser empobrecido por los cultivos con el tiempo. Existen tres elementos primarios que son el nitrógeno, fósforo y potasio. Y los secundarios son el magnesio, azufre y calcio (UN, 1998).

b. Micronutrientes:

O microelementos, son requeridos en cantidades más pequeñas y su disponibilidad en el suelo depende de su reacción con los componentes del suelo (fase mineral y orgánica). Estos son el molibdeno, cloro, hierro, manganeso, cinc, cobre y boro (UN, 1998).

2. Función de cada nutriente:

El nitrógeno es absorbido por el suelo como nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Este favorece la absorción del resto de nutrientes. Junto con los carbohidratos forma aminoácidos y proteínas. El fósforo es importante para la fotosíntesis y procesos químico-fisiológicos. El potasio activa enzimas, mejora el régimen hídrico y es necesario para la síntesis de carbohidratos y proteínas (UN, 1998).

El magnesio es constituyente de la clorofila. Y está presente en reacciones enzimáticas relacionadas a la transferencia de energía de la planta. El azufre es parte de las proteínas y ayuda a la formación de clorofila. El calcio es un constituyente del tejido celular (UN, 1998).

El molibdeno es absorbido por las plantas en la forma de anión molibdato (MoO_4^{2-}) y tiene su función en las enzimas de nitrato reductasa y nitrogenasa. El cloro como anión cloruro (Cl^-) y se encarga de la evolución del oxígeno en la fotosíntesis y mantener la presión osmótica de la célula. El hierro predomina como catión ferroso (Fe^{+2}) y activa varias enzimas, se encarga de la respiración, reducción de nitratos y sulfatos, y la asimilación de nitrógeno (Gowaritker, *et al*; 2009).

El manganeso se absorbe como catión (Mn^{+2}) y tiene un rol en la fotosíntesis, separación del agua e inactivación de varias enzimas. El cinc como catión (Zn^{+2}) este se encarga de síntesis de proteínas y formación de almidón. El cobre también como catión (Cu^{+2}) está detrás de la formación de lignina, metabolismo de carbohidratos y proteínas, y la activación catalítica de algunas enzimas. Y el boro se absorbe como disociado y no disociado (H_4BO_3) y se encarga del desarrollo de raíces, división celular, pared celular, germinación de polen y crecimiento, entre otros (Gowaritker, *et al*; 2009).

3. Micronutrientes:

Los microelementos son esenciales para el crecimiento de la planta. Existen cuatro fuentes: inorgánicos, quelatos sintéticos, naturales o complejos orgánicos y producto de vidrio (frits). Los inorgánicos incluyen óxidos, carbonatos, boratos, molibdatos y sales metálicas como sulfatos, nitratos y cloruros. Los quelatos se forman por la combinación de un agente quelante con un metal por un enlace coordinado. Su estabilidad afecta la disponibilidad del micronutriente a la planta (cobre, hierro, manganeso y cinc). Su efectividad en cultivos por unidad de micronutriente es de dos a cinco veces mayor que los inorgánicos. Pero su costo es de cinco a cien veces mayor (UN, 1998).

Los complejos orgánicos naturales se forman por la reacción entre sales metálicas con subproductos orgánicos de la industria forestal o pulpas. Ejemplo son lignosulfonatos, fenoles y poliflavonoides. Aunque son menos costosos que los quelatos, no son igual de efectivos. Y las frits son productos vidriosos donde su solubilidad se controla por el tamaño de partícula y la composición porcentual. Es una medida correctiva en suelos deficientes y no son muy usuales en el mercado (UN, 1998).

Algunos pueden ser tóxicos en cantidades altas. Como el boro que puede tener un efecto no deseado en la cosecha (UN, 1998). Existe un rango muy corto entre la deficiencia y toxicidad de boro en el suelo. Las regiones volcánicas de Guatemala presentan un bajo contenido de boro. Afectando los cultivos que crecen en estos suelos y su calidad (Terraza, 2018).

También puede ser que, a niveles bajos de pH, presenten toxicidad como el manganeso. Su deficiencia en el suelo es causada en su mayoría por un pH ácido o alcalino. Existen complejos de componentes orgánicos de hierro, cinc, manganeso y cobre llamados quelatos. Y aumentan la eficiencia de aplicación de micronutrientes, en especial la del hierro que se absorbe mejor en forma quelatada. El siguiente cuadro muestra fertilizantes portadores de micronutrientes (UN, 1998).

Cuadro 1. Fertilizantes portadores de micronutrientes.

Portador de micronutrientes	(fórmula)	Micronutrientes
Sulfato ferroso	FeSO ₄ .7H ₂ O	Hierro (Fe)
Sulfato de cobre	CuSO ₄ .5H ₂ O	Cobre (Cu)
Sulfato de zinc	ZnSO ₄ .7H ₂ O	Zinc (Zn)
Sulfato de manganeso	MnSO ₄ .7H ₂ O	Manganeso (Mn)
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	Boro (B)
Molibdato de sodio	Na ₂ MoO ₄ .10H ₂ O	Molibdeno (Mo)

(FAO, s.f).

El siguiente cuadro muestra porcentajes mínimos sugeridos de micronutrientes garantizados según la *Association of American Plant Food Control Officials* (AAPFCO).

Cuadro 2. Porcentajes mínimos sugeridos de micronutrientes y cantidades aplicadas a fertilizadas en rangos recomendados.

Elemento	Garantía mínima (%)¹	Fertilizante (kg/ton)	Cantidad de elemento que debiera agregarse junto con el fertilizante a 500 kg/ha (kg)	Rango de cantidades recomendadas (kg/ha)²
B	0.02	0.2	0.1	0.5-4
Cu	0.05	0.5	0.25	5-20
Fe	0.10	1	0.5	-
Mn	0.05	0.5	0.25	5-20
Mo	0.0005	0.005	0.0025	0.03-0.12
Zn	0.05	0.5	0.25	3-15

(Silverberg *et al*; 1977).

¹Assoc. of American Plant Food Control Officials (AAPFCO).

² De fuentes inorgánicas como sulfatos u óxidos finamente molidos.

Cuadro 3. Efectividad de aceites y ceras adherentes para el recubrimiento de fertilizantes granulares con micronutrientes.

Fuente y adherente de micronutriente				Componentes del fertilizante	Grado del fertilizante (N-P-K)	Adherente (%)	Adherencia inmediata	
Identificación	Tamaño de partícula (malla)	Tasa de adición					Con adherente (%)	Sin adherente (%)
		Como fuente (%)	Como elemento (%)					
Fuel oil No. 2								
Na ₂ B ₄ O ₇ .H ₂ O	-48	7.0	1.0 B	(NH ₄) ₂ HPO ₄	18-20-0	2.0	30	10
Na ₂ B ₄ O ₇ .H ₂ O	-150	7.0	1.0 B	(NH ₄) ₂ HPO ₄	18-20-0	2.0	90	40
ZnO, MnO	-100	12.5	3.8 Zn, 3.8 Mn	APN, (NH ₄) ₂ HPO ₇ , KCl	16-7-13.3	3.0	98(95)	40
Mezcla comercial	-48	4.4	1.7 mezcla	APN, CSP, KCl	20-4.4-8.3	3.0	92(76)	0
Aceite de motor usado								
MnSO ₄ .H ₂ O	-200	10.7	3.0 Mn	Gran N-P-K	6-5.2-10	3.0	99(81)	7
MnSO ₄ .H ₂ O	-100	5.6	2.0 Zn	NH ₄ NO ₃ , (NH ₄) ₂ HPO ₄ , KCl	14-6.1-11.6	2.0	100	18
Frit comercial	-100	6.0	2.2 mezcla	Gran N-P-K	6-5.2-10	3.0	99(46)	21
Zn EDTA	-100	1.4	0.2 Zn	APN, (NH ₄) ₂ HPO ₄ , KCl	17-7.4-14	0.5	99	34
Zn EDTA	-100	7.1.	1.0 Zn	APN, (NH ₄) ₂ HPO ₄ , KCl	17-7.4-14	1.5	99	34
Fuel oil No. 6: Fuel oil No. 2 (1:2)								
ZnO, MnO	-100	6.8	2.0 Zn, 2.0 Mn	Gran N-P-K	12-10.5- 14.9	1.5	100(100)	-
Frit comercial	-100	6.0	2.2 mezcla	Gran N-P-K	12-15.7-10	1.5	96(96)	-
Cera microcristalina: Fuel oil No. 2 (1:2)								
ZnSO ₄	-100	5.6	2.0 Zn	NH ₄ H ₂ PO ₄	13-23.3-0	2.4	100(100)	-
ZnSO ₄	-100	12.2	4.4 Zn	APP	15-26.4-0	5.0	100(100)	-

(Silverberg *et al*; 1977).

C. Fertilización equilibrada:

Las plantas necesitan de una dieta equilibrada de nutrientes para evitar enfermedades y suelos agotados. Se debe buscar un pH óptimo a través de cálcica o yeso en suelos alcalinos, suministrar materia orgánica, agua y una equilibrada fertilización. Los nutrientes primarios, secundarios y micronutrientes no pueden ser sustituidos por otros. Su limitación y cantidad afecta el rendimiento y calidad de crecimiento (UN, 1998).

El uso integrado de fertilizante provee los nutrientes en cantidades y proporciones equilibradas durante el periodo que las plantas lo necesiten. Su aplicación heterogénea significa contaminación en lugares donde se ha aplicado mayor cantidad. Y una reducción en rendimiento en los espacios donde menos (UN, 1998).

D. Fertilizantes granulados:

Estos están formulados con ciertos porcentajes de nutrientes primarios en cada gránulo y se les llaman fertilizantes NPK. Expresados en términos de nitrógeno elemental, pentóxido de fósforo y óxido de potasio. Entre sus características se mencionan su tamaño consistente y su granular estable. El diámetro puede variar entre 2 y 4 milímetros (Guerrero, s.f).

Los elementos secundarios y microelementos también se expresan en base elemental como el nitrógeno. El calcio y magnesio como óxidos. Sin embargo, no siempre es este el estado químico del elemento en el abono (Gowaritker, *et al*; 2009).

La granulación puede obtenerse por agregación de partículas pequeñas, fraccionamiento, tamizado y control de tamaño de cristal en la cristalización (Guerrero, s.f).

E. Producción de fertilizantes:

La presentación del fertilizante varía dependiendo de su fabricación. La mayoría de ellos es sólida, sin embargo, existen presentaciones líquidas y gaseosas. Pueden tener distintos tamaños y formas si son gránulos, perlados, cristales, píldoras, polvo grueso, compactado o fino (Guerrero, s.f).

Su calidad se determina por el tamaño de sus partículas que se evalúa por tamizaje, su densidad, dureza, peso específico, resistencia a la humedad, daño físico y apelmazare. Si son de alta calidad poseen un recubrimiento (Guerrero, s.f).

Su grado es determinado por la presencia de uno o más nutrientes primarios. Si solo está conformado por uno se denomina *simple*. Si posee dos o tres, *binarios* y *ternarios* y se les denomina multinutrientes (UN, 1998).

Entre los simples se encuentra el nitrato de amonio, que posee de 27 a 34 por ciento de nitrógeno como amoníaco y como nitrato. Es preferible en regiones semiáridas. El siguiente cuadro muestra las composiciones porcentuales de fertilizantes simples y multinutrientes (UN, 1998).

Cuadro 4. Composiciones porcentuales de nutrientes primarios en fertilizantes simples y multinutrientes.

Nombres comunes (fórmulas)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S
Fertilizantes nitrogenados					
Sulfato amónico (NH ₄) ₂ SO ₄	21	0	0	-	23
Nitrato amónico NH ₄ NO ₃	33-34,5	0	0	-	-
Nitrato amónico-cal NH ₄ NO ₃ +CaCO ₃ (nitrato amónico-cálcico)	20,5-26	0	0	-	-
Urea CO(NH ₂) ₂	45-46	0	0	-	-
Nitrosulfato amónico NH ₄ NO ₃ · (NH ₄) ₂ SO ₄	26	0	0	-	15
Fertilizantes fosfatados					
Superfosfato simple Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + CaSO ₄	0	16-20	0	-	12
Superfosfato triple o concentrado Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0	46	0	-	-
Fosfato de roca molido (fosfato mineral)	0	20-40	0	-	-
Fertilizantes potásicos					
Muriato o cloruro potásico KCl	0	0	60	-	-
Sulfato potásico K ₂ SO ₄	0	0	50	-	18
Sulfato potásico - magnésico K ₂ SO ₄ · 2MgSO ₄	0	0	26-30	5-7	16-22
Fertilizantes de magnesio					
Kieserita MgSO ₄ · 7H ₂ O	-	-	-	16	22
Kieserita calcinada MgSO ₄ · H ₂ O	-	-	-	20	27
Fertilizantes azufrados					
Todos los fertilizantes conteniendo S como anión	-	-	-	-	según fórmula
Yeso CaSO ₄ · 2H ₂ O	-	-	-	-	16-18
Algunos fertilizantes de importancia regional					
Nitrato sódico NaNO ₃	16	0	0	-	-
Fosfato di-cálcico Ca(HPO ₄)	0	35-42	0	-	-
Escoria Thomas	0	16-20	0	1-3	-

(Guerrero, s.f).

Entre los métodos de producción de fertilizantes granulados se encuentran:

1. Granulación química:

Es el proceso más complejo y el más utilizado. Se utiliza para producir grados finales de fertilizantes NPK o compuestos intermedios que pueden ser utilizados para producir los grados finales NPK. El objetivo es producir fertilizantes con un contenido específico de nutrientes en forma consistente y confiable. Y evitar que el material se endurezca en los sacos al almacenarlos y transportarlos, para que lleguen de forma adecuada al agricultor. Actualmente, el 80% de los fertilizantes se transportan a granel y este método asegura que el material fluya libremente para facilitar su carga y descarga. Además de minimizar el endurecimiento durante el transporte y almacenamiento. Y que los gránulos resistan el manejo sin romperse (Taylor, 1992).

Esta se logra al juntar sólidos, líquidos y/o gases causando la reacción química que permite alcanzar un estado estable de aglomeración y un crecimiento controlado de partículas. Cantidades y magnitud de reacción varían con los procesos, materia prima y productos. Pero el resultado es siempre un gránulo de tamaño y nutrientes consistentes (Taylor, 1992).

Entre sus ventajas se encuentran que todos los ingredientes se incorporan en proporción determinada. Y se producen gránulos de alta calidad con buenas características físicas. Como desventajas se encuentra la necesidad de complejos industriales grandes y costosos. Para que sea rentable deben estar cerca de las industrias que fabrican la materia prima. La producción es tan grande que el mercado debe ser internacional (Taylor, 1992).

2. Granulación al vapor:

En este método se utilizan sólidos en polvo o material fino. Estos se mezclan en proporciones para alcanzar concentraciones requeridas de nutrientes. Luego se introducen en el granulador con vapor o agua que provee la fase líquida, calor y plasticidad para que se aglomere y forme los gránulos. Por último, para por un secador de tambor giratorio para su clasificación por tamaño y almacenamiento (Taylor, 1992).

3. Compactación:

Este método utiliza fuerza mecánica para formar gránulos a partir de partículas pequeñas o polvo. El proceso de compactación es una granulación en seco. No existe medio líquido ni reacción química. La compatibilidad química es importante (Taylor, 1992).

4. Mezcla física:

En este método ocurre una mezcla sin reacciones químicas ni aumento en el tamaño de las partículas. Es necesario que la materia prima sea granular o compactada y que sea pesada adecuadamente. Se espera que el producto final posea características como que fluya libremente, tenga un contenido correcto de nutrientes y que no se segregue. Es importante que las partículas tengan el mismo tamaño y que haya poca intervención humana en el producto al colocarlo en sacos (Taylor, 1992).

Entre sus ventajas se encuentran que las plantas son más fáciles de operar y construir. El costo de producción es menor. Hay flexibilidad en el cambio de formulaciones y paros de las líneas. Se pueden realizar mezclas de calidad siempre que la materia prima sea compatible y de tamaños iguales. Entre las desventajas está que el tipo de fertilizantes a usar es limitado y puede existir segregación (Taylor, 1992).

F. Elaboración de mezclas:

Para poder ser mezclados los fertilizantes deben ser compatibles química y físicamente. Químicamente, para evitar apelmazamiento debido a la higroscopicidad o pérdidas gaseosas de amoníaco. Y de manera física en cuanto al tamaño de granulación y densidad para evitar su segregación. Esto es fundamental en un equipo centrífugo. La siguiente figura muestra las compatibilidades entre los distintos compuestos de fertilizantes (Gowariker, *et al*; 2009).

Fertilizante	Urea	Nitrato de amonio	Sulfato de amonio	Nitrato de calcio	Nitrato de potasio	Cloruro de potasio	Sulfato de potasio	Fosfato de amonio	Sulfatos de Fe, Zn, Cu, Mn	Quelatos de Fe, Zn, Cu, Mn	Sulfato de magnesio	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Ácido nítrico
Urea	Verde													
Nitrato de amonio	Verde	Verde						Verde						
Sulfato de amonio	Verde	Verde	Verde					Verde	Verde					
Nitrato de calcio	Verde	Verde	Verde	Verde				Verde	Verde	Verde				
Nitrato de potasio	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde			Verde	Verde	Verde				
Cloruro de potasio	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		Verde	Verde	Verde				
Sulfato de potasio	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde			
Fosfato de amonio	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		
Sulfatos de Fe, Zn, Cu, Mn	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		
Quelatos de Fe, Zn, Cu, Mn	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		
Sulfato de magnesio	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		
Ácido fosfórico	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		
Ácido sulfúrico	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde		
Ácido nítrico	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	

Figura 1. Matriz química de compatibilidad entre fertilizantes.

(Agroproductores, 2016-2020).

El fertilizante puede ser de mezcla física o mecánica de dos o más materiales, sin reacción química. Un ejemplo es la mezcla fosfato diamónico (83.3%) y cloruro de potasio (16.7%), que resulta en el fertilizante compuesto de grado 15-38-10. O fertilizante complejo que resulta de una reacción química (Gowariker, *et al*; 2009).

1. Técnica *Bulk blending* o mezcla a granel:

Se define como la práctica de agregar nutrientes secundarios o micronutrientes a los fertilizantes granulados como fosfatos y fertilizantes de potasio. Su ventaja es que puede producirse un grado de fertilizante recomendado. Su desventaja es la segregación que puede ocurrir durante el mezclado y almacenamiento. Para reducirlo el tamaño de partícula debe ser similar en el caso de utilizar materia prima granular (Peacock y Johnston, 2015).

Según la Asociación Europea de Mezcladoras de Fertilizantes (2016:17). Los micronutrientes pueden adicionarse a la mezcla de fertilizante de manera granular o como polvo. La homogeneidad en la distribución es importante. Si el micronutriente representa menos del 5% del peso total, este no debe ser granulado. En estos casos es recomendable usar polvos con un adherente que asegure la adherencia a los gránulos de fertilizante primario. También podrían agregarse como una solución en forma de spray. Entre los agentes más adecuados están los aceites con alta viscosidad, soluciones UAN (de urea y nitrato de amonio) y agua. Si el fertilizante es nitrato de amonio no pueden utilizarse los aceites.

Según Kenya Bureau of Standards (2014:7) los micronutrientes deben tener un tamaño de partícula muy fino para ser efectivos. Si representan más del 5% del peso total de la formulación entonces deben ser granulados del mismo tamaño que el fertilizante principal.

Para llevar a cabo la mezcla de manera exitosa se puede usar cualquier tipo de mezcladora ordinaria. Sin embargo, Silverberg (1977:14) menciona que la más satisfactoria es de tambor giratorio. Se debe empezar mezclando el fertilizante con los micronutrientes finamente molidos y tamizados. Las partículas deben tener diámetros menores a 0.149 mm o que pasen por un mesh No. 100 o de menor número. Luego se adiciona el material líquido como spray o por una perforación en la mezcladora mientras está en agitación. Por último, se debe dejar mezclar otro periodo de tiempo corto. También recomienda adicionar una pequeña cantidad de adherente previo a la mezcla seca para mejores resultados. Adicionarlo completamente antes que los polvos resulta en una mala distribución.

Los parámetros de comparación son los del cuadro 3. Efectividad de aceites y ceras adherentes para el recubrimiento de fertilizantes granulares con micronutrientes, de la columna adherencia inmediata sin coadyuvante. Comparando con los porcentajes reportados, para el fosfato diamónico ($(NH_4)_2PO_4$), de los micronutrientes de interés.

2. Técnica *coating* o de recubrimiento:

Esta técnica decrece el problema de segregación. Pero algunas veces el adherente pierde su propiedad durante el almacenamiento y traslado. Los micronutrientes luego de ser finamente molidos y tamizados. Deben ser aplicados como recubrimientos superficiales al fertilizante granulado durante el mezclado junto con un adherente o coadyuvante previniendo la segregación. Según Silverberg (1977:5), una recomendación es la de adicionar una pequeña cantidad de aglutinante primero y luego de agregar los micronutrientes, el resto.

G. Propiedades físicas y químicas de los compuestos a utilizar:

1. Nitrato de amonio:

- a. Fórmula química: NH_4NO_3
- b. Nitrógeno: 34.4%
- c. Nitrógeno amoniacal: 50.0%
- d. Nitrógeno nítrico: 50.0%
- e. Aspecto: gránulos o perlas blancos o amarillentos con olor ligeramente amoniacal
- f. Punto de fusión: 442 K (168.85 °C)
- g. Punto de ebullición: 483 K (209.85 °C)
- h. Punto de descomposición: 483 K (209.85 °C)
- i. Densidad: 830-1100 kg/m³
- j. Solubilidad:
 - 0 °C – 118.30 g/100 g
 - 20 °C – 190 g/100 g
 - 80 °C – 576 g/100 g
- k. Higroscopicidad:
 - 20 °C – 33.10
 - 30 °C – 40.60
 - 40 °C – 47.50
- l. pH: >4.5
- m. Contenido de nitrógeno (N): 34.4 %
- n. Contenido amoniacal (NH_4^+): 17.2 %
- o. Contenido nítrico (NO_3^-): 17.2%
- p. Granulometría: 2-4 mm

(Conforti y Romo, 2016).

q. Medidas de seguridad

No es combustible, comburente, favorece la formación de incendios, posible descomposición explosiva al calentarse, fuego puede provocar óxidos de nitrógeno, gases nitrosos y amoníaco. Se debe reprimir los gases, vapores o neblinas con agua pulverizada (Merck, 2020).

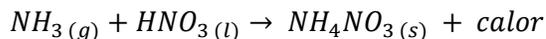
No derramar el producto en alcantarillas. Recoger en seco y eliminar residuos. Aclarar. Evitar la formación de polvo (Merck, 2020).

Para su almacenamiento que sea en un envase cerrado, lejos de la luz y sustancias inflamables o fuentes de ignición y calor (Merck, 2020).

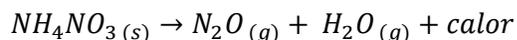
Reacciones de doble descomposición con sales como KCl. Libera amoníaco en presencia de sales alcalinas. En presencia de materia orgánica, aceite, ciertos metales, fósforo y azufre puede provocar explosiones (Conforti y Romo, 2016). Entre sus indicaciones de peligro se encuentran que puede agravar un incendio por ser comburente y provoca irritación ocular (Merck, 2020).

Se debe evitar golpes, dejar espacio entre sacos, evitar exponerlos al sol, fuego o calor, almacenarlos lejos de corriente eléctrica, tubos de vapor, radiadores, material explosivo, ácidos y material altamente oxidable o inflamable. No debe mezclarse con urea (Haifa y Brometan, 2007). Tiene riesgo de explosión con metales alcalinos, cloruro de amonio, sustancias inflamables, ésteres, aceites, hidrocarburos, aluminio en polvo, azufre, hipoclorito de sodio, leña, azúcar, ácido hipocloroso (Merck, 2020).

El nitrato de amonio (NH_4NO_3) se obtiene a partir de una neutralización ácido base entre ácido nítrico (HNO_3) en estado líquido y amoníaco (NH_3).



Esta reacción es exotérmica. A temperaturas mayores a 200 °C el nitrato de amonio empieza a descomponerse generando gases tóxicos de óxido de nitrógeno.



A temperaturas mayores a 260 °C se produce una explosión violenta que libera gases y calor.

El nitrato de amonio es higroscópico a temperatura ambiente y tiene un valor crítico de humedad relativa más alto que sales comunes. También posee una alta solubilidad en agua. Es por esto que se almacena en bolsas selladas (Conforti y Romo, 2016).

2. Sulfato de manganeso monohidratado:

- a. Fórmula química: $MnSO_4 \cdot H_2O$
- b. Manganeso: 31.8%
- c. Peso molecular: 169.01 g/mol
- d. Aspecto: Polvo/cristales rosa pálido inodoro
- e. Punto de fusión: >449 °C (sustancia anhidra)
- f. Punto de ebullición: No aplica
- g. Punto de descomposición: 1124 °C
- h. Densidad: 2950 kg/m³ (20 °C)
- i. Densidad aparente: 1000-1200 kg/m³
- j. Solubilidad: 762 g/L
- k. Granulometría: <0.25 mm
- l. pH: 3.0-3.5
- m. Incompatibilidad: agentes oxidantes fuertes, polvos metálicos

(Merck, 2020).

3. Sulfato de cinc monohidratado:

- a. Fórmula química: $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- b. Cinc: 35.0%
- c. Peso molecular: 179.45 g/mol
- d. Aspecto: Polvo/cristales blanco inodoro
- e. Punto de fusión: No aplica
- f. Densidad: 3200 kg/m³ a 20 °C
- g. Solubilidad: 350 g/L a °C
- h. Granulometría: 1-4 mm
- i. pH: 4.0-5.6
- j. Incompatibilidad: bases fuertes

(Merck, 2020).

4. Octoborato de sodio tetrahidratado-bórax-solubor:

- a. Fórmula química: $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- b. Boro: 20.5%
- c. Peso molecular: 412.52 g/mol
- d. Aspecto: polvo blanco inodoro
- e. pH: 8.3 a 23 °C
- f. Punto de ignición: Ninguno
- g. Punto de ebullición: No aplica
- h. Densidad: 480 kg/m³
- i. Solubilidad: 9.5% a 20 °C

(UNE AGRO, 2020).

5. Sulfato de cobre pentahidratado:

- a. Fórmula química: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- b. Peso molecular: 249.68 g/mol
- c. Aspecto: sólido cristalino azul
- d. Punto de fusión: 147 °C
- e. Densidad: 2284 kg/m³
- f. pH: 3.5-4.5
- g. Solubilidad 317 g/L (20 °C)

(Merck, 2020).

H. Ciclo de nitrógeno:

El nitrógeno llega al suelo a partir de la fijación de la molécula de nitrógeno por microorganismos y por el retorno de nitrato (NO_3^-) y amoníaco (NH_3) en la lluvia. Las pérdidas ocurren por la cosecha de cultivos, lixiviación y volatilización. Es por la fijación biológica del nitrógeno que este se convierte en sus derivados a través de la mineralización (Stevenson, 1986).

La conversión de nitrógeno molecular a amoníaco se denomina amonificación y nitrificación a la del nitrato. Su uso por las plantas y microorganismos constituye la inmovilización y asimilación. Y a través de la desnitrificación es retornado a la atmósfera como nitrógeno molecular (Stevenson, 1986).

También se obtiene amoníaco y nitrito (NO_2^-) a partir de la descomposición microbiana. Y son capaces de reaccionar con sustancias orgánicas para producir los gases de nitrógeno. A través de la asociación de material húmicos con minerales, se forman los complejos organominerales. El ión amonio (NH_4^+) pasa por reacciones de sustitución con otros cationes y puede ser fijado por minerales arcillosos. La siguiente figura muestra el ciclo de nitrógeno y la interacción entre la atmósfera y el suelo durante este (Stevenson, 1986).

I. Propiedades físicas de los fertilizantes:

Determinan la efectividad del fertilizante, condiciones de aplicación, transporte y almacenamiento. El resultado de inadecuadas propiedades físicas es la compactación, segregación y excesiva higroscopicidad (Guerrero, s.f).

a. Granulometría:

Es la determinación del tamaño de partículas y su distribución. Se analiza en laboratorios de control de calidad en las industrias productoras. Varía de un producto a otro. Los abonos con baja solubilidad deben tener un tamaño de partícula fino para su adecuada utilización. Sin embargo, esta finura dificulta su manejo. En los de alta solubilidad, la tasa de disolución está relacionada inversamente con el tamaño de partícula (Guerrero, s.f).

b. Consistencia del gránulo:

Se refiere a la estabilidad mecánica para mantener una consistencia estable durante su manipulación. Existen diversos tipos como resistencia: al rompimiento, abrasión y al impacto. El compactamiento y material polvoso puede atenuarse con un buen nivel de consistencia (Guerrero, s.f).

c. Densidad aparente:

Se define como el peso del producto por unidad de volumen a granel. Y se considera para el cálculo del tamaño de los empaques, determinar la capacidad del almacenamiento y transporte, y calibración de dosificadores volumétricos (Guerrero, s.f).

d. Humedad relativa crítica:

Es la humedad atmosférica por encima de la cual el compuesto empieza a absorberla. Es preferible un fertilizante con una elevada humedad ya que ello permite que el material pueda ser expuesto sin que se humedezca y se compacte (Guerrero, s.f).

El tipo de empaque se debe escoger como un grado de protección a la humedad. La pila a granel normalmente es protegida con una cubierta plástica que excluye efectivamente la humedad. Esta propiedad física se ve afectada en mezcla (Guerrero, s.f). La siguiente figura muestra el porcentaje de absorción de agua de fertilizantes comunes a 25 °C conforme al porcentaje de humedad relativa.

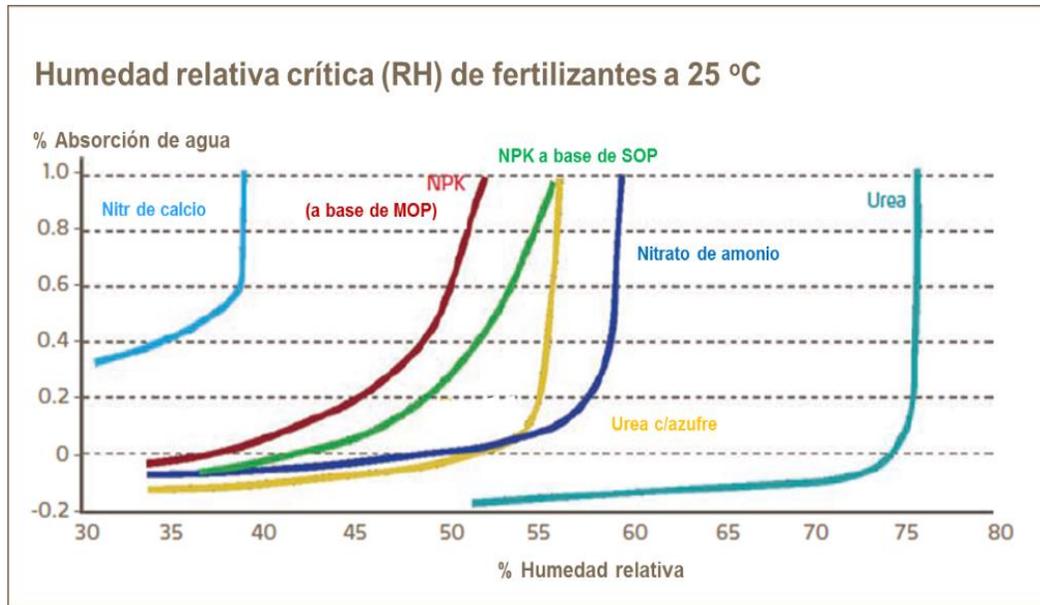


Figura 2. Humedad relativa de fertilizantes comunes a 25 °C.

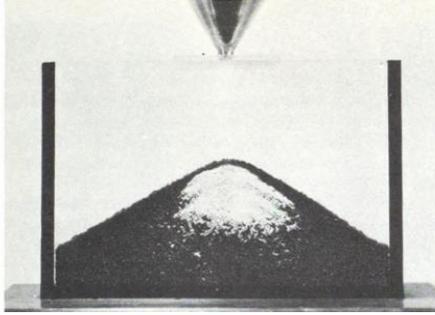
(Guerrero, s.f).

J. Problemas físicos de los fertilizantes:

a. Segregación:

La segregación afecta la homogeneidad de la mezcla. Esta ocurre cuando partículas individuales del fertilizante difieren en propiedades físicas. Y responden diferente a procesos de almacenamiento y transporte (Guerrero, s.f).

Mientras más similitud presenten las propiedades físicas, menor es el grado de afectación de los procesos. El tamaño de partícula es una de las propiedades que más afecta. La densidad y forma no influyen significativamente. Los fertilizantes con la misma composición química pero que difieren en tamaño, experimentarán segregación sin afecta la uniformidad (Guerrero, s.f).

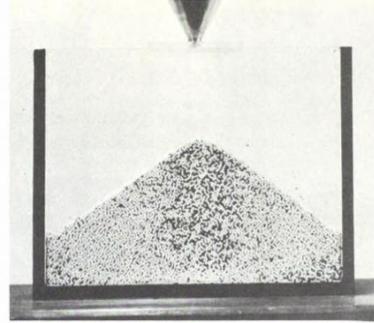


Mezcla A-tamaño diferente de partícula

Fertilizante: -6 +8 malla

Micronutriente: -20 malla

(El micronutriente (blanco) se segregó durante el vertido).

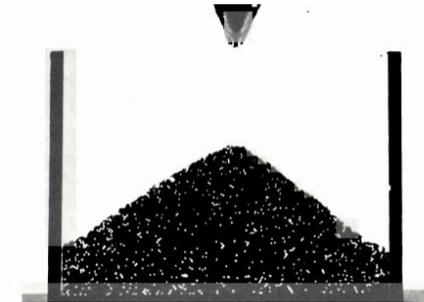


Mezcla C

Fertilizante: -6 +8 malla

Micronutriente: -10 +14 malla

(Severa segregación).



Mezcla B-mismo tamaño de partícula

Fertilizante: -6 +8 malla

Micronutriente: -6 +8 malla

(El vertido no ha causado segregación).



Mezcla D

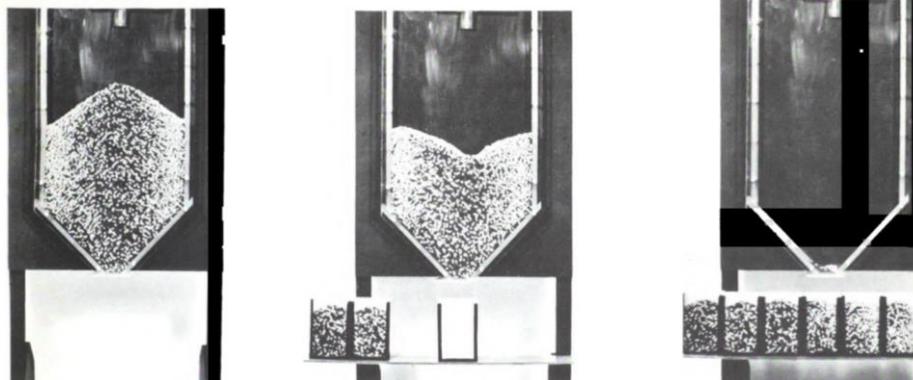
Fertilizante: -6 +8 malla

Micronutriente: -8 +10 malla

(La segregación aún es apreciable).

Figura 3. Segregación en mezclas de fertilizante y micronutrientes a distintos tamaños de partícula.

(Silverberg, *et al*; 1977).



A – Llenado de tolva

Los gránulos pequeños (negros) se segregaron por la forma cónica que se forma al llenarse.

B - Primeras empaques llenados

La porción central sale primero. Los primeros empaques contienen partículas pequeñas en exceso.

C – Llenado de tolva

Los últimos empaques contienen partículas muy grandes en exceso.

Figura 4. Técnica de observación de segregación en mezclas debido a la forma cónica que se forma.

(Silverberg, *et al*; 1977).

b. Compactación:

Es un fenómeno que se da durante el tiempo de almacenamiento del fertilizante. Se da por enlaces cristalinos que se desarrollan entre partículas, reacciones químicas internas o efectos térmicos. Los factores que influyen son: tamaño de partícula, consistencia, humedad, temperatura de almacenamiento, humedad relativa crítica (Guerrero, s.f).

Es común en fertilizantes finos o de baja consistencia. O cuando se empaca sin medir un periodo de secado. Para reducir este fenómeno se recomienda evitar compuestos incompatibles, secar adecuadamente, tamizar evitando presencia de polvos, almacenar sin compresión y utilizar acondicionadores (Guerrero, s.f).

K. Espectroscopia de absorción atómica para análisis elemental de fertilizantes:

La espectroscopia de absorción atómica es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para análisis elemental debido a su simplicidad, eficiencia y bajo costo relativo. La instrumentación consiste en una fuente de radiación que es una lámpara de cátodo hueco. Consiste en un ánodo de tungsteno y un cátodo cilíndrico fabricado a partir del metal analito sellados en un tubo de vidrio que contiene un gas inerte. Al aplicar una diferencia de potencial a través de los electrodos, el gas inerte se ioniza sus cationes y electrones migran hacia los electrodos generando una corriente. Los cationes chocan con el cátodo y expulsan átomos del metal para producir una nube atómica. En la expulsión los átomos se encuentran excitados y emiten sus longitudes de onda en lo que regresan a su estado basal. Existen lámparas de cátodo hueco para alrededor de 70 elementos (Skoog, 2015).

La absorción atómica de flama ofrece un medio sensible para la determinación de 60 a 70 elementos. La calibración a menudo usa estándares externos. Debido que las desviaciones en la linealidad ocurren con frecuencia. Se debe utilizar estándares cuyas absorbancias estén por debajo y encima de la absorbancia de la muestra. A continuación, se muestra un cuadro con los límites de detección para algunos metales. El boro no es uno de ellos, por lo cual se cuantifica el sodio que está presente en el octoborato de sodio (Skoog, 2015).

Cuadro 5. Límites de detección (ng/ml) para algunos elementos mediante espectroscopia de absorción atómica*.

Elemento	AA de flama	AA electrotérmica [†]	Emisión de flama	Emisión ICP	ICPMS
Ag	3	0.02	20	0.2	0.003
Al	30	0.2	5	0.2	0.06
Ba	20	0.5	2	0.01	0.002
Ca	1	0.5	0.1	0.0001	2
Cd	1	0.02	2000	0.07	0.003
Cr	4	0.06	5	0.08	0.02
Cu	2	0.1	10	0.04	0.003
Fe	6	0.5	50	0.09	0.45
K	2	0.1	3	75	1
Mg	0.2	0.004	5	0.003	0.15
Mn	2	0.02	15	0.01	0.6
Mo	5	1	100	0.2	0.003
Na	0.2	0.04	0.1	0.1	0.05
Ni	3	1	600	0.2	0.005
Pb	5	0.2	200	1	0.007
Sn	15	10	300	1	0.02
V	25	2	200	8	0.005
Zn	1	0.01	200	0.1	0.008

*Valores tomados de V. A. Fassel y R. N. Knisely, *Anal. Chem.*, **1974**, *46*, 1110A, DOI: 10.1021/ac60349a023; J. D. Ingle, Jr., y S. R. Crouch, *Spectrochemical Analysis*, Englewood Cliffs, nj: Prentice-Hall, 1988; C. W. Fuller, *Electrothermal Atomization for Atomic Absorption Spectroscopy*, Londres: Chemical Society, 1977; *Ultrapure Water Specifications, Quantitative ICP-MS Detection Limits*, Fremont, ca, Balazs Analytical Services, 1993.

[†]Basado en una muestra de 10 µL.

(Skoog, 2015).

L. Mecanismo de adhesión de micronutrientes al fertilizante nitrogenado de nitrato de amonio:

La adhesión de los micronutrientes al nitrato de amonio se da por un mecanismo de adhesión mecánica. Esta representa una conexión de ajuste a nivel macroscópico. El adhesivo polimérico o adherente, de baja viscosidad y alta fluidez llena los poros y al endurecerse hace un anclaje mecánico entre los sustratos. Actuando en los poros y rugosidades superficiales del nitrato de amonio. La penetración del adherente en la superficie del sustrato provoca que el área de contacto entre los micronutrientes y el fertilizante sea superior a la superficie aparente (Martínez, 1992).

Es importante humectar correctamente el nitrato de amonio con el adherente para evitar zonas donde exista una rotura de la unión adhesiva. Tanto la rugosidad como la porosidad del fertilizante son propiedades importantes (Martínez, 1992).

M. Mecanismo de liberación de micronutrientes en el suelo:

El movimiento de iones en el suelo se da a partir de la movilidad de los nutrientes diluidos en el flujo de agua en la solución del suelo. Y por la difusión de los iones en el agua por el gradiente de concentración en distancias cortas. Para el cálculo de los coeficientes de difusión se considera un sistema a dilución infinita. Cuando se disocian los electrolitos, la difusión entre los cationes y aniones en medio acuoso se considera como una solución binaria. Se calculó el coeficiente de difusión para cada solución electrolítica diluida de cada nutriente individual en el suelo utilizando la ecuación de Nernst (Perry, 1997).

$$D_{AB} = 8.931 * 10^{-10} T \left(\frac{\lambda_+^o \lambda_-^o |z_-| + |z_+|}{\lambda_+^o + \lambda_-^o |z_-| |z_+|} \right)$$

D_{AB} = Difusividad de la mezcla AB (cm^2/s)

λ_+^o = Conductancia catiónica o aniónica (-) a dilución infinita (A/cm^2)

z_+ = Valencia catiónica o aniónica (-)

T = temperatura absoluta (K)

Cuadro 6. Conductancias iónicas a dilución infinita en agua a 25°C.

Catión o anión	Conductancia catiónica λ_+^0 o aniónica λ_-^0 (A/cm ²)
$\frac{1}{2} SO_4^{-2}$	80.0
$\frac{1}{2} Cu^{+2}$	53.60
$\frac{1}{2} Mn^{+2}$	53.50
$\frac{1}{2} Zn^{+2}$	52.80
Na^+	50.08
$B(C_6H_5)_4^-$	21.00

(Robinson y Stokes, 1959).

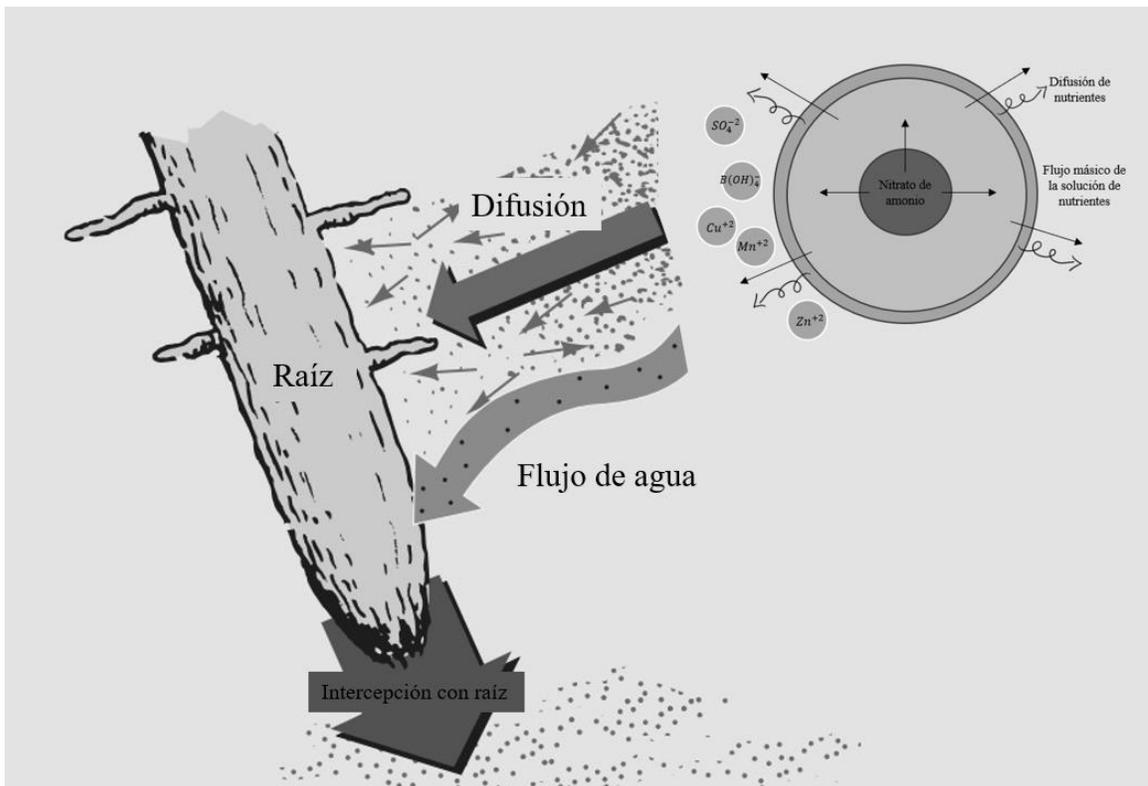


Figura 5. Esquema de la difusión de micronutrientes en la solución del suelo.

(Weil y Brady, 2017).

V. METODOLOGÍA

A. Método de adherencia de micronutrientes a fertilizantes terminado:

1. Técnica:

Se realizó a partir de la técnica *bulk blending* o de mezcla a granel con fertilizantes granulares, descrita en el Capítulo VI Marco Teórico (Silverberg, 1977).

2. Materia prima:

Para ello se realizaron pruebas de adherencia individuales para cada micronutriente, en la superficie del fertilizante de nitrato de amonio (NH_4NO_3) grado 34.4-0-0. Los microelementos agregados fueron octaborato de sodio ($Na_2B_8O_{13} * 4H_2O$), sulfato de cinc monohidratado ($ZnSO_4 * H_2O$), sulfato de manganeso monohidratado ($MnSO_4 * H_2O$) y sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 * 5H_2O$). Las variables de control, independientes y de respuesta se enumeran en el Cuadro 7.

3. Equipo:

Se usó un molino de discos y tornillo sin fin ajustador de hierro fundido recubierto con estaño, tamiz de malla número 120 y una mezcladora tipo tambor con dos aspas internas.

Cuadro 7. Variables de control, independientes y de respuesta para el método de adherencia de micronutrientes a fertilizante.

No.	Tipo de variable	Variable	Unidad
1	Control	Masa fertilizante nitrato de amonio	kg
2	Independiente	Masa de cada compuesto micronutriente	kg
3	Independiente	Proporción de cada micronutriente en mezcla multinutriente	% (m/m)
4	Independiente	Tamaño de partícula de gránulos de nitrato de amonio	mm
5	Independiente	Tamaño de partículas de compuestos micronutrientes	mm
6	Respuesta	Porcentaje máximo de adherencia de micronutriente a fertilizante	% (m/m)
7	Respuesta	Porcentaje de polvo por segregación	% (m/m)

4. Procedimiento:

- a. Para cada prueba tamizar 1 kilogramo de nitrato de amonio para descartar los gránulos de la materia prima que se han segregado.
- b. Para las pruebas de adherencia individuales moler 30 gramos de los microelementos de sulfato de cobre, manganeso y cinc individualmente; y 60 gramos de octoborato de sodio para obtener un tamaño de partícula con diámetros igual o menores a 0.125 mm.
- c. Tamizar los polvos utilizando una malla de número 120.
- d. Realizar pruebas de mezclado a escala laboratorio utilizando una mezcladora tipo tambor rotatorio de la adherencia individual de cada micronutriente en seco al fertilizante de nitrato de amonio granular durante 1 minuto.
- e. Determinar masa del producto terminado, polvos adheridos y no adheridos, el porcentaje máximo de adherencia y comparar con los resultados del cuadro 3.
- f. Para las pruebas de adherencia de la mezcla de micronutrientes al 10% m/m moler 38 gramos de sulfato de manganeso, 30 gramos de octoborato de sodio, 22 gramos de sulfato de cinc y 10 gramos de sulfato de cobre, para obtener un tamaño de partícula con diámetros igual o menores a 0.125 mm.
- g. Tamizar los polvos utilizando una malla de número 120.

- h. Agregar la mezcla de micronutrientes a la mezcladora y realizar las pruebas a escala laboratorio de la adherencia de la mezcla en seco de todos los microelementos al kilogramo de fertilizante de nitrato de amonio durante 1 minuto.
- i. Determinar masa del producto final, polvos adheridos y no adheridos, y calcular el porcentaje de adherencia máximo de la mezcla.

B. Evaluación de la efectividad de productos adherentes:

1. Técnica:

Se realizó a partir de la técnica de recubrimiento sobre fertilizantes granulados denominada *coating* o de recubrimiento, descrita en el Capítulo IV Marco Teórico (Silverberg, 1977).

2. Materia prima:

Se utilizó el fertilizante nitrato de amonio y los mismos micronutrientes enlistados en el apartado anterior: Método de adherencia de micronutrientes a fertilizantes terminado. Se agregaron por separado 3 distintos adherentes comerciales. Los cuales se enlistan en el siguiente cuadro.

Cuadro 8. Nombre de los productos adherentes utilizados para la evaluación de su efectividad.

No.	Nombre
1	A
2	B
3	C

3. Equipo:

Se usó un molino de discos y tornillo sin fin ajustador de hierro fundido recubierto con estaño, tamiz de malla número 120 y una mezcladora tipo tambor con dos aspas internas.

Cuadro 9. Variables de control, independientes y de respuesta para la técnica de recubrimiento sobre fertilizante.

No.	Tipo de variable	Variable	Unidad
1	Control	Masa fertilizante nitrato de amonio	kg
2	Control	Proporción de cada micronutriente en mezcla multinutriente	% (m/m)
3	Independiente	Tamaño de partícula de gránulos de nitrato de amonio y micronutrientes	mm
4	Respuesta	Cantidad de producto adherente a agregar a los gránulos de fertilizante	ml
5	Respuesta	Efectividad de cada producto adherente	% (m/m)
6	Respuesta	Porcentaje de polvo por segregación	% (m/m)

4. Procedimiento:

- a. Para cada prueba tamizar 1 kilogramo de nitrato de amonio para descartar los gránulos de la materia prima que se han segregado.
- b. Para las pruebas de adherencia individual con adherentes moler 30 gramos de los microelementos de sulfato de cobre, manganeso y cinc individualmente y 60 gramos de octoborato de sodio para obtener un tamaño de partícula con diámetros igual o menores a 0.125 mm.
- c. Tamizar los polvos utilizando una malla de número 120.
- d. Realizar pruebas de mezclado a escala laboratorio de la adherencia individual de cada micronutriente con cada producto adherente A, B y C a los gránulos de nitrato de amonio de la siguiente manera:
 - 1) Mezclar por 1 minuto, 1 ml de adherente A, B o C con el kilogramo de nitrato de amonio.
 - 2) Agregar la masa del micronutriente individual y mezclar durante 1 minuto.
 - 3) Adicionar 1 ml de adherente, mezclar por 1 minuto y determinar la masa del producto final, polvos adheridos y no adheridos, y calcular el porcentaje de adherencia máximo de la mezcla.
 - 4) Continuar agregando 1 ml de adherente a la mezcla hasta obtener un porcentaje de adherencia cercano al 100%.

- e. Para las pruebas de adherencia de una mezcla de micronutrientes al 6% m/m a 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando los adherentes A, B y C se deben moler 60 gramos de una mezcla multinutriente: 23 gramos de sulfato de manganeso, 18 gramos de octoborato de sodio, 13 gramos de sulfato de cinc y 6 gramos de sulfato de cobre.
- f. Tamizar los polvos utilizando una malla de número 120.
- g. Realizar pruebas de mezclado a escala laboratorio de la adherencia de la mezcla de micronutrientes con cada producto adherente A, B y C a los gránulos de nitrato de amonio de la siguiente manera:
 - 1) Luego de determinar el mayor volumen necesario para la adherencia individual de los micronutrientes para los adherentes A, B y C. Mezclar por 1 minuto, la mitad de este volumen determinado individualmente para cada adherente con el kilogramo de nitrato de amonio.
 - 2) Agregar los 60 gramos de la mezcla multinutriente y mezclar por 1 minuto con el fertilizante granular.
 - 3) Adicionar el resto de volumen del adherente A, B o C.
 - 4) Mezclar por 3 minutos y descargar el material recubierto.
 - 5) Determinar la masa del producto final, polvos adheridos y no adheridos, y calcular el porcentaje de adherencia máximo de la mezcla.
 - 6) Evaluar el tiempo de secado del producto recubierto.
- h. Realizar lotes a una escala 10 veces mayor con los productos adherentes que presenten una buena adherencia. Para cada prueba tamizar 10 kilogramos de nitrato de amonio para descartar los gránulos de la materia prima que se han segregado.
- i. Moler 417 gramos de una mezcla multinutriente: 160 gramos de sulfato de manganeso, 125 gramos de octoborato de sodio, 90 gramos de sulfato de cinc y 42 gramos de sulfato de cobre.
- j. Tamizar los polvos utilizando una malla de número 120.
- k. Realizar las pruebas de mezclado de la siguiente manera:
 - 1) Mezclar por 1 minuto, la mitad del volumen por agregar de cada adherente A, B o C al nitrato de amonio.
 - 2) Agregar la mezcla multinutriente al 4% m/m y mezclar por 1 minuto con el fertilizante granular.
 - 5) Adicionar el resto de volumen del adherente A, B o C.
 - 6) Mezclar por 3 minutos y descargar el material recubierto.

- 7) Determinar la masa del producto final, polvos adheridos y no adheridos, y calcular el porcentaje de adherencia máximo de la mezcla.

C. Evaluación de las características finales del fertilizante nitrogenado:

1. Variables:

Se analizará las siguientes variables:

- a. Segregación que presente el producto final de fertilizante granulado multinutriente.
- b. Porcentaje de polvo que no se adhirió al producto final luego del mezclado al determinar su masa.
- c. Vida de anaquel que se define como el tiempo en el cual el producto conserva sus propiedades.
- d. Comparación del costo incremental de producción del producto final que cumpla con las características deseadas en base a las cantidades de materia prima y adherentes con respecto a una mezcla física convencional.
- e. Liberación de micronutrientes del fertilizante nitrogenado multinutriente con recubrimiento de producto adherente comercial.

2. Procedimiento:

a. Segregación y porcentaje en polvo

- 1) Pesar las materias primas en cada una de las pruebas.
- 2) Realizar las pruebas de mezclado.
- 3) Pesar los productos finales obtenidos y los polvos que se segreguen.
- 4) Calcular el porcentaje en peso adherido por la diferencia en peso de la materia prima agregada y el polvo que no se logre adherir.

b. Vida de anaquel

- 1) Colocar el producto en empaques similares a los utilizados para producir y almacenar fertilizantes.
- 2) Medir cualitativamente a partir de la observación constante por periodos de tiempo las condiciones del anaquel.
- 3) Medir cuantitativamente la segregación.

c. Liberación de micronutrientes en el suelo

- 1) Colocar el producto final del fertilizante nitrogenado multinutriente recubierto con capa adherente en tierra para el estudio de la liberación de los nutrientes agregados una vez añadidos al suelo.
- 2) Enviar una porción de la tierra sin fertilizante a laboratorio para la determinación de sus propiedades físicas y químicas a partir de un análisis de suelos.
- 3) Analizar un lote individual del fertilizante nitrogenado multinutriente con recubrimientos A, B y C con un análisis de suelos en laboratorio externo. El cual consiste en la siguiente serie de pasos:
 - a) Evaluación de la disponibilidad de adsorción de boro para la planta: extracción en agua caliente:
 1. Colocar una muestra de 20g de suelo seco en un balón aforado de 250 ml con fondo plano bajo en contenido de boro y agregar 40 ml de solución de cloruro de calcio 0.02 M para la obtención de extractos claros de agua caliente para la determinación de boro.
 2. Adjuntar al balón un condensador de reflujo que utilice agua para el enfriamiento.
 3. Calentar el balón hasta hervir. Dejar por 5 minutos exactos y luego dejarlo enfriar y filtrar con papel filtro.
 4. Tomar una alícuota de 20 ml para la determinación de boro y colocarla en un recipiente de porcelana para evaporación.
 5. Agregar 2 ml de hidróxido de calcio en suspensión y evaporar la solución hasta secar.
 6. Calentar el recipiente de porcelana sobre una llama para eliminar materia orgánica.
 7. Luego de enfriar a temperatura ambiente agregar 5 ml de solución de ácido clorhídrico 0.1 M.
 8. Triturar con el pistilo el residuo.
 9. Enviar a análisis de plasma acoplado inductivamente (ICP).

(Sparks, 1996).

b) Método de ácido dietilentriaminopentaacético-trietanolamina (DTPA-TEA) para la extracción de cobre y cinc:

1. Morder la muestra de suelo seco y pasar a través de un tamiz de acero inoxidable de 1.0 mm.
2. Pesar 10 gramos del suelo tamizado en un Erlenmeyer de 125 ml y agregar 20 ml de la solución de extracción DTPA-TEA y cubrir con papel Parafilm.
3. Agitar la mezcla a 120 ciclos por minuto por un periodo de 2 horas.
4. Filtrar las suspensiones con un papel filtro Whatman no. 42.
5. Determinar la cantidad de cinc extraíble por absorción atómica o espectrometría de plasma acoplado inductivamente.

(Sparks, 1996).

c) Método de extracción de manganeso con solución Mehlich-1:

1. Preparar la solución de Mehlich-1 o doble ácido con ácido sulfúrico 0.025 N y ácido clorhídrico 0.05 N.
2. Pesar 5 gramos de suelo y 0.2 gramos de carbón en polvo en un Erlenmeyer de 100 ml.
3. Añadir 20 ml de la solución Mehlich-1 y agitar por 15 minutos.
4. Centrifugar y filtrar la suspensión para obtener la fase de la solución a analizar.
5. Determinar por absorción atómica o espectrometría de plasma acoplado inductivamente.

(Sparks, 1996).

VI. RESULTADOS

A. Adherencia de micronutrientes al fertilizante nitrogenado sin adherentes:

Cuadro 10. Porcentajes máximos de adherencia de 60 gramos de boro en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No. ²	Porcentaje de octoborato de sodio en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.B	5.666 ± 0.047	$0.471 \pm 2.417E-04$	$5.194 \pm 4.729E-02$
2.B	5.666 ± 0.047	$0.636 \pm 3.146E-04$	$5.030 \pm 4.729E-02$
3.B	5.666 ± 0.047	$0.478 \pm 2.445E-04$	$5.188 \pm 4.729E-02$

Cuadro 11. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
89.034	90.677 ± 1.643	92.319

² El número corresponde al orden en el que se realizaron las pruebas y las letras al elemento de interés.

Cuadro 12. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Porcentaje de sulfato de cobre en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Cu	2.918 ± 0.049	0.413 ± 2.234E-04	2.505 ± 4.866E-02
2.Cu	2.918 ± 0.049	0.402 ± 2.185E-04	2.516 ± 4.866E-02
3.Cu	2.918 ± 0.049	0.324 ± 1.853E-04	2.594 ± 4.866E-02

Cuadro 13. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
85.316	86.980 ± 1.664	88.645

Cuadro 14. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Porcentaje de sulfato de manganeso en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Mn	2.913 ± 0.049	2.727 ± 1.330E-03	0.185 ± 4.858E-02
2.Mn	2.913 ± 0.049	2.830 ± 1.377E-03	0.083 ± 4.858E-02
3.Mn	2.913 ± 0.049	2.843 ± 1.384E-03	0.069 ± 4.858E-02

Cuadro 15. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
1.690	3.867 ± 2.177	6.045

Cuadro 16. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Porcentaje de sulfato de cinc en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Zn	2.913 ± 0.049	$1.846 \pm 9.014E-04$	$1.066 \pm 4.857-02$
2.Zn	2.913 ± 0.049	$1.836 \pm 8.967E-04$	$1.076 \pm 4.857-02$
3.Zn	2.913 ± 0.049	$2.223 \pm 1.084E-03$	$0.689 \pm 4.857-02$

Cuadro 17. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
24.841	32.412 ± 7.571	39.983

Cuadro 18. Porcentajes máximos de adherencia de una mezcla de 100 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Porcentaje de micronutrientes en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Mx	9.083 ± 0.091	6.195 ± 2.815E-03	2.888 ± 9.096-02
2.Mx	9.083 ± 0.091	6.301 ± 2.863E-03	2.781 ± 9.097-02
3.Mx	9.083 ± 0.091	6.417 ± 2.915E-03	2.666 ± 9.096-02
4.Mx	9.083 ± 0.091	6.275 ± 2.851E-03	2.808 ± 9.096-02
5.Mx	9.083 ± 0.091	6.118 ± 2.780E-03	2.965 ± 9.096-02

Cuadro 19. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 100 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
29.825	31.066 ± 1.241	32.307

B. Adherencia de micronutrientes en fertilizante nitrogenado con adherentes:

Cuadro 20. Porcentajes máximos de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No. de prueba ³	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de octoborato de sodio en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.B.A	2	5.650 ± 0.047	0.134 ± 2.815E-04	5.516 ± 0.047
	3	5.644 ± 0.091	0.000	5.644
2.B.A	2	5.650 ± 0.047	0.228 ± 1.429E-04	5.421 ± 0.047
	3	5.644 ± 0.091	0.40 9.612E-05	5.604 ± 0.047
3.B.A	2	5.650 ± 0.047	0.511 ± 2.583E-04	5.139 ± 0.047
	3	5.644 ± 0.047	0.040 ± 9.631E-05	5.604 ± 0.047
1.B.B	2	5.644 ± 0.047	0.322 ± 1.784E-04	5.322 ± 0.047
	3	5.639 ± 0.047	0.40 9.603E-05	5.599 ± 0.047
2.B.B	2	5.644 ± 0.047	0.134 ± 1.133E-04	5.510 ± 0.047
	3	5.639 ± 0.047	0.40 9.584E-05	5.599 ± 0.047
3.B.B	2	5.644 ± 0.047	0.416 ± 2.172E-04	5.228 ± 0.047
	3	5.639 ± 0.047	0.40 9.603E-05	5.599 ± 0.047
1.B.C	2	5.650 ± 0.047	0.40 9.603E-05	5.610 ± 0.047
1.B.C	2	5.650 ± 0.047	0.40 9.612E-05	5.610 ± 0.047
1.B.C	2	5.650 ± 0.047	0.040 ± 9.603E-05	5.610 ± 0.047

³ El número corresponde al orden en el que se realizaron las muestras, la primera letra al elemento de interés y la última letra al adherente.

Cuadro 21. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

Adherente	Volumen adherente (ml)	Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
A	2	91.377	94.847 ± 3.469	98.316
	3	99.116	99.526 ± 0.041	99.937
B	2	92.301	94.847 ± 2.546	97.393
	3	99.289	99.290 ± 0.001	99.291
C	2	99.291	99.291 ± 0.000	99.291

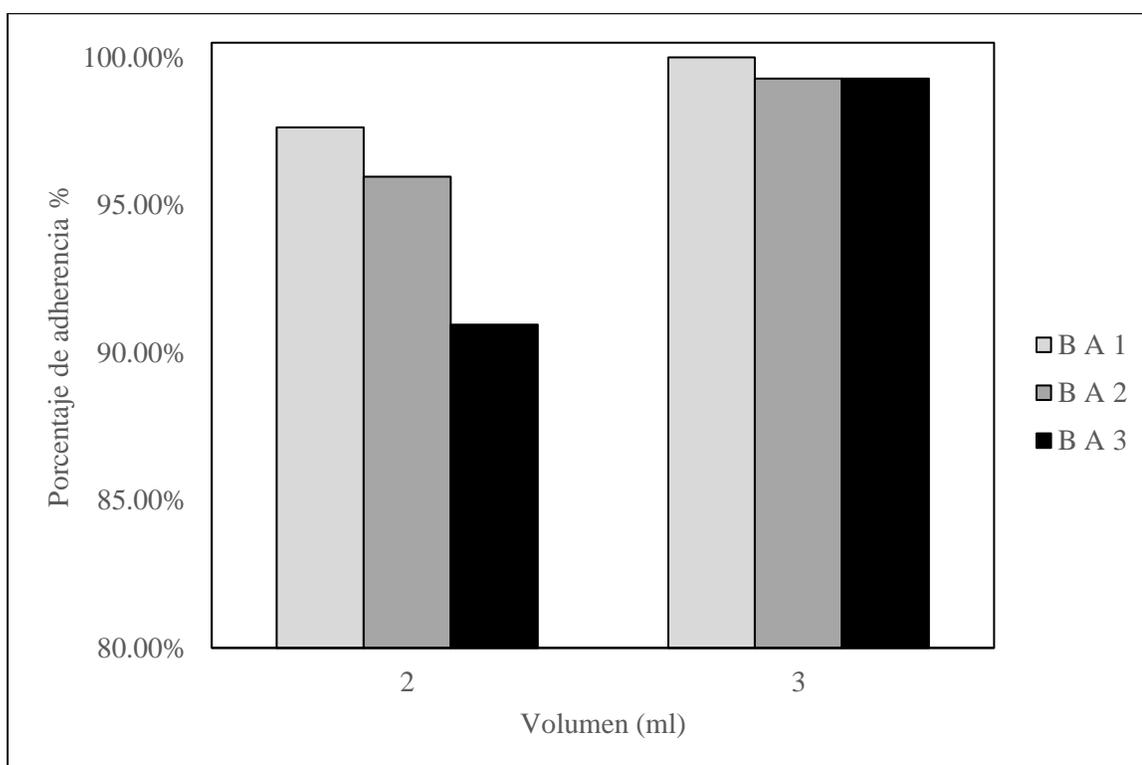


Figura 6. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.

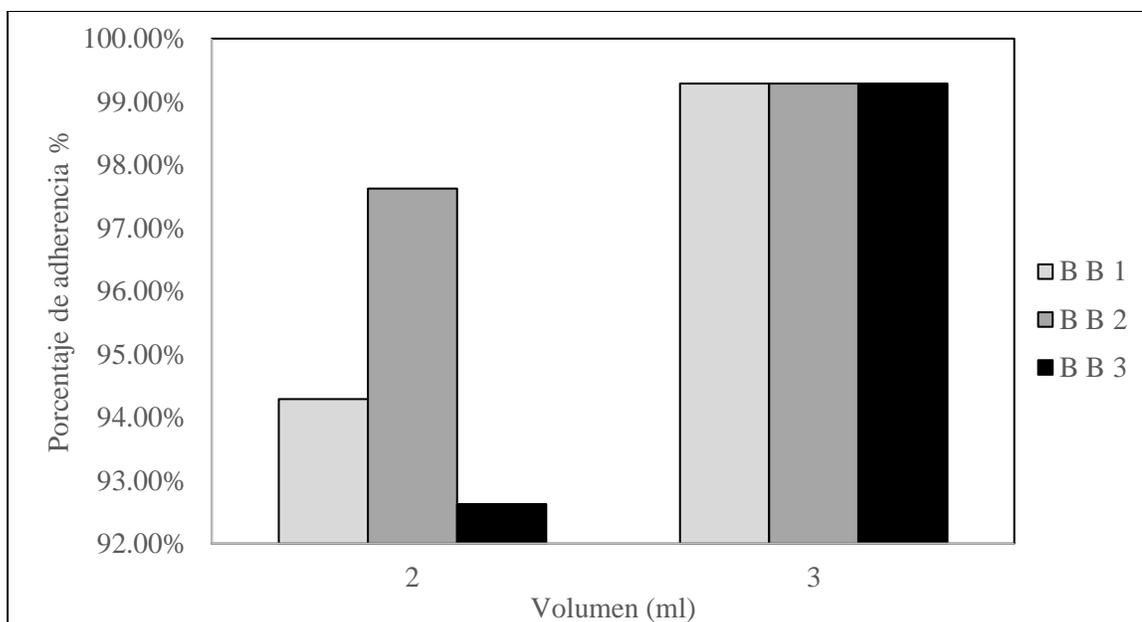


Figura 7. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente B agregado.

Cuadro 22. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No. de prueba	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de sulfato de cobre en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Cu.A	2	2.907 ± 0.048	0.000	2.907
2.Cu.A	2	2.907 ± 0.048	0.000	2.907
3.Cu.A	2	2.907 ± 0.048	0.000	2.907
1.Cu.B	2	2.913 ± 0.049	0.041 ± 9.613E-05	2.871 ± 0.049
2. Cu.B	2	2.913 ± 0.049	0.139 ± 1.182E-04	2.774 ± 0.049
3.Cu.B	2	2.913 ± 0.049	0.041 ± 9.913E-05	2.871 ± 0.049
1.Cu.C	2	2.907 ± 0.048	0.000	2.907
2.Cu.C	2	2.907 ± 0.048	0.041 ± 9.913E-05	2.866 ± 0.048
3.Cu.C	2	2.907 ± 0.048	0.041 ± 9.913E-05	2.866 ± 0.048

Cuadro 23. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C).

Adherente	Volumen adherente (ml)	Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
A	2	100.000	100.000 ± 0.000	100.000
B	2	95.543	97.470 ± 1.927	99.397
C	2	98.235	99.054 ± 0.819	99.873

Cuadro 24. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No. de prueba	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de sulfato de manganeso en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Mn.A	2	2.907 ± 0.048	1.301 ± 6.377E-04	1.606 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.719 ± 3.611E-04	2.185 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.525 ± 2.715E-04	2.377 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.234 ± 1.488E-04	2.664 ± 0.048
	6	2.896 ± 0.048	0.041 ± 9.884E-05	2.855 ± 0.048
2.Mn.A	2	2.907 ± 0.048	1.301 ± 6.377E-04	1.606 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.719 ± 3.611E-04	2.185 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.525 ± 2.715E-04	2.377 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.428 ± 2.280E-04	2.471 ± 0.048
	6	2.896 ± 0.048	0.041 ± 9.883E-05	2.855 ± 0.048
3.Mn.A	2	2.907 ± 0.048	1.398 ± 6.841E-04	1.509 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.912 ± 4.513E-04	1.993 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.524 ± 2.710E-04	2.377 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.331 ± 1.865E-04	2.568 ± 0.048
	6	2.896 ± 0.048	0.000	2.896

No. de prueba	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de sulfato de manganeso en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Mn.B	2	2.907 ± 0.048	1.882 ± 9.171E-04	1.025 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.332 ± 1.874E-04	2.573 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.041 ± 9.874E-05	2.860 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.000	2.899
	6	2.896 ± 0.048	0.000	2.896
2.Mn.B	2	2.907 ± 0.048	1.107 ± 5.451E-04	1.800 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.332 ± 1.874E-04	2.573 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.235 ± 1.491E-04	2.667 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.002 ± 9.663E-05	2.896 ± 0.048
	6	2.896 ± 0.048	0.000	2.896
3.Mn.B	2	2.904 ± 0.048	1.203 ± 5.902E-04	1.701 ± 0.048
	3	2.901 ± 0.048	0.331 ± 1.871E-04	2.570 ± 0.048
	4	2.899 ± 0.048	0.234 ± 1.488E-04	2.664 ± 0.048
	5	2.896 ± 0.048	0.041 ± 9.854E-05	2.855 ± 0.048
	6	2.893 ± 0.048	0.000	2.893
1.Mn.C	2	2.907 ± 0.048	1.301 ± 6.377E-04	1.606 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.041 ± 9.884E-05	2.863 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.000	2.901
	5	2.899 ± 0.048	0.000	2.899
2.Mn.C	2	2.907 ± 0.048	1.592 ± 7.772E-04	1.315 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.525 ± 2.720E-04	2.379 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.331 ± 1.871E-04	2.570 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.000	2.899
3.Mn.C	2	2.907 ± 0.048	1.592 ± 7.772E-04	1.315 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.428 ± 2.288E-04	2.476 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.138 ± 1.175E-04	2.764 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.000	2.899

Cuadro 25. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

Adherente	Volumen adherente (ml)	Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
A	2	52.213	54.138 ± 1.925	56.062
	3	69.205	73.037 ± 3.831	76.868
	4	81.911	81.922 ± 0.010	81.932
	5	85.253	88.586 ± 3.333	91.919
	6	98.230	99.052 ± 0.821	99.873
B	2	37.386	51.916 ± 14.530	66.445
	3	88.582	88.582 ± 0.000	88.582
	4	90.289	94.138 ± 3.849	97.987
	5	98.704	99.499 ± 0.795	100.295
	6	100.000	100.000 ± 0.000	100.000
C	2	42.809	48.582 ± 5.774	54.356
	3	79.763	88.582 ± 8.819	97.402
	4	88.875	94.610 ± 5.736	100.000
	5	100.000	100.000 ± 0.000	100.000

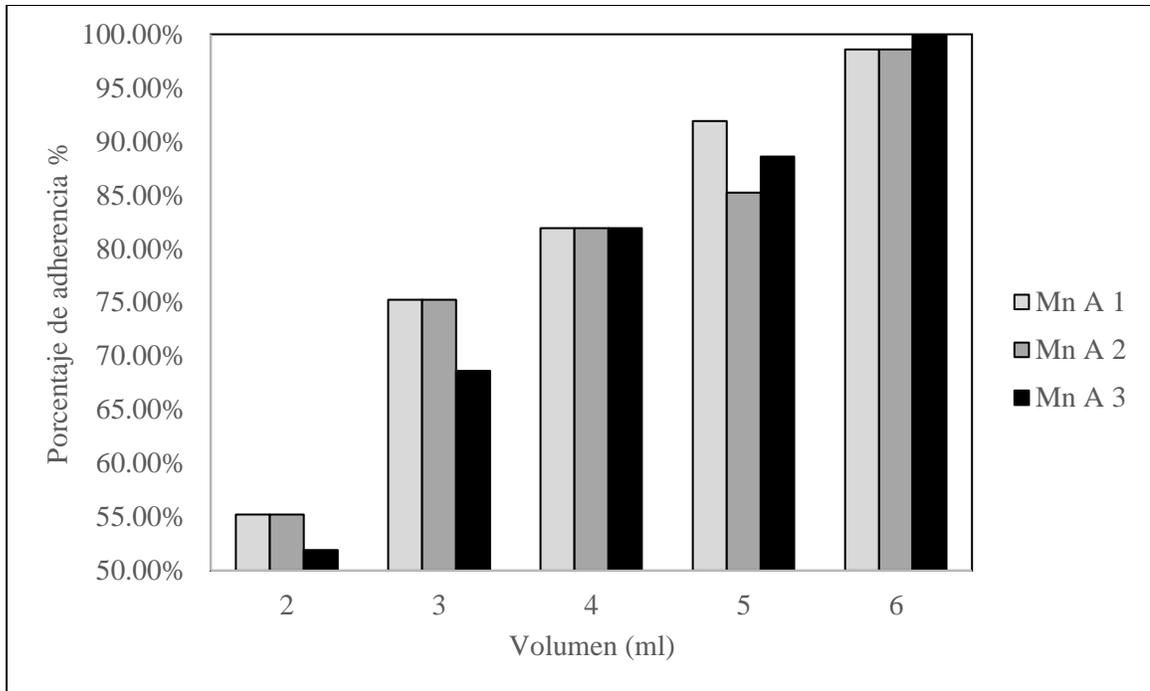


Figura 8. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.

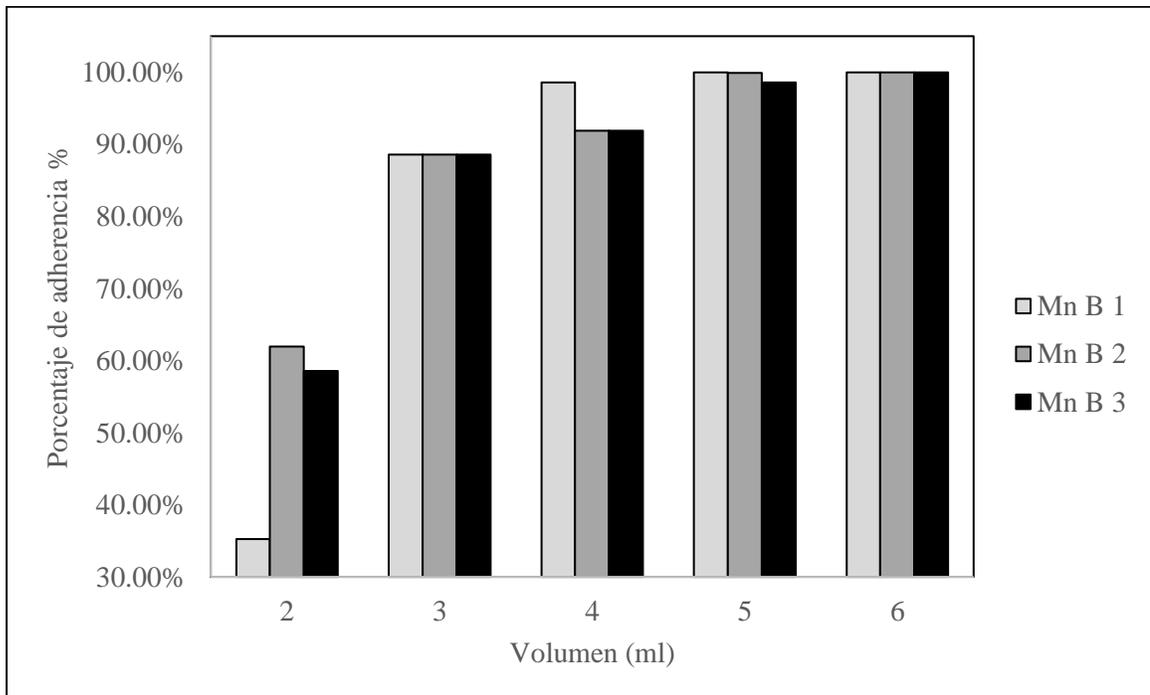


Figura 9. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente B agregado.

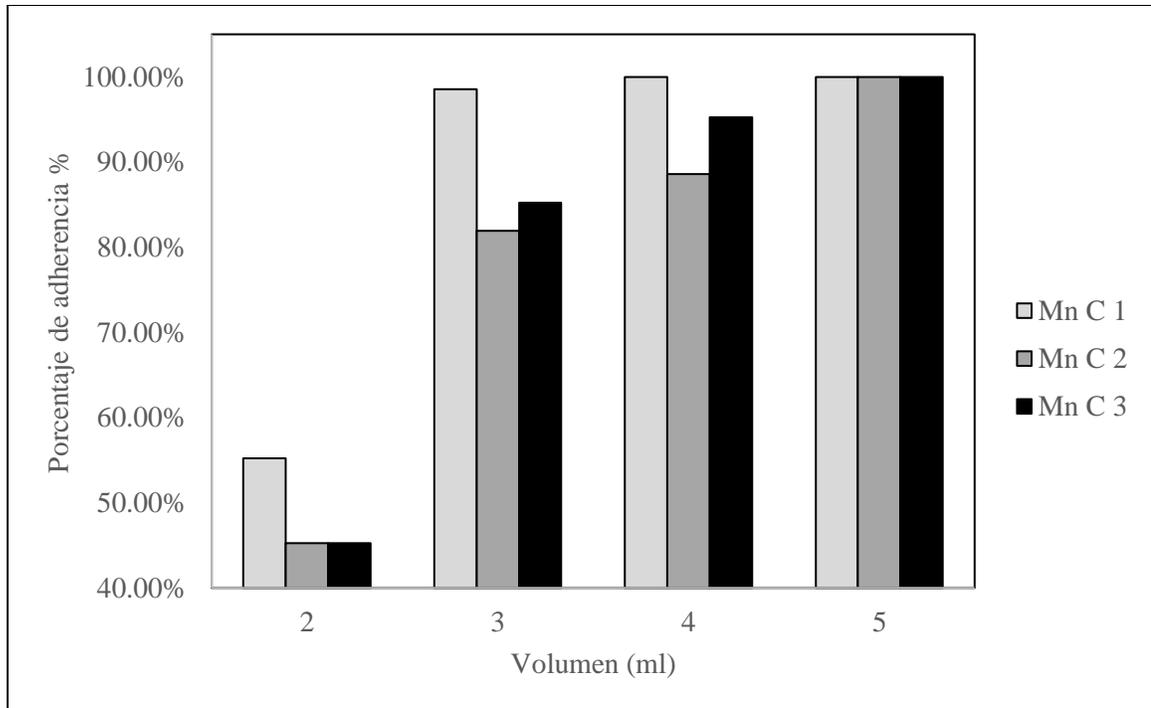


Figura 10. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente C agregado.

Cuadro 26. Porcentajes máximos de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No. de prueba	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de sulfato de cinc en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Zn.A	2	2.907 ± 0.048	0.581 ± 2.979E-04	2.326 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.000	2.904
2.Zn.A	2	2.907 ± 0.048	0.623 ± 3.168E-04	2.284 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.041 ± 9.893E-05	2.863 ± 0.048
3.Zn.A	2	2.907 ± 0.048	0.235 ± 1.495E-04	2.672 ± 0.048
	3	2.904 ± 0.048	0.041 ± 9.893E-05	2.863 ± 0.048
1.Zn.B	2	2.907 ± 0.048	1.301 ± 6.377E-04	1.606 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.717 ± 3.598E-04	2.181 ± 0.048
	8	2.890 ± 0.048	0.426 ± 2.268E-04	2.464 ± 0.048
	11	2.882 ± 0.048	0.041 ± 9.854E-05	2.841 ± 0.048
2.Zn.B	2	2.907 ± 0.048	1.204 ± 5.913E-04	1.703 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.621 ± 3.151E-04	2.278 ± 0.048
	8	2.890 ± 0.048	0.330 ± 1.859E-04	2.560 ± 0.048
	11	2.882 ± 0.048	0.041 ± 9.824E-05	2.841 ± 0.048
3.Zn.B	2	2.907 ± 0.048	1.495 ± 7.306E-04	1.412 ± 0.048
	5	2.899 ± 0.048	0.911 ± 4.504E-04	1.988 ± 0.048
	8	2.890 ± 0.048	0.523 ± 2.696E-04	2.368 ± 0.048
	11	2.882 ± 0.048	0.041 ± 9.805E-05	2.841 ± 0.048
1.Zn.C	2	2.907 ± 0.048	0.429 ± 2.296E-04	2.478 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.041 ± 9.884E-05	2.860 ± 0.048
2.Zn.C	2	2.907 ± 0.048	0.332 ± 1.877E-04	2.575 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.041 ± 9.884E-05	2.860 ± 0.048
3.Zn.C	2	2.907 ± 0.048	0.334 ± 1.893E-04	2.573 ± 0.048
	4	2.901 ± 0.048	0.000	2.901

Cuadro 27. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

Adherente	Volumen adherente (ml)	Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
A	2	76.176	83.499 ± 7.323	90.823
	3	98.235	99.054 ± 0.819	99.873
B	2	49.046	54.138 ± 5.092	59.230
	5	69.046	74.138 ± 5.092	79.230
	8	81.916	85.249 ± 3.333	88.582
	11	98.576	98.579 ± 0.003	98.583
C	2	85.531	87.448 ± 1.917	89.365
	4	98.235	99.054 ± 0.819	99.873

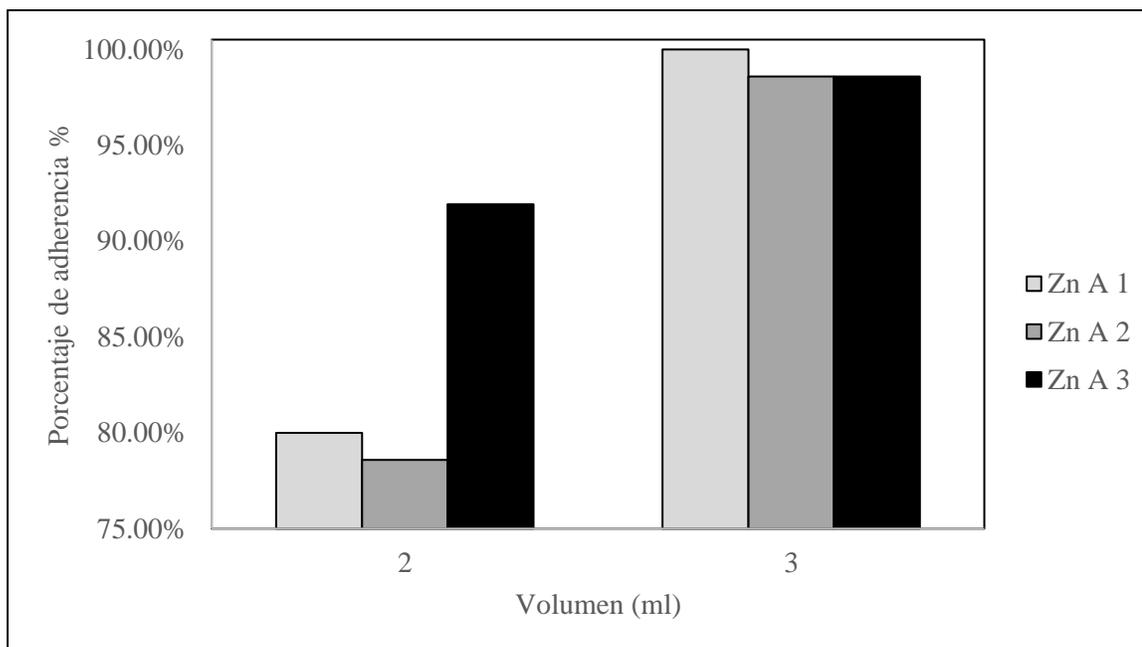


Figura 11. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.

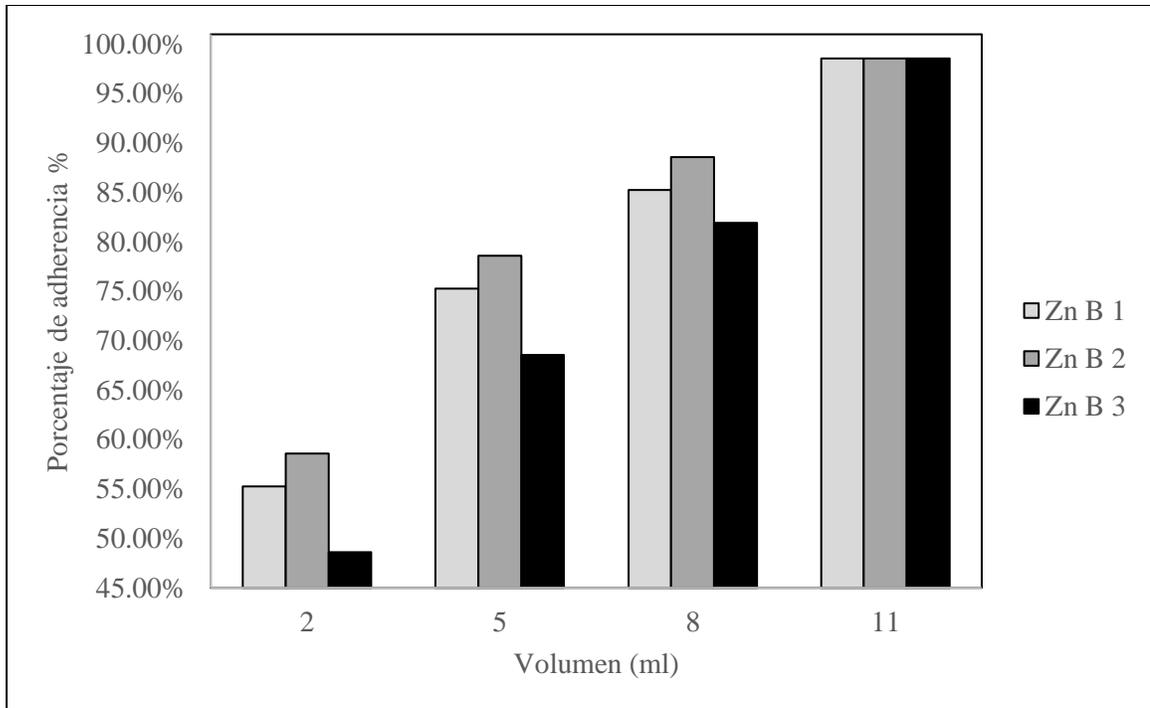


Figura 12. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente B agregado.

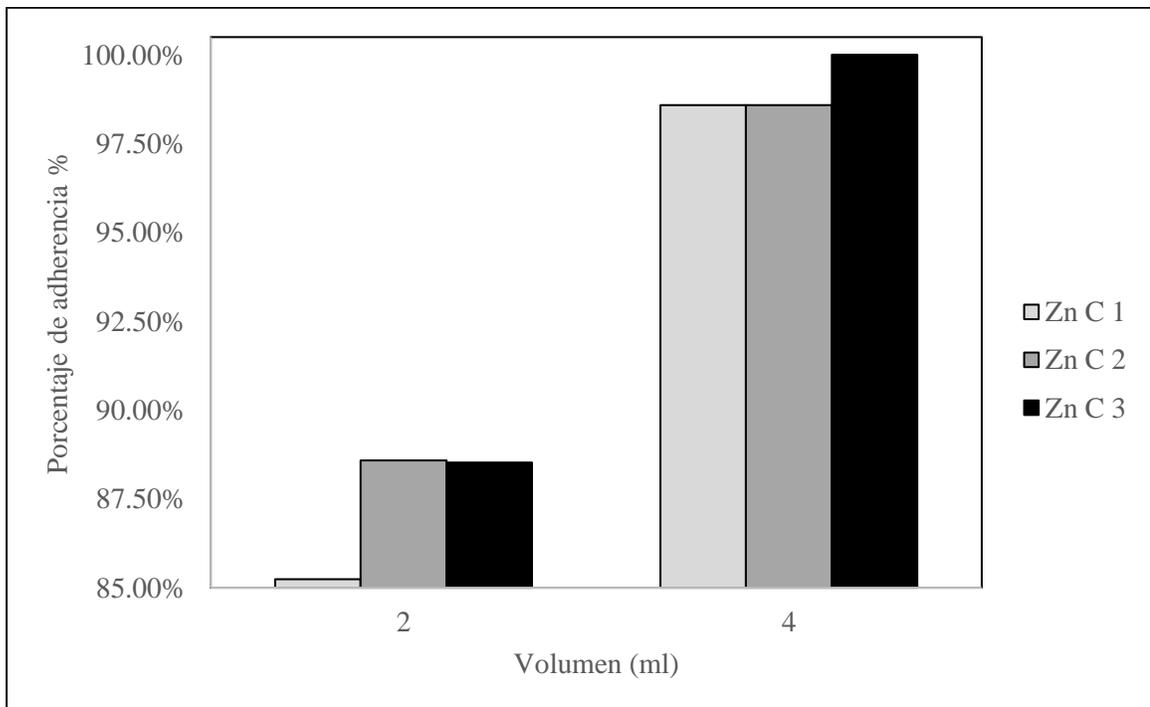


Figura 13. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente C agregado.

Cuadro 28. Porcentajes máximos de adherencia de una mezcla de 60 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No. de prueba	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de micronutrientes en muestra (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)
1.Mx.A	5	5.634 ± 0.094	0.416 ± 2.165E-04	5.218 ± 0.094
	6	5.629 ± 0.094	0.040 ± 9.575E-05	5.589 ± 0.094
2.Mx.A	5	5.634 ± 0.094	0.322 ± 1.778E-04	5.312 ± 0.094
	6	5.629 ± 0.094	0.040 ± 9.575E-05	5.589 ± 0.094
3.Mx.A	5	5.634 ± 0.094	0.369 ± 1.969E-04	5.265 ± 0.094
	6	5.629 ± 0.094	0.040 ± 9.575E-05	5.589 ± 0.094
1.Mx.B	11	5.602 ± 0.094	0.227 ± 1.419E-04	5.375 ± 0.094
2.Mx.B	11	5.602 ± 0.094	0.000	5.602
3.Mx.B	11	5.602 ± 0.094	0.000	5.602
1.Mx.C	5	5.634 ± 0.094	0.134 ± 1.133E-04	5.500 ± 0.094
2.Mx.C	5	5.634 ± 0.094	0.228 ± 1.423E-04	5.406 ± 0.094
3.Mx.C	5	5.634 ± 0.094	0.134 ± 1.133E-04	5.500 ± 0.094

Cuadro 29. Análisis estadístico del porcentaje de adherencia de 60 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

Adherente	Volumen adherente (ml)	Límite inferior de adherencia (%)	Media adherencia total (%)	Límite superior de adherencia (%)
A	5	92.625	93.458 ± 0.833	94.291
	6	99.290	99.291 ± 0.001	99.292
B	11	96.305	98.648 ± 2.342	100.000
C	5	96.106	97.066 ± 0.960	98.026

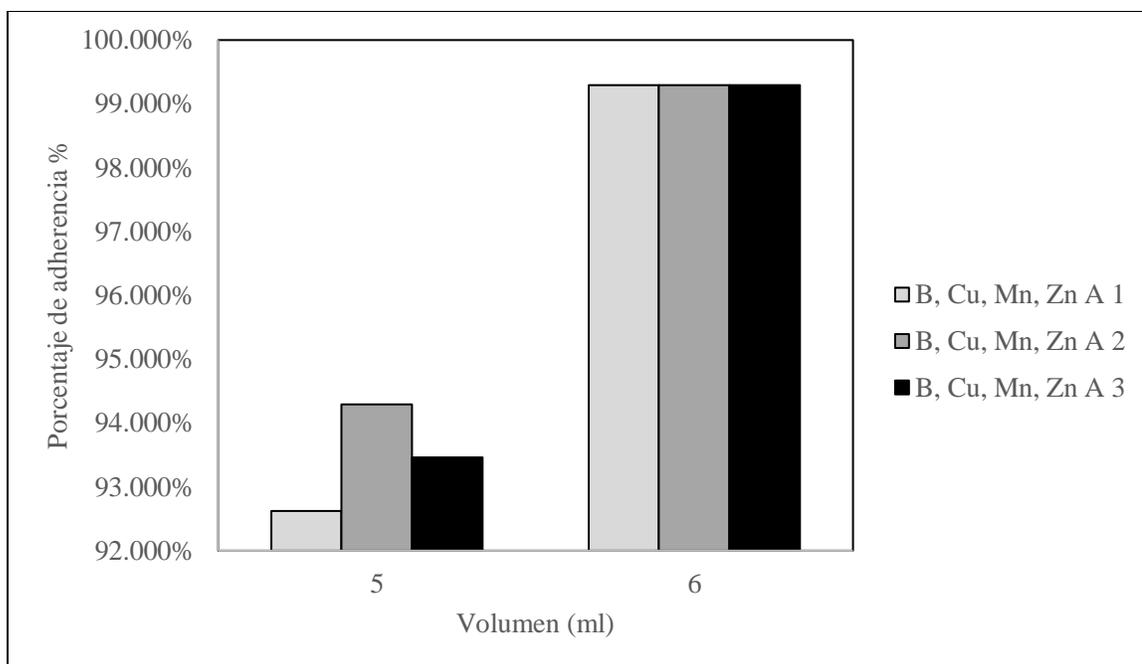


Figura 14. Comportamiento del porcentaje de adherencia de 60 gramos de micronutrientes en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen del adherente A agregado.

C. Análisis químico elemental por espectroscopia de absorción atómica:

Cuadro 30. Determinación cuantitativa de la presencia de boro en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.

Muestra	Concentración experimental en la muestra (% m/m)	Concentración teórica en la muestra (% m/m)	Porcentaje de rendimiento (%)
B	6.989 ± 0.039	5.666	123.475
B.A	7.785 ± 0.013	5.666	136.999
B.B	9.138 ± 0.070	5.666	161.269
B.C	7.223 ± 0.020	5.666	127.461
Mx	5.741 ± 0.039	2.997	101.817
Mx.A	6.348 ± 0.047	1.800	352.643
Mx.B	5.797 ± 0.026	1.800	322.045
Mx.C	5.874 ± 0.071	1.800	326.663

Cuadro 31. Determinación cuantitativa de la presencia de cobre en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.

Muestra	Concentración experimental en la muestra (% m/m)	Concentración teórica en la muestra (% m/m)	Porcentaje de rendimiento (%)
Cu	2.325 ± 0.726	2.918	79.673
Cu.A	4.615 ± 0.027	2.907	158.900
Cu.B	2.473 ± 0.045	2.913	84.921
Cu.C	4.512 ± 0.037	2.907	155.058
Mx	0.520 ± 0.149	0.908	52.016
Mx.A	1.185 ± 0.036	0.563	197.439
Mx.B	0.664 ± 0.012	0.563	110.637
Mx.C	0.657 ± 0.002	0.563	109.582

Cuadro 32. Determinación cuantitativa de la presencia de manganeso en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.

Muestra	Concentración experimental en la muestra (% m/m)	Concentración teórica en la muestra (% m/m)	Porcentaje de rendimiento (%)
Mn	0.387 ± 0.094	2.913	13.281
Mn.A	2.081 ± 0.019	2.896	71.873
Mn.B	2.945 ± 0.021	2.896	101.799
Mn.C	2.151 ± 0.029	2.899	74.218
Mx	0.212 ± 0.044	3.451	5.583
Mx.A	1.667 ± 0.019	2.158	72.488
Mx.B	3.032 ± 0.026	2.148	131.823
Mx.C	1.978 ± 0.019	2.160	86.098

Cuadro 33. Determinación cuantitativa de la presencia de cinc en las muestras de fertilizante a través de espectroscopia de absorción atómica.

Muestra	Concentración experimental en la muestra (% m/m)	Concentración teórica en la muestra (% m/m)	Porcentaje de rendimiento (%)
Zn	2.378 ± 0.766	2.913	81.648
Zn.A	2.800 ± 0.013	2.904	96.413
Zn.B	3.173 ± 0.011	2.882	109.781
Zn.C	2.677 ± 0.043	2.901	92.361
Mx	2.467 ± 0.175	1.998	70.051
Mx.A	2.383 ± 0.024	1.220	114.422
Mx.B	3.033 ± 0.012	1.214	145.623
Mx.C	2.623 ± 0.006	1.221	126.043

D. Pruebas a escala 10 veces mayor de la adherencia de micronutrientes a fertilizante nitrogenado con adherentes:

Cuadro 34. Porcentajes máximos de adherencia de una mezcla de 477 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 10 kilogramos nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes en un proceso de mezcla simple a una escala 10 veces mayor que las pruebas anteriores.

No. de prueba	Volumen adherente (ml)	Porcentaje de micronutrientes (%m/m)	Porcentaje de polvos no adheridos (%m/m)	Porcentaje de polvos adheridos (%m/m)	Porcentaje de adherencia (%)
Mx.10.A	60	3.890 ± 0.010	0.185 ± 1.302E-05	3.795 ± 0.010	95.342
Mx.10.B	110	3.961 ± 0.010	0.232 ± 1.456E-05	3.729 ± 0.010	94.143
Mx.10.C	50	3.984 ± 0.010	0.176 ± 1.273E-05	3.808 ± 0.010	95.581

E. Evaluación de las características finales del fertilizante recubierto con micronutrientes:

Cuadro 35. Determinación de las propiedades químicas y físicas de la tierra luego de la liberación del fertilizante nitrogenado con micronutrientes y adherentes a partir de un análisis de suelos.

Muestra							
Propiedad física o química	Control	1.Mx.A	2.Mx.A	1.Mx.B	2.Mx.B	1.Mx.C	2.Mx.C
pH	6.68	5.94	5.93	5.96	5.95	5.96	5.93
Materia orgánica	4.96%	5.30%	5.27%	5.17%	5.08%	5.23%	5.14%
Amonio en KCl (ppm)	50.8	1050.0	1150.0	1200.0	1200.0	1050.0	1050.0
Nitrato en KCl (ppm)	11.0	79.0	65.5	72.5	66.0	92.0	83.0
Boro (ppm)	0.2	3.3	5.8	4.1	4.8	4.7	4.9
Cobre (ppm)	5.9	13.7	11.6	9.2	12.2	9.6	9.3
Manganeso (ppm)	4.2	19.9	23.0	20.2	36.0	18.3	23.5
Cinc (ppm)	5.3	18.6	22.5	16.1	24.7	18.3	20.4

Cuadro 36. Comparación del costo incremental de producción, por tonelada métrica de nitrato de amonio y un porcentaje de micronutrientes al 10% m/m, entre una mezcla física convencional y recubiertas con adherentes A, B y C ⁴.

	Sin adherente (\$ t)	Fertilizante con adherente A (\$ t)	Fertilizante con adherente B (\$ t)	Fertilizante con adherente C (\$ t)
Nitrato de amonio	\$	\$	\$	\$
Sulfato de cobre	\$	\$	\$	\$
Sulfato de manganeso	\$	\$	\$	\$
Sulfato de cinc	\$	\$	\$	\$
Octoborato de sodio	\$	\$	\$	\$
Molienda	\$ 0.00	\$	\$	\$
Adherente	\$ 0.00	\$	\$	\$
Costo total	\$ 407.50	\$ 447.32	\$ 472.64	\$ 438.42
Costo incremental		\$ 39.82	\$ 65.14	\$ 30.92
Porcentaje de costo incremental		11.73%	19.18%	9.10%

⁴ Por motivos de confidencialidad solo se reportan los costos totales de producción.

Cuadro 37. Porcentaje de segregación de polvos sobre el peso total de las muestras con el tiempo⁵ para la determinación de la vida de anaquel.

Compuesto(s)	Muestra	Media de la segregación sobre el peso total de la muestra el día de la prueba (% m/m)	Media de la segregación sobre el peso total de la muestra luego de almacenado (% m/m)	Tiempo de almacenamiento (meses)
	Tiempo			
Octoborato de sodio	Sin adherente (% m/m)	0.528	0.126	4
	Adherente A (% m/m)	0.027	0.063	2
	Adherente B (% m/m)	0.040	0.596	2
	Adherente C (% m/m)	0.040	0.251	2
Sulfato de cobre	Sin adherente (% m/m)	0.380	0.000	4
	Adherente A (% m/m)	0.000	0.063	2
	Adherente B (% m/m)	0.074	0.162	2
	Adherente C (% m/m)	0.028	0.129	2
Sulfato de manganeso	Sin adherente (% m/m)	2.800	0.000	4
	Adherente A (% m/m)	0.027	0.032	2
	Adherente B (% m/m)	0.000	0.064	2
	Adherente C (% m/m)	0.000	0.064	2

⁵ Las muestras han estado en almacenamiento de 2 a 4 meses desde su realización.

Compuesto(s)	Muestra	Media de la segregación sobre el peso total de la muestra el día de la prueba (% m/m)	Media de la segregación sobre el peso total de la muestra luego de almacenado (% m/m)	Tiempo de almacenamiento (meses)
	Tiempo			
Sulfato de cinc	Sin adherente (% m/m)	1.969	0.065	4
	Adherente A (% m/m)	0.027	0.129	2
	Adherente B (% m/m)	0.041	0.193	2
	Adherente C (% m/m)	0.027	0.065	2
Mezcla micronutrientes	Sin adherente (% m/m)	6.261	0.236	4
	Adherente A (% m/m)	0.040	0.282	2
	Adherente B (% m/m)	0.076	0.437	2
	Adherente C (% m/m)	0.165	0.251	2

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general del trabajo de graduación era evaluar el proceso de adherencia de los micronutrientes boro, cobre, manganeso y cinc en nitrato de amonio junto con agentes adherentes para aumentar la eficiencia de la distribución homogénea del producto final. Este fertilizante nitrogenado tiene propiedades higroscópicas que permiten adherir a su superficie partículas de polvo. Se evaluó la adherencia individual de cada compuesto que contenía el elemento de interés, además de una mezcla representativa de todos en las siguientes proporciones: 30% octoborato de sodio tetrahidratado, 10% sulfato de cobre pentahidratado, 38% sulfato de manganeso monohidratado y 22% sulfato de cinc monohidratado. Una vez determinados los porcentajes máximos de adherencia se evaluó la eficiencia de 3 distintos adherentes: A, B y C de manera individual y en conjunto con todos los micronutrientes.

Para realizar las pruebas era importante moler los compuestos para obtener polvos con un tamaño de partícula igual o menor a 0.125 mm. ya que según la literatura los micronutrientes deben ser polvos muy finos para ser efectivos (Kenya Bureau of Standards, 2014) con diámetros menores a 0.149 mm (Silverberg, 1977). Es por esta razón que el primer paso para la evaluación del proceso de adherencia fue utilizar un molino de discos y tornillo sin fin ajustador; y un tamiz No. 120 con diámetro de partícula 0.125 mm. También fue necesario tamizar con un colador el nitrato de amonio para remover el polvo segregado propio del fertilizante en su empaque y reducir esa fuente de error en los resultados.

Para el mezclado se utilizó una mezcladora tipo tambor rotatorio con dos aspas internas semejante a una de concreto. Es importante mencionar que se observó corrosión en los tornillos y tuercas internas luego de realizar algunas pruebas y fue necesario colocar accesorios de acero inoxidable. Para las pruebas de mezcla simple en las que aún no se agregaba un adherente, el tiempo de mezclado fue de 1 minuto agregando el nitrato de amonio junto con el/los compuesto(s) de

interés. En cuanto a las pérdidas de polvos, estas se registran en el Capítulo XI de Anexos en Datos Originales, y se refieren a pequeñas cantidades de los compuestos metálicos finos que no estuvieron en contacto con el fertilizante granular por adherirse a los espacios huecos o esquinas de las aspas dentro del equipo. Estos representan menos del 0.6% del peso total de las muestras.

Para la determinación de los porcentajes máximos de adherencia se realizaron pruebas individuales agregando a 1 kilogramo de nitrato de amonio los micronutrientes en cantidades entre 3 a 6 % m/m. Los compuestos con mejor adherencia fueron el octoborato de sodio y el sulfato de cobre con porcentajes mayores al 85%. Los micronutrientes que no se adhirieron sin adherentes fueron el sulfato de cinc, con una adherencia muy baja (< 40%) y el sulfato de manganeso que presentó una adherencia prácticamente nula (< 5%). El estándar que debía alcanzarse para el cumplimiento de calidad del producto final para todas las materias primas era de un porcentaje de adherencia mayor al 90%. Los porcentajes anteriores confirmaron la necesidad de evaluar distintos adherentes.

El octoborato de sodio se evaluó en un 6% m/m, al agregar 60 gramos a 1 kilogramo de fertilizante nitrogenado. Se obtuvo un porcentaje medio de adherencia del $90.677 \pm 1.643\%$ (Cuadro 11). Al comparar este resultado con el dato reportado por Silverberg (1977:12) en el cuadro 3, en el cual obtuvo un porcentaje de adherencia inmediata sin adherente del octoborato de sodio del 40% utilizando una tamiz No.150, se observa que la adherencia es mayor en nitrato de amonio que en fosfato diamónico, como fertilizante base.

Este compuesto se agregó en un 6% m/m, comparado con el resto de sales que se agregaron al 3% m/m, porque existe una deficiencia mucho más severa de boro en suelos de regiones volcánicas en Guatemala respecto al resto de elementos (Terraza, 2018). Es por esta razón que es necesario tener un amplio rango de adherencia al momento de formular los fertilizantes específicos de la región.

El segundo compuesto con mayor porcentaje de adherencia fue el sulfato de cobre. En el Cuadro 13 se observa que tuvo una media de adherencia total del $86.980 \pm 1.664\%$ al agregar 30 gramos a 1 kilogramo de nitrato de amonio. Con este compuesto en particular, se observa una

coloración azul al agregarse en el fertilizante. Ambos compuestos metálicos, sulfato de cobre y octoborato de sodio, tienen menores densidades comparadas con el sulfato de manganeso y cinc que tuvieron porcentajes de adherencia bajos. Esto puede explicar la facilidad o la dificultad que presentaron las sales por adherirse al fertilizante nitrogenado.

En el caso del sulfato de manganeso se comprobó que es el compuesto con menor adherencia comparado con el resto. Se alcanzó un porcentaje de adherencia del $3.867 \pm 2.177\%$ (Cuadro 15) al agregarse en un 3% m/m. En la descarga de la mezcladora se observaba como el polvo se quedaba al fondo, completamente segregado y pegado a las paredes. Por lo que se puede concluir que este compuesto individualmente sin adherente no se adhiere al fertilizante. Al comparar con el dato reportado por Silverberg (1977:12) se puede observar que se obtuvo un rendimiento más bajo, ya que el autor reporta un 18% utilizando el mismo fertilizante base.

En las pruebas con sulfato de cinc también se observaron restos de polvo en el fondo de la mezcladora que no se adherían al nitrato de amonio. Aunque este compuesto tiene mayor adherencia que el sulfato de manganeso no tiene porcentajes tan altos como los compuestos de boro y cobre. Al realizar las pruebas con 30 gramos, donde representaba el 3% m/m (Cuadro 16) había mayor cantidad de polvo que no se adhería comparado con el que sí lo hacía. En este caso la media de adherencia fue del $32.412 \pm 7.571\%$ (Cuadro 17) y se puede concluir que este compuesto individualmente sin adherente no se adhiere al fertilizante a la cantidad que es requerida por control de calidad. Al comparar con el dato teórico reportado por Silverberg (1977:12) se observa que los resultados no se asemejan, ya que él no tuvo adherencia alguna de este sulfato al fertilizante granular de fosfato diamónico.

Una vez determinados los porcentajes de adherencia individuales se realizaron cinco pruebas con una mezcla de todos los micronutrientes (Cuadro 18). Al agregarlos en un porcentaje del 10% m/m se obtuvo una media del porcentaje de adherencia de $31.066 \pm 1.241\%$ (Cuadro 19). Se observó en las muestras la coloración azul en las perlas de nitrato de amonio y la segregación de las sales de manganeso y cinc en el fondo y, paredes de la mezcladora. Describiendo el mismo comportamiento que en las pruebas de adherencia individual.

El segundo objetivo era evaluar la efectividad de los adherentes A, B y C a través de pruebas de mezclado simple entre nitrato de amonio y los metales de manganeso, cobre, cinc y boro para determinar el volumen en mililitros de cada uno por kilogramo de nitrato de amonio necesarios para adherir las sales en un porcentaje mayor al 90%. Silverberg (1977:11) indica que esta técnica denominada *coating* o de recubrimiento reduce el problema de segregación. Se realizaron mezclas individuales en triplicado de cada adherente con cada compuesto que contiene al metal de interés. Iniciando con las pruebas de sulfato de manganeso por ser el compuesto con menor porcentaje de adherencia.

En las pruebas individuales se agregó el sulfato de cinc, cobre y manganeso al 3% m/m; y el octoborato de sodio al 6% m/m. El mezclado se realizó en 3 etapas, cada una por 1 minuto: primero se colocó 1 ml de adherente con un gotero al nitrato de amonio, luego se agregó la sal y por último el resto de adherente mililitro por mililitro, midiendo el porcentaje de polvos no adheridos y adheridos con cada adición volumétrica. Se realizó este procedimiento tomando en cuenta que Silverberg (1977:11) recomienda adicionar una pequeña cantidad de aglutinante primero y luego de agregar las sales, el resto. La adhesión de los compuestos al nitrato de amonio es de tipo mecánica donde el adherente actúa como el adhesivo a nivel macroscópico.

La efectividad se vio o evaluó a partir de los volúmenes necesarios para alcanzar los porcentajes de adherencia mayores al 95%, estos variaron entre los tres productos evaluados. A partir de la comparación entre los volúmenes de los adherentes A, B y C por kilogramo de fertilizante nitrogenado para cada metal, se determinó el más efectivo para la adherencia de una mezcla de micronutrientes al 6% m/m. Se determinó que para el adherente A se necesitan 6 ml/kg, para el B 11 ml/kg y para el C 5 ml/kg. El motivo por el cual se empezó con 1 ml/kg es porque estos agentes adherentes se adicionan en cantidades muy bajas, desde 2 litros por tonelada. El producto final presentó una tenue coloración azul y blanca por el sulfato de cobre y el resto de las sales. Se observó a los gránulos de nitrato de amonio secos recubiertos con los polvos adheridos a ellos (figuras 30 a 32).

En la Figura 8 se observa el comportamiento del porcentaje de adherencia del sulfato de manganeso al variar el volumen de adherente A agregado a la mezcla. Considerando que el sulfato de manganeso individualmente tenía un porcentaje medio de adherencia del $3.867 \pm 2.177\%$ se puede concluir que con el volumen inicial de 2 ml/kg la diferencia ya era significativa con un

promedio de $54.138 \pm 1.925\%$ de adherencia. Se determinó que para alcanzar una media de adherencia del $99.052 \pm 0.821\%$ son necesarios 6 ml/kg (Cuadro 25).

El mismo volumen se necesitó del adherente B para alcanzar un porcentaje de adherencia del 100% (Cuadro 25). En la Figura 9 se observa el comportamiento del porcentaje de adherencia para este adherente. Y se ve que a partir de 3 ml/kg ya existe un aumento significativo en la adherencia pasando de un 52 a un 89% aproximadamente. El mismo cambio se observa en la Figura 10 para el adherente C al agregar 3 ml/kg. Pero en este caso se necesitó 1 ml menos que con los dos anteriores para alcanzar un 100% de adherencia, siendo de 5 ml/kg.

Después de comprobar que los 3 adherentes fueron eficaces para la adherencia del elemento con menor porcentaje de adherencia individual de manganeso, se realizaron pruebas con el resto de elementos. En el Cuadro 26 se enlistan los resultados obtenidos para el sulfato de cinc que también presentaba una baja adherencia del $32.412 \pm 7.571\%$. En este caso el adherente que menor volumen requirió fue el A con 3 ml/kg alcanzando una media de adherencia del $99.054 \pm 0.819\%$ (Cuadro 27). Comparado con el manganeso que necesitaba 5 ml/kg. En la Figura 11 se observa cómo desde que se agregan 2 ml/kg a la mezcla ya hay una media de adherencia del $83.499 \pm 7.323\%$.

Se determinó que son necesarios 4 ml/kg de adherente C para alcanzar el mismo porcentaje de adherencia que con el aglutinante A (99%). En cambio, con el B fueron necesarios 11 ml/kg para adherir el compuesto en un $98.579 \pm 0.003\%$ (Cuadro 27). De todas las pruebas realizadas, este fue el volumen más grande de adherente necesario para adherir un polvo metálico, esto puede ser debido a la composición del adherente. Las pruebas fueron realizadas en triplicado y describen un comportamiento muy similar al agregar los 2, 5, 8 y 11 ml/kg como se observa en la Figura 12.

En el caso del octoborato de sodio fueron necesarios 3 ml/kg del adherente A y B para alcanzar porcentajes medios de adherencia del 99% (Cuadro 21). Y al igual que con el manganeso, el adherente C requirió un menor volumen para alcanzar la misma efectividad con 2 ml/kg. Ya que este compuesto presentaba una alta adherencia por si solo de $90.677 \pm 1.643\%$, se observa en las figuras 6 y 7 que con 2 ml/kg de los aglutinantes A y B ya se alcanzaban valores por arriba del 91%.

El sulfato de cobre fue el compuesto que menor volumen (2 ml/kg) de adherentes necesitó para alcanzar adherencias del 97 al 100% (Cuadro 23). Aunque su adherencia individual era semejante a la del octoborato de sodio con un porcentaje alto de $86.980 \pm 1.664\%$, se utilizó 1 ml menos para los aglutinantes A y B.

Las muestras del producto final fueron enviadas a laboratorio para la cuantificación de la concentración de los elementos adheridos por medio de espectroscopia de absorción atómica. Como se observa en la sección VI de Resultados, se logró cuantificar cada elemento de forma satisfactoria, a pesar de la variabilidad que supone analizar submuestras pequeñas para productos voluminosos. Los resultados de los porcentajes masa masa promedios de las muestras analizadas en triplicado para las muestras con y sin adherentes se muestran en los cuadros 29 al 32 para boro, cobre, manganeso y cinc.

En la última columna de cada cuadro se observan los porcentajes de rendimiento de cada elemento. Las recuperaciones respecto a la adherencia experimental calculada varían entre 52.016% y 197.439% para el cobre, 111.460% y 342.643% para el B, 5.583% y 131.823% para el manganeso y 70.051% y 145.623% para el cinc. La variabilidad obtenida en estos porcentajes de recuperación puede deberse al tamaño de la submuestra tomada para el análisis y la variabilidad de la cantidad de polvo adherido a las perlas de fertilizante analizadas. Sin embargo, la capacidad de detección de los micronutrientes en el fertilizante se considera un resultado exitoso.

En cuanto al boro se observa en el rango de adherencia experimental que su concentración siempre alcanzó las cantidades agregadas a las muestras, estando por encima de la concentración teórica. En el Cuadro 30 se reportan los porcentajes de rendimiento y se comprueba que es el microelemento que presenta una mejor adherencia individual y en conjunto. En el caso del cobre (Cuadro 31) se comprueba su alto porcentaje de adherencia individual sin adherentes al obtener un porcentaje de rendimiento promedio del 79.673%. Con los tres adherentes A, B y C se obtienen altas concentraciones experimentales superiores o muy cercanas a las teóricas.

Para el manganeso, en el Cuadro 32 se observa que la mayor concentración promedio obtenida fue con el adherente B en las muestras individuales y con mezcla de micronutrientes. Y que las concentraciones cuantificadas en las muestras 1.Mn.A y 1.Mn.C para los adherentes A y C son muy

similares entre ellas. Se comprueba nuevamente que la media de la adherencia individual sin adherente del metal (muestra Mn) es casi nula con un rendimiento del 13.281%.

Para el cinc (cuadro 33) se alcanzan altas concentraciones con los adherentes A, B y C, siendo mayores al 92% para las muestras individuales de adherencia y mayores a 114.422% en conjunto con el resto de microelementos. El rendimiento promedio de las pruebas individuales sin adherentes es del 81.648%, como se discutió anteriormente el sulfato de cinc tuvo una adherencia individual del 32% por lo que no se esperaría un porcentaje tan alto. Probablemente se tomaron muestras que contenían la mayor cantidad de polvos y no son representativas del resto.

Puede concluirse que el adherente C fue el que presentó una mayor adherencia utilizando un menor volumen por kilogramo de fertilizante para los compuestos con los elementos boro y manganeso. El cobre por tener una alta adherencia individual solamente necesitó 2 ml/kg de cada uno de los 3 adherentes. Para el sulfato de cinc se necesitó el mayor volumen registrado de adherente por kilogramo de nitrato de amonio con 11 ml/kg del adherente B. Se recomienda el adherente C por tener resultados efectivos con un menor volumen y cuantificar cada elemento de manera satisfactoria. En cuanto a la comparación entre la composición de los 3 adherentes, el adherente C difiere del A y B por ser un adherente a base de copolímeros de resina acrílica, no iónico, en dispersión acuosa empleado como puente de unión manteniendo sus características durante largo tiempo. Comparado con los otros dos que eran soluciones a base de agua con mezclas de agentes humectantes que aceleran la penetración de agua y aumentan su retención.

Tomando los resultados individuales de cada elemento se realizaron mezclas de 60 g de micronutrientes con las mismas proporciones que en las pruebas sin aglutinantes para la comprobación de la efectividad de los adherentes. Se utilizaron volúmenes de 6 ml/kg para el adherente A, 11 ml/kg para el B y 5 ml/kg para el C (cuadro 28). El tiempo de mezclado de todas las materias primas después de agregar el 50% inicial de adherente y micronutrientes, fue de 3 minutos. Esto difiere de la metodología anterior sin adherentes, en la que era solamente 1 minuto. Ya que se observó que no todas las sales se habían terminado de adherir luego de este corto periodo de tiempo.

En el Cuadro 28 se enlistan los porcentajes de polvos adheridos de micronutrientes a 1 kilogramo de nitrato de amonio con los volúmenes anteriores. Se corrieron pruebas con 5 ml/kg y 6 ml/kg para el adherente A, para descartar la posibilidad de utilizar menor volumen. Se comprobó que el mayor porcentaje de adherencia ($99.291 \pm 0.001\%$) se alcanza con 6 ml/kg. Para el adherente

B se encontró una adherencia del $98.648 \pm 2.342\%$ añadiendo 11 ml/kg y para el aglutinante C de un $97.066 \pm 0.960\%$ utilizando 5 ml/kg (Cuadro 29). Para estos dos últimos, se realizaron pruebas con un 1 ml más para observar si se daba una adherencia del 100% y se observó que ya no ocurría una mezcla uniforme en la mezcladora. El fertilizante multinutriente se adhería a las paredes durante la operación a pesar del movimiento y aspas internas del equipo. Al producto final multinutriente se le realizó también análisis de cuantificación para cada elemento.

Se realizaron pruebas a una escala 10 veces mayor utilizando 10 kilogramos de nitrato de amonio y micronutrientes en las mismas proporciones que las pruebas a menor escala con el fin de comprobar si el comportamiento de los micronutrientes era el mismo. Los resultados reportados en el Cuadro 34 muestran que se obtuvieron porcentajes de adherencia del 95.342% para el adherente A con, 94.143% para el adherente B y 95.581% para el adherente C. Con estos datos se comprueba que los adherentes sí son efectivos para la producción de fertilizantes nitrogenados recubiertos con micronutrientes varios y que es posible obtener un producto formulado de alta calidad (figuras 33, 34 y 35).

Para evaluar las características finales de las mezclas multinutrientes con y sin adherentes el primer paso fue calcular el porcentaje polvos adheridos y no adheridos, discutidos anteriormente, para poder determinar el porcentaje máximo de adherencia. Para evaluar la vida de anaquel de las muestras de 1 kilogramo de nitrato de amonio, estas fueron almacenadas en empaques con sello hermético, en ambientes libres de humedad y techados. Desde el momento de su mezclado hasta finalizadas las pruebas para determinar el porcentaje de polvos segregados con el tiempo.

En el Cuadro 37 se presentan los porcentajes de segregación sobre el peso total de la muestras. La fase experimental del proyecto de graduación fue de 4 meses aproximadamente, por lo que las muestras más antiguas tenían ese periodo de tiempo al tamizar de nuevo las muestras mientras que las más recientes tenían dos meses desde su realización. Es importante mencionar que este tipo de producto es de rápida utilización y no se almacena por períodos de más de dos semanas en bodega. Por lo que los resultados registran un periodo de tiempo aún más largo al que sería necesario para la empresa.

Se determinó que el incremento de la segregación a través del tiempo representa menos del 0.2% m/m promedio para todas las muestras con adherente, cumpliendo con el requerimiento de que se mantuviera menor al 5%. Los datos individuales se encuentran en el Cuadro 59 en el Capítulo XI de Anexos. En cuanto a la liberación de micronutrientes en el suelo, se enviaron a analizar las muestras del suelo posterior a haber aplicado a el fertilizante nitrogenado recubierto con adherentes y micronutrientes en duplicado a un laboratorio. Las cantidades utilizadas fueron dosis comerciales para plantas en contenedores. Los resultados originales del análisis de suelos se encuentran en el apartado de Anexos cuadros 60 al 66. En el Cuadro 35 se resumen las propiedades físicas y químicas relevantes al experimento para los suelos analizados (pH del suelo, concentraciones en ppm de los micronutrientes de interés y, nitrógeno como amonio y nitrato). Al comparar con los parámetros de la muestra control sin fertilizante se puede observar que en todas las muestras el pH disminuyó de neutro a ácido, debido a la acción acidificante de los fertilizantes nitrogenados por el ión nitrato que tiene carga negativa y no se retiene en el suelo.

También se observó que las cantidades agregadas de micronutrientes a las muestras permitieron que las concentraciones aumentaran en los resultados, comparando con la muestra control sin fertilizante, y para los suelos fertilizados se logró llegar a los rangos adecuados para cada nutriente. La discusión de los niveles absolutos de cada nutriente excede el alcance de este trabajo de graduación. El objetivo era determinar si tras la aplicación del fertilizante elaborado era posible incrementar la disponibilidad de micronutrientes en el suelo, y esto se comprobó con éxito.

El elemento que presentó un mayor cambio de concentración fue el manganeso. Este sobrepasó las 20 ppm en todas las muestras, a pesar de estar inicialmente en 4.2 ppm. El cinc que aumentó en 15 unidades aproximadamente, pasando de 5.3 ppm a un promedio de 20 ppm. Todos los adherentes presentaron el mismo comportamiento para su liberación en el suelo. En cuanto al cobre, este aumentó en promedio 11 ppm, estando inicialmente en 5.9 ppm. El elemento que presentó un menor incremento es el boro, que aumentó en 4 unidades en promedio en todas las pruebas, pasando de estar en una cantidad mínima de 0.2 ppm a 4.5 ppm en promedio. Estos resultados confirman la dinámica de este elemento que justifica el incremento del %m/m evaluado respecto a los otros nutrientes.

Se comprobó que sí existe una liberación de micronutrientes en el suelo a través del nitrato de amonio recubierto por micronutrientes utilizando los adherentes A, B y C. También se observó la acidificación del suelo, lo cual es importante para la absorción correcta de los micronutrientes metálicos ya que se vuelven más accesibles el cobre, manganeso y cinc, no necesariamente el boro (su máxima absorción se da en pH alcalino) (Sparks, 1996). Esto podría explicar por qué, a pesar de ser el segundo elemento más abundante en la mezcla física, resultó ser el que se liberó en menor concentración. La liberación de nutrientes en el suelo se da a través de la difusión de los compuestos al disociarse en sus electrolitos. Los coeficientes de difusión de cada uno se calcularon mediante la ecuación de Nernst donde se considera un sistema a dilución infinita (Cuadro 67).

En cuanto a los costos se calcularon los incrementos que representan para la empresa producir 1 tonelada métrica de nitrato de amonio con micronutrientes en un 5% m/m recubierto con los adherentes A, B o C. Los costos totales de cada formulación se enlistan en el cuadro 36 junto con el costo de una mezcla física convencional en la cual los micronutrientes se agregan como gránulos y sin adherentes. Por cuestiones de confidencialidad no se desglosa cada costo, pero la diferencia entre costos se debe al uso del molino de martillos en el proceso de producción en la planta de “Fertilizantes de Guatemala”, la adición de adherentes y de micronutrientes estándares. El adherente B muestra el mayor costo incremental con un 19.18%, le sigue el adherente A con un 11.73% y el C con un 9.10%, siendo el menor. Nuevamente, se comprueba que el uso del adherente C en la formulación del producto final favorece, no sólo la adición de los elementos en porcentajes de adherencia altos con un menor volumen por kilogramo de fertilizante, sino que también es el más rentable económicamente.

VIII. CONCLUSIONES

A. Los porcentajes máximos de adherencia, sin agregar productos adherentes, son del $90.677 \pm 1.643\%$, $86.980 \pm 1.664\%$, $3.867 \pm 2.177\%$, $32.412 \pm 7.571\%$ y $31.066 \pm 1.241\%$ para boro, cobre, manganeso, cinc y una mezcla multinutrientes, respectivamente; evaluando en un 6% m/m para boro, 3% m/m para el resto de los nutrientes, y 10% m/m de mezcla multinutriente.

B. Se comprobó la efectividad de los adherentes A, B y C al observar un incremento en la adherencia de micronutrientes (boro, cobre, manganeso, cinc y una mezcla de todos los anteriores) en partículas de nitrato de amonio utilizando el proceso de recubrimiento con dosis de adherentes entre 5 y 11 ml/kg de fertilizante nitrogenado.

C. Se comprobó la efectividad de los adherentes A, B y C al obtener porcentajes máximos de adherencia con valores superiores al 97% en mezclas con un 6% m/m de boro, 3% m/m para el resto de los nutrientes, y 6% m/m de mezcla multinutriente.

D. El fertilizante nitrogenado recubierto con micronutrientes tiene en todas sus variantes menos de 1.00% m/m de partículas de polvo segregadas sobre el total de la muestra al momento de la preparación y aumenta en promedio un 0.20% después de transcurrido su máximo período de anaquel.

E. El fertilizante nitrogenado recubierto con micronutrientes tiene un costo incremental, con respecto a una mezcla física convencional, de \$39.82/t utilizando el adherente A, \$65.14/t con el adherente B y \$30.92/t con el adherente C.

F. Se determinó mediante un análisis de suelos que el fertilizante nitrogenado con micronutrientes recubierto es capaz de liberar los micronutrientes en el suelo e incrementar las concentraciones disponibles de todos los elementos evaluados.

IX. RECOMENDACIONES

- A. Se recomienda agregar el aglutinante en forma de spray para mejores resultados, al tener una mayor superficie de contacto que al hacerlo por medio de goteo.
- B. Se recomienda evitar exceder un tiempo de mezclado total de más de 5 minutos, ya que se observa la segregación de las perlas de nitrato de amonio.
- C. Se recomienda realizar un estudio de estabilidad para conocer el tiempo efectivo de mezclado en la planta de producción utilizando revoluciones por minuto más bajas.
- D. Se recomienda realizar un trabajo de investigación que evalúe otros micronutrientes (molibdeno y hierro) y que se evalúen otros fertilizantes base (por ejemplo, otras fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio).
- E. Se recomienda realizar una evaluación de la eficiencia agronómica del fertilizante nitrogenado recubierto con micronutrientes para determinar la eficiencia tras su aplicación en suelos y cultivos de interés.
- F. Se recomienda estudiar la heterogeneidad que se da en las mezclas al agregar los micronutrientes individuales y en conjunto sobre el fertilizante base.

X. BIBLIOGRAFÍA

- A. Adams, C; Frantz, J. y Bugbee, B. 2013. «Macro and micronutrient release characteristics of three polymer-coated fertilizers: theory and measurements». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. (176):76-88.
- B. Agroproductores. (2016-2020). Compatibilidad de los fertilizantes en el fertirriego. México: *Agroproductores*. Recuperado de: <http://agroproductores.com/>.
- C. *Australian Custom Blends*. 2012. Incitec Pivot Fertilisers. 39 págs.
- D. *Blending fertilizers code of practice*. 2014. Kenya Standard. 15 págs.
- E. Chévez, R. 2003. *Evaluación de nitrato de amonio y nitrógeno total como fertilizantes nitrogenados aplicados en diferentes dosis en caña de azúcar (Saccharum officinarum L.)*. Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala. 74 págs.
- F. Conforti, L. y Romo, D. 2016. *Producción de nitrato de amonio*. Argentina, Universidad Nacional de Cuyo. 265 págs.
- G. *Hoja de seguridad para solubor*. 2014. UNE AGRO, Drokasa. Perú. 2 págs.
- H. Gowariker, V, et al. 2009. *The Fertilizer Encyclopedia*. India, Vasudha Research and Publications. 800 págs.
- I. Guerrero, R. (s.f). *Propiedades generales de los fertilizantes sólidos, manual técnico*. Colombia, Monómeros Colombo Venezolanos. 40 págs.
- J. Haifa y Brometan. 2007. *Compatibilidad de los fertilizantes*. 2ª ed. Argentina.
- K. Kozicki, C. (2020). Choosing a binder in the agglomeration process. Extraído de: <https://feeco.com/choosing-binder-agglomeration-process/#:~:text=A%20binder%20helps%20to%20achieve,together%20while%20forming%20the%20pellets>.
- L. *Handbook of Solid Fertiliser Blending*. 2016. European Fertilizer Blenders Association. 49 págs.
- M. Martí, L. et al. 2002. «Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos». *Departamento de Ing. Agrícola, Chacras de Coria, Mendoza, Argentina*. XXXIV (2):6.
- N. Martínez, M. 1992. *Adhesión, tecnología y fundamentos*. España, Universidad de Alicante e INESCOP.

- O. McKean, S. 1993. *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal*. Colombia, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 97 págs.
- P. *Ficha de datos de seguridad cobre (II) sulfato pentahidratado*. 2020. Merck. Alemania. 17 págs.
- Q. *Ficha de datos de seguridad manganeso (II) sulfato monohidratado*. 2020. Merck. Alemania. 14 págs.
- R. *Ficha de datos de seguridad cinc sulfato pentahidratado*. 2020. Merck. Alemania. 32 págs.
- S. Alves, G, *et al.* 20105. « Methods of adding micronutrients to a NPK formulation and maize development». *Journal of Plant Nutrition, Universidad Laval*. 52 págs.
- T. Morel, P. 1971. *Tecnología de los fertilizantes*. Santiago de Chile, Chile, Editorial Andres Bello. 233 págs.
- U. Mortvedt, J. 1979. *Micronutrient fertilizer technology and use in the United States*. Alabama, Estados Unidos, National Fertilizer Development Center. 22 págs.
- V. Nikolayevich, A, *et al.* 2017. *Constructing slow-release formulations of ammonium nitrate fertilizer based on degradable poly(3-hydroxybyrate)*. Estados Unidos, University of Florida Libraries. 39 págs.
- W. *Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes*. (s.f.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). 83 págs.
- X. Parewa, H, *et al.* 2010. «Knowledge of Fertilizer Mixing is Key for Improving Nutrient Use Efficiency». *Department of Soil Science and Agricultural Chemistry, Institute of Agricultural Sciences, CHU, Varanasim Uttar Pradesch*. 3 (4):381-383.
- Y. Peacock, L. y Johnston, R. 2015. *Estados Unidos. US2015/0251962 A1*. Plymouth, Minnesota. Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos.
- Z. Perry, R. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th edition*. Estado Unidos, Mc Graw-Hill. 2430 págs.
- AA. Robinson, R. y Stokes, R. 1959. *Electrolyte solutions*. Estados Unidos, Dover Publications. 565 págs.
- BB. Silverberg, J; Young, R. y Hoffmeister, G. 1977. *Preparation of fertilizers containing micronutrients*. Tennessee, Estados Unidos, National Fertilizer Development Center. 18 págs.

- CC.Skoog, D. *et al.* 2015. *Fundamentos de química analítica*. México, Cengage Learning. 958 págs.
- DD. Sparks, D. *et al.* 1996. *Methods of Soil Analysis*. Winsconsin, Estados Unidos, Soil Science Society of America. 1309 págs.
- EE. Stevenson, F. 1986. *Cycles of soil, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Estados Unidos, Wiley-Interscience Publication. 380 págs.
- FF. Taylor, L. 1992. *Memorias del seminario de fertilización balanceada: Métodos de producción de fertilizantes granulados NPK*. Valencia, Venezuela, Palmaven-INPOFOS. 6 págs.
- GG. Terraza, M. 2018. «Boron Adsorption and Desorption on Volcanic Ash-Derived Soils». *Department of Crop and Soil Sciences, University of Georgia, Estados Unidos*. (82):66-75.
- HH. *UN Industrial Development Organization*. 1998. Springer Science & Business Media. Estados Unidos. 616 págs.
- II. Voss, R. (1998). *Micronutrients*. Estados Unidos, Iowa State University. 69 págs.
- JJ. Warren, L; Smith, J. y Harriott, P. 2007. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 7ª edición*. México. McGraw Hill. 1187 págs.
- KK. Weil, R. y Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. Estados Unidos. Pearson. 1100 págs.

XI. ANEXOS

A. Datos originales:

1. Adherencia de micronutrientes al fertilizante nitrogenado sin adherentes:

Cuadro 38. Pesos de las muestras de adherencia de 60 gramos de boro en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso octoborato de sodio (g ± 0.5 g)	Peso inicial de la muestra (g ± 0.5 g)	Peso final de la muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1	999.0	60.0	1,059.0	1,059.0	0.0	4.991
2	999.0	60.0	1,059.0	1,059.0	0.0	6.731
3	999.0	60.0	1,059.0	1,059.0	0.0	5.059

Cuadro 39. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de cobre (g ± 0.5 g)	Peso inicial de la muestra (g ± 0.5 g)	Peso final de la muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1	998.0	30.0	1,028.0	1,028.0	0.0	4.250
2	998.0	30.0	1,028.0	1,028.0	0.0	4.134
3	998.0	30.0	1,028.0	1,028.0	0.0	3.908

Cuadro 40. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de manganeso (g ± 0.5 g)	Peso inicial de la muestra (g ± 0.5 g)	Peso final de la muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1	1,000.0	30.0	1,030.0	1,028.0	2.0	28.035
2	1,000.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	29.145
3	1,000.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	29.284

Cuadro 41. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de cinc (g ± 0.5 g)	Peso inicial de la muestra (g ± 0.5 g)	Peso final de la muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1	1,000.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	19.590
2	1,000.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	19.490
3	1,000.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	23.473

Cuadro 42. Pesos de las muestras de adherencia de una mezcla de 100 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso de micro-nutrientes ⁶ (g ± 0.5 g)	Peso inicial de la muestra (g ± 0.5 g)	Peso final de la muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1	1,001.0	100.0	1,101.0	1,101.0	0.0	68.203
2	1,001.0	100.0	1,101.0	1,101.0	0.0	69.376
3	1,001.0	100.0	1,101.0	1,101.0	0.0	70.646
4	1,001.0	100.0	1,101.0	1,101.0	0.0	69.083
5	1,001.0	100.0	1,101.0	1,101.0		67.360

⁶ Los 100 gramos de micronutrientes corresponden a 30.0 g de octoborato de sodio, 10.0 g de sulfato de cobre, 38.0 g de sulfato de manganeso y 22.0 g de sulfato de cinc.

2. Adherencia de micronutrientes en fertilizante nitrogenado con adherentes:

Cuadro 43. Pesos de las muestras de adherencia de 60 gramos de octoborato de sodio en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso octoborato de sodio (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1.B.A	2.0	1,000.0	60.0	1,062.0	1,062.0		1.425
	3.0	1,000.0	60.0	1,063.0	1,063.0	0.0	0.000
2.B.A	2.0	1,000.0	60.0	1,062.0	1,062.0		2.425
	3.0	1,000.0	60.0	1,063.0	1,061.0	2.0	0.425
3.B.A	2.0	1,000.0	60.0	1,062.0	1,062.0		5.425
	3.0	1,000.0	60.0	1,063.0	1,059.0	4.0	0.425
1.B.B	2.0	1,001.0	60.0	1,063.0	1,063.0		3.425
	3.0	1,001.0	60.0	1,064.0	1,062.0	2.0	0.425
2.B.B	2.0	1,001.0	60.0	1,063.0	1,063.0		1.425
	3.0	1,001.0	60.0	1,064.0	1,064.0	0.0	0.425
3.B.B	2.0	1,001.0	60.0	1,063.0	1,063.0		4.425
	3.0	1,001.0	60.0	1,064.0	1,062.0	2.0	0.425
1.B.C	2.0	1,000.0	60.0	1,062.0	1,062.0	0.0	0.425

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso octoborato de sodio (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
2.B.C	2.0	1,000.0	60.0	1,062.0	1,061.0	1.0	0.425
3.B.C	2.0	1,000.0	60.0	1,062.0	1,062.0	0.0	0.425

Cuadro 44. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de cobre (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001g)
1.Cu.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0	0.0	0.000
2.Cu.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,029.0	3.0	0.000
3.Cu.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0	0.0	0.000
1.Cu.B	2.0	998.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	0.425
2. Cu.B	2.0	998.0	30.0	1,030.0	1,029.0	1.0	1.425
3.Cu.B	2.0	998.0	30.0	1,030.0	1,030.0	0.0	0.425
1.Cu.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,029.0	3.0	0.000
2.Cu.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,030.0	2.0	0.425
3.Cu.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,031.0	1.0	0.425

Cuadro 45. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de manganeso en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de manganeso (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1.Mn.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		13.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		7.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		5.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		2.425
	6.0	1,000.0	30.0	1,036.0	1,033.0	3.0	0.425
2.Mn.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		13.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		7.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		5.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		4.425
	6.0	1,000.0	30.0	1,036.0	1,032.0	4.0	0.425
3.Mn.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		14.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		9.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		5.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		3.425

	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de manganeso (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
	6.0	1,000.0	30.0	1,036.0	1,032.0	4.0	0.000
1.Mn.B	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		19.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		3.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		0.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		0.000
	6.0	1,000.0	30.0	1,036.0	1,036.0	0.0	0.000
	2.Mn.B	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0	
3.0		1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		3.425
4.0		1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		2.425
5.0		1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		0.025
6.0		1,000.0	30.0	1,036.0	1,034.0	2.0	0.000
3.Mn.B	2.0	1,001.0	30.0	1,033.0	1,033.0		12.425
	3.0	1,001.0	30.0	1,034.0	1,034.0		3.425
	4.0	1,001.0	30.0	1,035.0	1,035.0		2.425
	5.0	1,001.0	30.0	1,036.0	1,036.0		0.425
	6.0	1,001.0	30.0	1,037.0	1,037.0	0.0	0.000

	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de manganeso (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1.Mn.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		13.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		0.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		0.000
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,033.0	2.0	0.000
2.Mn.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		16.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		5.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		3.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0	0.0	0.000
3.Mn.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		16.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0		4.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,034.0		1.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,032.0	3.0	0.000

Cuadro 46. Pesos de las muestras de adherencia de 30 gramos de sulfato de cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio variando el volumen de 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de cinc (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1.Zn.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		6.000
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,033.0	2.0	0.000
2.Zn.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		6.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,032.0	1.0	0.425
3.Zn.A	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0	-	2.425
	3.0	1,000.0	30.0	1,033.0	1,032.0	1.0	0.425
1.Zn.B	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		13.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		7.425
	8.0	1,000.0	30.0	1,038.0	1,038.0		4.425
	11.0	1,000.0	30.0	1,041.0	1,036.0	5.0	0.425
2.Zn.B	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		12.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		6.425
	8.0	1,000.0	30.0	1,038.0	1,038.0		3.425
	11.0	1,000.0	30.0	1,041.0	1,039.0	2.0	0.425

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso sulfato de cinc (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
3.Zn.B	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		15.425
	5.0	1,000.0	30.0	1,035.0	1,035.0		9.425
	8.0	1,000.0	30.0	1,038.0	1,038.0		5.425
	11.0	1,000.0	30.0	1,041.0	1,041.0	0.0	0.425
1.Zn.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		4.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,033.0	1.0	0.425
2.Zn.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		3.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,033.0	1.0	0.425
3.Zn.C	2.0	1,000.0	30.0	1,032.0	1,032.0		3.425
	4.0	1,000.0	30.0	1,034.0	1,029.0	5.0	0.000

Cuadro 47. Pesos de las muestras de adherencia de una mezcla de 60 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 1 kilogramo de nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes (A, B, C) en un proceso de mezcla simple.

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso de micro-nutrientes (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
1.Mx.A	5.0	1,000.0	60.0	1,065.0	1,065.0		4.425
	6.0	1,000.0	60.0	1,066.0	1,066.0	0.0	0.425
2.Mx.A	5.0	1,000.0	60.0	1,065.0	1,065.0		3.425
	6.0	1,000.0	60.0	1,066.0	1,066.0	0.0	0.425
3.Mx.A	5.0	1,000.0	60.0	1,065.0	1,065.0		3.925
	6.0	1,000.0	60.0	1,066.0	1,066.0	0.0	0.425
1.Mx.B	11.0	1,000.0	60.0	1,071.0	1,067.0	4.0	2.425
2.Mx.B	11.0	1,000.0	60.0	1,071.0	1,067.0	4.0	0.000
3.Mx.B	11.0	1,000.0	60.0	1,071.0	1,068.0	3.0	0.000
1.Mx.C	5.0	1,000.0	60.0	1,065.0	1,063.0	2.0	1.425
2.Mx.C	5.0	1,000.0	60.0	1,065.0	1,065.0	0.0	2.425
3.Mx.C	5.0	1,000.0	60.0	1,065.0	1,063.0	2.0	1.425

Cuadro 48. Pesos de las muestras de adherencia de una mezcla de 477 gramos de micronutrientes de boro, cobre, manganeso y cinc en 10 kilogramos nitrato de amonio utilizando 3 distintos adherentes en un proceso de mezcla simple a una escala 10 veces mayor que las pruebas anteriores.

No.	Peso de adherente (g ± 0.5 g)	Peso nitrato de amonio (g ± 0.5 g)	Peso de micro-nutrientes ⁷ (g ± 0.5 g)	Peso inicial muestra (g ± 0.5 g)	Peso final muestra (g ± 0.5 g)	Pérdidas en la mezcladora (g ± 0.5 g)	Peso de polvos no adheridos (g ± 0.001 g)
Mx.10.A	60.0	10,000.0	477.0	10,477.0	10,477.0	0.0	19.425
Mx.10.B	110.0	10,000.0	477.0	10,527.0	10,527.0	0.0	24.425
Mx.10.C	50.0	10,000.0	477.0	10,467.0	10,467.0	0.0	18.425

Cuadro 49. Parámetros de humedad de las materias primas utilizadas en la experimentación y producto final con adherente C obtenidos a partir de una balanza de humedad.

Materia prima	Porcentaje de humedad (%)
Sulfato de cobre pentahidratado	10.00
Sulfato de manganeso monohidratado	0.30
Sulfato de zinc monohidratado	1.74
Octoborato de sodio	2.73
Nitrato de amonio	0.97
Nitrato de amonio recubierto con adherente C y micronutrientes	2.02

⁷ Los 477 gramos de micronutrientes corresponden a 125.0 g de octoborato de sodio, 42.0 g de sulfato de cobre, 160.0 g de sulfato de manganeso y 90.0 g de sulfato de cinc.

3. Análisis químico elemental por espectroscopia de absorción atómica:

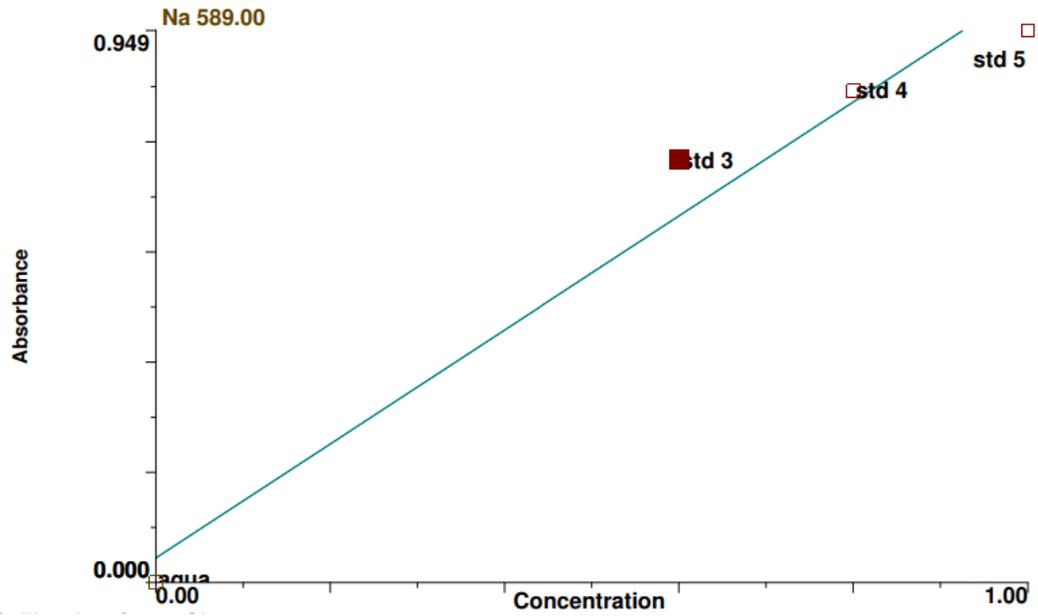


Figura 15. Curva de calibración para sodio mediante espectroscopia de absorción atómica.

Cuadro 50. Modelo matemático que describe curva de calibración para sodio.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación
$y = 0.9797x + 0.0424$	0.9847

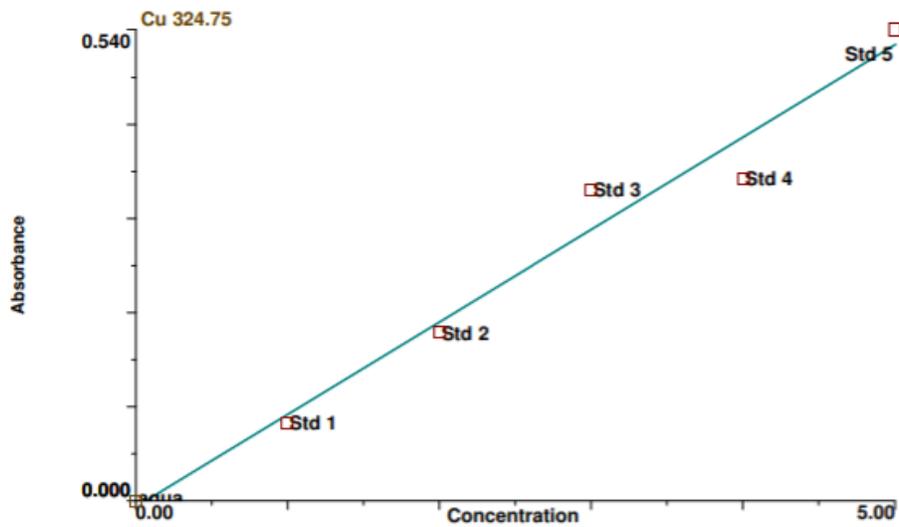


Figura 16. Curva de calibración para cobre mediante espectroscopia de absorción atómica.

Cuadro 51. Modelo matemático que describe curva de calibración para cobre.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación
$y = 0.1056x - 0.0069$	0.9877

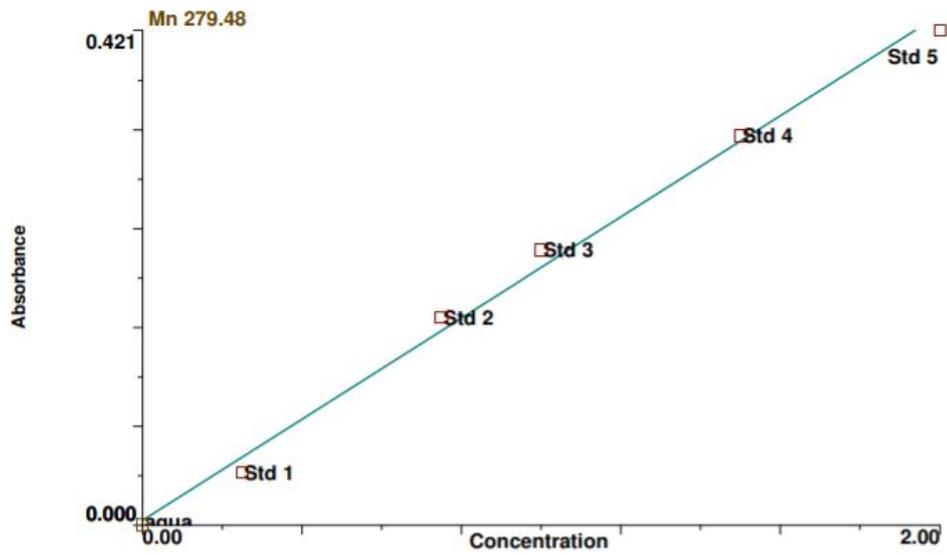


Figura 17. Curva de calibración para manganeso mediante espectroscopia de absorción atómica.

Cuadro 52. Modelo matemático que describe curva de calibración para manganeso.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación
$y = 0.2150x + 0.0041$	0.9973

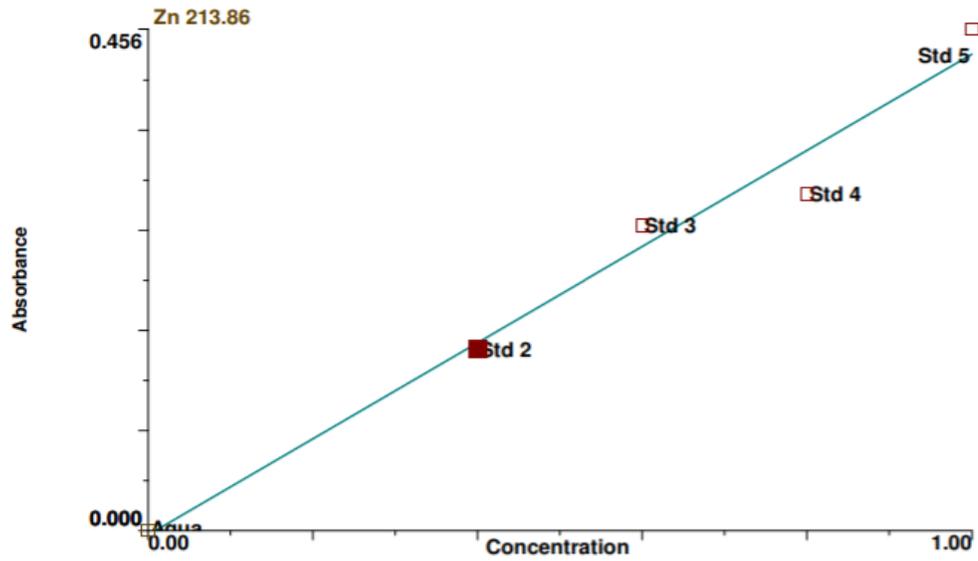


Figura 18. Curva de calibración para cinc mediante espectroscopia de absorción atómica.

Cuadro 53. Modelo matemático que describe curva de calibración para cinc.

Modelo matemático	Coefficiente de correlación
$y = 0.4372x - 0.0039$	0.9891

Cuadro 54. Determinación de sodio por espectroscopia de absorción atómica⁸.

Muestra: 1.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.0200	51.1601
2	1.0160	50.9594
3	1.0200	51.1601
Media	1.0187	51.0932
Desviación estándar	0.0023	0.1158
Muestra: 2.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.9900	49.6553
2	0.9760	48.9531
3	0.9810	49.2039
Media	0.9823	49.2708
Desviación estándar	0.0071	0.3558
Muestra: 3.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.9420	47.2478
2	0.9310	46.6961
3	0.9320	46.7462
Media	0.9350	46.8967
Desviación estándar	0.0061	0.3051

⁸ Se cuantificó sodio por ser un elemento que puede ser cuantificado por absorción atómica, el boro no lo es, y está contenido en el compuesto de octaborato de sodio.

Muestra: 1.B.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.0400	52.1632
2	1.0370	52.0127
3	1.0370	52.0127
Media	1.0380	52.0629
Desviación estándar	0.0017	0.869
Muestra: 1.B.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.2210	61.2416
2	1.2260	61.4924
3	1.2080	60.5896
Media	1.2183	61.1078
Desviación estándar	0.0093	0.4660
Muestra: 1.B.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.9640	48.3513
2	0.9650	48.4014
3	0.9600	48.1506
Media	0.9630	48.3011
Desviación estándar	0.0026	0.1327
Muestra: 1.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7520	37.6000
2	0.7540	37.7000

3	0.7490	37.4500
Media	0.7517	37.5833
Desviación estándar	0.0025	0.1258
Muestra: 2.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7280	36.4000
2	0.7240	36.2000
3	0.7150	35.7500
Media	0.7223	36.1167
Desviación estándar	0.0067	0.3329
Muestra: 3.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.8280	41.4000
2	0.8240	41.2000
3	0.8370	41.8500
Media	0.8297	41.4833
Desviación estándar	0.0067	0.3329
Muestra: 1.Mx.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.8560	42.8000
2	0.8470	42.3500
3	0.8440	42.2000
Media	0.8490	42.4500
Desviación estándar	0.0062	0.3122

Muestra: 1.Mx.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7750	38.7500
2	0.7790	38.9500
3	0.7720	38.6000
Media	0.7753	38.7667
Desviación estándar	0.0035	0.1756
Muestra: 1.Mx.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7950	39.7500
2	0.7860	39.3000
3	0.7760	38.8000
Media	0.7857	39.2833
Desviación estándar	0.0095	0.4752

Cuadro 55. Determinación de cobre por espectroscopia de absorción atómica.

Muestra: 1.Cu		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	2.5363	46.4682
2	2.5267	46.2923
3	2.5731	47.1424
Media	2.5454	46.6343
Desviación estándar	0.0245	0.4487
Muestra: 2.Cu		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.9457	35.6476
2	1.923	35.2318
3	1.9282	35.3270
Media	1.9323	35.4021
Desviación estándar	0.0119	0.2179
Muestra: 3.Cu		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.3411	24.5706
2	1.3327	24.4167
3	1.3313	24.3911
Media	1.3350	24.4595
Desviación estándar	0.0053	0.0971
Muestra: 1.Cu.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	3.865	70.8116

2	3.8205	69.9963
3	3.8513	70.5606
Media	3.8456	70.4562
Desviación estándar	0.0228	0.4176
Muestra: 1.Cu.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.7608	32.2600
2	1.6997	31.1406
3	1.6925	31.0087
Media	1.7177	31.4698
Desviación estándar	0.0375	0.6876
Muestra: 1.Cu.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	3.7268	68.2796
2	3.7645	68.9703
3	3.7884	69.4082
Media	3.7599	68.8860
Desviación estándar	0.0311	0.5690
Muestra: 1.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.2424	12.1200
2	0.2090	10.4500
3	0.1823	9.1150
Media	0.2112	10.5617
Desviación estándar	0.0301	1.5056

Muestra: 2.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1330	6.6500
2	0.1348	6.7400
3	0.1283	6.4150
Media	0.1320	6.6017
Desviación estándar	0.0034	0.1678
Muestra: 3.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1265	6.3250
2	0.1371	6.8550
3	0.1361	6.8050
Media	0.1332	6.6617
Desviación estándar	0.0059	0.2926
Muestra: 1.Mx.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.3525	17.6250
2	0.3589	17.9450
3	0.3738	18.6900
Media	0.3617	18.0867
Desviación estándar	0.0109	0.5465
Muestra: 1.Mx.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1985	9.9250
2	0.2045	10.2250

3	0.2051	10.2550
Media	0.2027	10.1350
Desviación estándar	0.0036	0.1825
Muestra: 1.Mx.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1998	9.9900
2	0.2010	10.0500
3	0.2009	10.0450
Media	0.2006	10.0283
Desviación estándar	0.0007	0.0333

Cuadro 56. Determinación de manganeso por espectroscopia de absorción atómica.

Muestra: 2.Mn		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1510	9.2031
2	0.1430	8.7156
3	0.1410	8.5937
Media	0.1450	8.8375
Desviación estándar	0.0053	0.3225
Muestra: 3.Mn		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1170	7.1309
2	0.1230	7.4966
3	0.1190	7.2528
Media	0.1197	7.2935
Desviación estándar	0.0031	0.1862
Muestra: 1.Mn.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.5610	34.1920
2	0.5550	33.8263
3	0.5490	33.4606
Media	0.5550	33.8263
Desviación estándar	0.0060	0.3657
Muestra: 1.Mn.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7780	47.4177

2	0.7870	47.9663
3	0.7910	48.2101
Media	0.7853	47.8647
Desviación estándar	0.0067	0.4058
Muestra: 1.Mn.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.5840	35.5938
2	0.5710	34.8015
3	0.5660	34.4967
Media	0.5737	34.9640
Desviación estándar	0.0093	0.5663
Muestra: 1.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.1000	5.0000
2	0.1040	5.2000
3	0.0970	4.8500
Media	0.1003	5.0167
Desviación estándar	0.0035	0.1756
Muestra: 2.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.0630	3.1500
2	0.0670	3.3500
3	0.0690	3.4500
Media	0.0663	3.3167
Desviación estándar	0.0031	0.1528

Muestra: 3.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.0800	4.0000
2	0.0810	4.0500
3	0.0830	4.1500
Media	0.0813	4.0667
Desviación estándar	0.0015	0.0764
Muestra: 1.Mx.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6460	32.3000
2	0.6460	32.3000
3	0.6590	32.9500
Media	0.6503	32.5167
Desviación estándar	0.0075	0.3753
Muestra: 1.Mx.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	1.1800	59.0000
2	1.1940	59.7000
3	1.1740	58.7000
Media	1.1827	59.1333
Desviación estándar	0.0103	0.5132
Muestra: 1.Mx.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7800	39.0000
2	0.7680	38.4000

3	0.7670	38.3500
Media	0.7717	38.5833
Desviación estándar	0.0072	0.3617

Cuadro 57. Determinación de cinc por espectroscopia de absorción atómica.

Muestra: 1.Zn		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.3530	33.0713
2	0.3510	32.8839
3	0.3440	32.2281
Media	0.3493	32.7277
Desviación estándar	0.0047	0.4427
Muestra: 2.Zn		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6790	63.6130
2	0.6700	62.7698
3	0.6690	62.6761
Media	0.6727	63.0196
Desviación estándar	0.0055	0.5160
Muestra: 3.Zn		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6530	61.1771
2	0.6360	59.5845
3	0.6390	59.8655
Media	0.6427	60.2090

Desviación estándar	0.0091	0.8501
Muestra: 1.Zn.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6500	60.8961
2	0.6560	61.4582
3	0.6540	61.2708
Media	0.6533	61.2084
Desviación estándar	0.0031	0.2862
Muestra: 1.Zn.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7430	69.6089
2	0.7380	69.1405
3	0.7400	69.3278
Media	0.7403	69.3591
Desviación estándar	0.0025	0.2358
Muestra: 1.Zn.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6340	59.3971
2	0.6260	58.6476
3	0.6140	57.5234
Media	0.6247	58.5227
Desviación estándar	0.0101	0.9431
Muestra: 1.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7070	35.3500

2	0.6920	34.6000
3	0.6740	33.7000
Media	0.6910	34.5500
Desviación estándar	0.0165	0.8261
Muestra: 2.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6220	31.1000
2	0.6200	31.0000
3	0.6150	30.7500
Media	0.6190	30.9500
Desviación estándar	0.0036	0.1803
Muestra: 3.Mx		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7070	35.3500
2	0.7070	35.3500
3	0.7140	35.7000
Media	0.7093	35.4667
Desviación estándar	0.0040	0.2021
Muestra: 1.Mx.A		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.6460	32.3000
2	0.6470	32.3500
3	0.6580	32.9000
Media	0.6503	32.5167
Desviación estándar	0.0067	0.3329

Muestra: 1.Mx.B		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.8240	41.2000
2	0.8290	41.4500
3	0.8300	41.5000
Media	0.8277	41.3833
Desviación estándar	0.0032	0.1607
Muestra: 1.Mx.C		
Corrida	Concentración en la muestra (ppm)	Concentración real en la muestra (ppm)
1	0.7170	35.8500
2	0.7140	35.7000
3	0.7160	35.8000
Media	0.7157	35.7833
Desviación estándar	0.0015	0.0764

4. Evaluación de características finales del fertilizante recubierto con fertilizantes:

Cuadro 58. Preparación de muestras de tierra y fertilizante multinutriente recubierto enviadas a análisis de suelos.

No. de prueba	Masa de tierra (g ± 0.5 g)	Masa de fertilizante (g ± 0.5 g)
Control	2,000.0	3.0
1.Mx.A	2,000.0	3.0
2.Mx.A	2,000.0	3.0
1.Mx.B	2,000.0	3.0
2.Mx.B	2,000.0	3.0
1.Mx.C	2,000.0	3.0
2.Mx.C	2,000.0	3.0

Cuadro 59. Pesos de las muestras para la determinación del porcentaje de segregación de polvos sobre el peso total de las muestras con el tiempo⁹ para la determinación de la vida de anaquel.

No. de prueba	Segregado (g ± 0.7 g)	Porcentaje que representa de la muestra total (%)	Tiempo de almacenamiento
1.B	1.00	0.094 ± 4.721E-02	4 meses
2.B	2.00	0.189 ± 4.721E-02	4 meses
3.B	1.00	0.094 ± 4.721E-02	4 meses
1.Cu	0.00	0.000	4 meses
2.Cu	0.00	0.000	4 meses
3.Cu	0.00	0.000	4 meses
1.Mn	-	-	-
2.Mn	0.00	0.000	4 meses

⁹ Las muestras han estado en almacenamiento de 2 a 4 meses desde su realización.

No. de prueba	Segregado (g ± 0.7 g)	Porcentaje que representa de la muestra total (%)	Tiempo de almacenamiento
3.Mn	0.00	0.000	4 meses
1.Zn	0.00	0.000	4 meses
2.Zn	1.00	0.097 ± 4.854E-02	4 meses
3.Zn	1.00	0.097 ± 4.854E-02	4 meses
1.Mx	2.00	0.182 ± 4.541E-02	4 meses
2.Mx	4.00	0.363 ± 4.541E-02	4 meses
3.Mx	3.00	0.272 ± 4.541E-02	4 meses
4.Mx	1.00	0.091 ± 4.541E-02	4 meses
5.Mx	3.00	0.272 ± 4.541E-02	4 meses
1.B.A	0.00	0.000	2 meses
2.B.A	0.00	0.000	2 meses
3.B.A	2.00	0.189 ± 4.721E-02	2 meses
1.Cu.A	1.00	0.094 ± 4.695E-02	2 meses
2.Cu.A	0.00	0.000	2 meses
3.Cu.A	1.00	0.094 ± 4.690E-02	2 meses
1.Mn.A	-	-	-
2.Mn.A	0.00	0.000	2 meses
3.Mn.A	1.00	0.097 ± 4.845E-02	2 meses
1.Zn.A	2.00	0.194 ± 4.840E-02	2 meses
2.Zn.A	1.00	0.097 ± 4.845E-02	2 meses
3.Zn.A	1.00	0.097 ± 4.845E-02	2 meses
1.Mx.A	1.00	0.094 ± 4.695E-02	2 meses
2.Mx.A	3.00	0.282 ± 4.695E-02	2 meses
3.Mx.A	5.00	0.469 ± 4.690E-02	2 meses
1.Mx.B	6.00	0.562 ± 4.686E-02	2 meses
2.Mx.B	3.00	0.281 ± 4.686E-02	2 meses

No. de prueba	Segregado (g ± 0.7 g)	Porcentaje que representa de la muestra total (%)	Tiempo de almacenamiento
3.Mx.B	5.00	0.468 ± 4.682E-02	2 meses
1.Mx.C	2.00	0.188 ± 4.704E-02	2 meses
2.Mx.C	3.00	0.282 ± 4.695E-02	2 meses
3.Mx.C	3.00	0.282 ± 4.704E-02	2 meses
1.B.A	4.00	0.377 ± 4.708E-02	2 meses
2.B.A	9.00	0.846 ± 4.699E-02	2 meses
3.B.A	6.00	0.565 ± 4.708E-02	2 meses
1.Cu.A	2.00	0.194 ± 4.854E-02	2 meses
2.Cu.A	2.00	0.194 ± 4.859E-02	2 meses
3.Cu.A	1.00	0.097 ± 4.854E-02	2 meses
1.Mn.A	1.00	0.097 ± 4.826E-02	2 meses
2.Mn.A	1.00	0.097 ± 4.836E-02	2 meses
3.Mn.A	0.00	0.000	2 meses
1.Zn.A	3.00	0.290 ± 4.826E-02	2 meses
2.Zn.A	1.00	0.096 ± 4.812E-02	2 meses
3.Zn.A	2.00	0.192 ± 4.803E-02	2 meses
1.B.A	1.00	0.094 ± 4.708E-02	2 meses
2.B.A	4.00	0.377 ± 4.713E-02	2 meses
3.B.A	3.00	0.282 ± 4.708E-02	2 meses
1.Cu.A	0.00	0.000	2 meses
2.Cu.A	2.00	0.194 ± 4.854E-02	2 meses
3.Cu.A	2.00	0.194 ± 4.850E-02	2 meses
1.Mn.A	0.00	0.000	2 meses
2.Mn.A	1.00	0.097 ± 4.831E-02	2 meses
3.Mn.A	1.00	0.097 ± 4.831E-02	2 meses
1.Zn.A	0.00	0.000	2 meses

No. de prueba	Segregado (g ± 0.7 g)	Porcentaje que representa de la muestra total (%)	Tiempo de almacenamiento
2.Zn.A	2.00	0.194 ± 4.848E-02	2 meses
3.Zn.A	0.00	0.000	2 meses

Cuadro 60. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 1.Mx.A.

PARAMETROS DE SUELOS		RANGO ADECUADO	
pH	5.94	5.50	7.20
pH (en KCl)	5.59	**	
Concentración de Sales (C.S.)	3.52 dS/m	0.2	0.8
Materia Orgánica (M.O.)	5.30 %	2.0	4.0
C.I.C.e	13.5 meq/100 ml	5.0	15.0
Saturación K	2.53 %	4%	6%
Saturación Ca	86.57 %	60%	80%
Saturación Mg	10.91 %	10%	20%
Saturación Al+H	0.00	<	20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl	N-NH 4	1050.0			**	
Nitrato en KCl	N-NO 3	79.0			**	
Fósforo Olsen Mod.	P-PO4	14.7	XXXX		30 - 75	120 P2O5
Fósforo	P	< 10.0	X		30 - 75	170 P2O5
Potasio	K	133.4	XXXXXXXXXX		150 - 300	180 K2O
Calcio	Ca	2344.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1000 - 2000	
Magnesio	Mg	177.2	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		100 - 250	
Azufre	S	19.2	XXXXXXXXXXXX		10 - 100	50 S
Boro Ext. Agua Caliente	B	3.3			**	
Cobre	Cu	13.7	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1 - 7	
Hierro	Fe	160.9	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		40 - 250	
Manganeso	Mn	19.9	XXXXXXXXXXXX		10 - 250	
Zinc	Zn	18.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		2 - 25	
Aluminio	Al	< 8.0	X		< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/mz

Cuadro 61. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 2.Mx.A.

PARAMETROS DE SUELOS		RANGO ADECUADO	
pH	5.93	5.50	7.20
pH (en KCl)	5.62	**	
Concentración de Sales (C.S.)	3.49 dS/m	0.2	0.8
Materia Orgánica (M.O.)	5.27 %	2.0	4.0
C.I.C.e	13.1 meq/100 ml	5.0	15.0
Saturación K	2.60 %	4%	6%
Saturación Ca	86.13 %	60%	80%
Saturación Mg	11.27 %	10%	20%
Saturación Al+H	0.00	<	20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl	N-NH 4	1150.0			**	
Nitrato en KCl	N-NO 3	65.5			**	
Fósforo Olsen Mod.	P-PO4	16.0	XXXXXX		30 - 75	100 P2O5
Fósforo	P	< 10.0	X		30 - 75	170 P ₂ O ₅
Potasio	K	132.7	XXXXXXXXXX		150 - 300	180 K ₂ O
Calcio	Ca	2257.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1000 -2000	
Magnesio	Mg	177.2	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		100 - 250	
Azufre	S	26.8	XXXXXXXXXXXX		10 - 100	30 S
Boro Ext. Agua Caliente	B	5.8			**	
Cobre	Cu	11.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1 - 7	
Hierro	Fe	161.4	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		40 - 250	
Manganeso	Mn	23.0	XXXXXXXXXXXX		10 - 250	
Zinc	Zn	22.5	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		2 - 25	
Aluminio	Al	< 8.0	X		< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/mz

Cuadro 62. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 1.Mx.B.

PARAMETROS DE SUELOS	RANGO ADECUADO	
pH	5.96	5.50 _ 7.20
pH (en KCl)	5.63	**
Concentración de Sales (C.S.)	3.75 dS/m	0.2 _ 0.8
Materia Orgánica (M.O.)	5.17 %	2.0 _ 4.0
C.I.C.e	12.9 meq/100 ml	5.0 _ 15.0
Saturación K	2.60 %	4% _ 6%
Saturación Ca	85.94 %	60% _ 80%
Saturación Mg	11.46 %	10% _ 20%
Saturación Al+H	0.00	< 20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl N-NH 4	1200.0				**	
Nitrato en KCl N-NO 3	72.5				**	
Fósforo Olsen Mod. P-PO4	17.6	XXXXXX			30 - 75	100 P2O5
Fósforo P	< 10.0	X			30 - 75	170 P ₂ O ₅
Potasio K	130.6	XXXXXXXXXX			150 - 300	180 K ₂ O
Calcio Ca	2212.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			1000 -2000	
Magnesio Mg	177.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			100 - 250	
Azufre S	17.2	XXXXXXXXXXXX			10 - 100	50 S
Boro Ext. Agua Caliente B	4.1				**	
Cobre Cu	9.2	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			1 - 7	
Hierro Fe	161.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			40 - 250	
Manganeso Mn	20.2	XXXXXXXXXXXX			10 - 250	
Zinc Zn	16.1	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			2 - 25	
Aluminio Al	< 8.0	X			< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/mz.

Cuadro 63. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 2.Mx.B.

PARAMETROS DE SUELOS		RANGO ADECUADO	
pH	5.95	5.50	7.20
pH (en KCl)	5.61	**	
Concentración de Sales (C.S.)	3.35 dS/m	0.2	0.8
Materia Orgánica (M.O.)	5.08 %	2.0	4.0
C.I.C.e	12.6 meq/100 ml	5.0	15.0
Saturación K	2.60 %	4%	6%
Saturación Ca	85.96 %	60%	80%
Saturación Mg	11.44 %	10%	20%
Saturación Al+H	0.00	<	20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl N-NH 4	1200.0				**	
Nitrato en KCl N-NO 3	66.0				**	
Fósforo Olsen Mod. P-PO4	15.0	XXXX			30 - 75	120 P2O5
Fósforo P	< 10.0	X			30 - 75	170 P2O5
Potasio K	127.8	XXXXXXXX			150 - 300	180 K2O
Calcio Ca	2170.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			1000 -2000	
Magnesio Mg	173.3	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			100 - 250	
Azufre S	36.6	XXXXXXXXXXXX			10 - 100	30 S
Boro Ext. Agua Caliente B	4.8				**	
Cobre Cu	12.2	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			1 - 7	
Hierro Fe	159.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			40 - 250	
Manganeso Mn	36.0	XXXXXXXXXXXX			10 - 250	
Zinc Zn	24.7	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			2 - 25	
Aluminio Al	< 8.0	X			< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/mz

Cuadro 64. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 1.Mx.C.

PARAMETROS DE SUELOS		RANGO ADECUADO	
pH	5.96	5.50	7.20
pH (en KCl)	5.53	**	
Concentración de Sales (C.S.)	3.26 dS/m	0.2	0.8
Materia Orgánica (M.O.)	5.23 %	2.0	4.0
C.I.C.e	12.6 meq/100 ml	5.0	15.0
Saturación K	2.61 %	4%	6%
Saturación Ca	86.00 %	60%	80%
Saturación Mg	11.39 %	10%	20%
Saturación Al+H	0.00	<	20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl N-NH 4	1050.0				**	
Nitrato en KCl N-NO 3	92.0				**	
Fósforo Olsen Mod. P-PO4	19.6	XXXXXX			30 - 75	100 P2O5
Fósforo P	< 10.0	X			30 - 75	170 P ₂ O ₅
Potasio K	128.0	XXXXXXXX			150 - 300	180 K ₂ O
Calcio Ca	2160.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			1000 -2000	
Magnesio Mg	171.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			100 - 250	
Azufre S	18.6	XXXXXXXXXXXX			10 - 100	50 S
Boro Ext. Agua Caliente B	4.7				**	
Cobre Cu	9.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			1 - 7	
Hierro Fe	158.2	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			40 - 250	
Manganeso Mn	18.3	XXXXXXXXXXXX			10 - 250	
Zinc Zn	18.3	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			2 - 25	
Aluminio Al	< 8.0	X			< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/mz

Cuadro 65. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra 2.Mx.C.

PARAMETROS DE SUELOS		RANGO ADECUADO	
pH	5.93	5.50	7.20
pH (en KCl)	5.45	**	
Concentración de Sales (C.S.)	3.66 dS/m	0.2	0.8
Materia Orgánica (M.O.)	5.14 %	2.0	4.0
C.I.C.e	12.0 meq/100 ml	5.0	15.0
Saturación K	2.70 %	4%	6%
Saturación Ca	85.82 %	60%	80%
Saturación Mg	11.48 %	10%	20%
Saturación Al+H	0.00	<	20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl	N-NH 4	1050.0			**	
Nitrato en KCl	N-NO 3	83.0			**	
Fósforo Olsen Mod.	P-PO4	19.6	XXXXXX		30 - 75	100 P2O5
Fósforo	P	< 10.0	X		30 - 75	170 P ₂ O ₅
Potasio	K	126.5	XXXXXXXXXX		150 - 300	170 K ₂ O
Calcio	Ca	2059.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1000 -2000	
Magnesio	Mg	165.2	XXXXXXXXXXXXXXXXXX		100 - 250	
Azufre	S	21.6	XXXXXXXXXXXX		10 - 100	30 S
Boro Ext. Agua Caliente	B	4.9			**	
Cobre	Cu	9.3	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1 - 7	
Hierro	Fe	157.6	XXXXXXXXXXXXXXXXXX		40 - 250	
Manganeso	Mn	23.5	XXXXXXXXXXXX		10 - 250	
Zinc	Zn	20.4	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		2 - 25	
Aluminio	Al	< 8.0	X		< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/mz

Cuadro 66. Resultados de laboratorio del análisis de suelos para la muestra control.

PARAMETROS DE SUELOS		RANGO ADECUADO	
pH	6.68	5.50	7.20
pH (en KCl)	5.96	**	
Concentración de Sales (C.S.)	0.18 dS/m	0.2	0.8
Materia Orgánica (M.O.)	4.96 %	2.0	4.0
C.I.C.e	12.3 meq/100 ml	5.0	15.0
Saturación K	2.55 %	4%	6%
Saturación Ca	86.85 %	60%	80%
Saturación Mg	10.61 %	10%	20%
Saturación Al+H	0.00	<	20%

ELEMENTO	CONC. ppm (p/v)	NIVELES			RANGO ADECUADO ppm (p/v)	DOSIS Kg/Ha *
		BAJO	ADECUADO	ALTO		
Amonio en KCl	N-NH ₄	50.8			**	
Nitrato en KCl	N-NO ₃	11.0			**	
Fósforo Olsen Mod.	P-PO ₄	17.6	XXXXX		30 - 75	100 P ₂ O ₅
Fósforo	P	< 10.0	X		30 - 75	170 P ₂ O ₅
Potasio	K	122.3	XXXXXXXXXX		150 - 300	180 K ₂ O
Calcio	Ca	2140.0	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1000 - 2000	
Magnesio	Mg	156.8	XXXXXXXXXXXXXXXXXX		100 - 250	
Azufre	S	< 5.0	X		10 - 100	50 S
Boro Ext. Agua Caliente	B	0.2			**	
Cobre	Cu	5.9	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		1 - 7	
Hierro	Fe	167.5	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		40 - 250	
Manganeso	Mn	4.2	XXXX		10 - 250	4 Mn
Zinc	Zn	5.3	XXXXXXXXXXXXXX		2 - 25	
Aluminio	Al	< 8.0	X		< 20% Sat Al	

** No se tienen datos del rango adecuado para este elemento. * Kg/Ha x 1.54 = lbs/inz.

Cuadro 67. Coeficientes de difusión individuales de los iones a dilución infinita en la solución del suelo según la ecuación de Nernst.

Compuesto iónico	Difusividad de la mezcla AB (m^2/s)
Sulfato de cobre	1.71×10^{-5}
Sulfato de cinc	1.69×10^{-5}
Sulfato de manganeso	1.71×10^{-5}
Octoborato de sodio	3.93×10^{-6}

d. Cálculos de muestra:

Cálculo 1. Determinación del porcentaje de sulfato de cobre en la muestra 1.Cu (cuadros 15, 16 y 49).

$$\% \text{ de sulfato de cobre en la muestra} = \frac{\text{peso micronutriente en la muestra (g)}}{\text{peso total inicial de la muestra (g)}}$$

$$2.918\% \frac{m}{m} = \frac{30.0 \pm 0.5 \text{ g } CuSO_4 * 5H_2O}{[(998.0 \pm 0.5 \text{ g } NH_4NO_3) + (30.0 \pm 0.5 \text{ g } CuSO_4 * 5H_2O)]}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 2. Determinación de la incertidumbre del porcentaje de sulfato de cobre en la muestra 1.Cu del cálculo 1.

$$\frac{sy}{y} = \sqrt{\left(\frac{sa}{a}\right)^2 + \left(\frac{sb}{b}\right)^2} \dots$$

$$0.049 \% \frac{m}{m} = (2.918\% \frac{m}{m}) \sqrt{\left(\frac{0.5 \text{ g}}{30.0 \text{ g } CuSO_4 * 5H_2O}\right)^2 + \left(\frac{0.5 \text{ g}}{998.0 \text{ g } NH_4NO_3}\right)^2}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 3. Determinación del porcentaje de polvos segregados en la prueba de adherencia 1.Cu de 30 gramos de sulfato de cobre a 1 kilogramo de nitrato de amonio (cuadros 15, 16 y 49).

$$\% \text{ de polvos no adheridos} = \frac{\text{peso polvo segregado (g)}}{\text{peso total final de la muestra (g)}}$$

$$0.413\% \frac{m}{m} = \frac{4.250 \pm 0.001 \text{ g CuSO}_4 * 5H_2O}{1028 \pm 0.5 \text{ g muestra 1. Cu}}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 4. Determinación de la incertidumbre del porcentaje de polvos segregados del cálculo 3.

$$\frac{sy}{y} = \sqrt{\left(\frac{sa}{a}\right)^2 + \left(\frac{sb}{b}\right)^2} \dots$$

$$2.234^{-4} \% \frac{m}{m} = (0.413\% \frac{m}{m}) \sqrt{\left(\frac{0.5 \text{ g}}{1028.0 \text{ g muestra 1. Cu}}\right)^2 + \left(\frac{0.001 \text{ g}}{4.250 \text{ g CuSO}_4 * 5H_2O}\right)^2}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 5. Determinación del porcentaje máximo de adherencia de 30 gramos de sulfato de cobre a 1 kilogramo de nitrato de amonio en la muestra 1.Cu (cuadros 15, 16 y 49).

$$\% \text{ máximo de adherencia} = \% \text{ de compuesto en la muestra} - \% \text{ de polvos segregados}$$

$$2.505 \% \frac{m}{m} = 2.918 \pm 0.049 \% \frac{m}{m} - 0.413 \pm 2.234^{-4} \% \frac{m}{m}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 6. Determinación de la incertidumbre del porcentaje máximo de adherencia del cálculo 5.

$$sy = \sqrt{sa^2 + sb^2 \dots}$$

$$4.866^{-2} \% \frac{m}{m} = \sqrt{0.049 \% \frac{m^2}{m} + 2.234^{-4} \% \frac{m}{m}}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 7. Determinación del porcentaje de adherencia de la muestra 1.Cu (cuadro 15).

$$\% \text{ de adherencia} = \frac{\% \frac{m}{m} \text{ de adherencia}}{\% \frac{m}{m} \text{ de micronutriente en la muestra}}$$

$$85.832\% = \frac{2.505 \pm 4.866^{-2} \% \frac{m}{m} \text{ CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O adherido}}{2.918 \pm 0.049 \% \frac{m}{m} \text{ CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O en la muestra}}$$

Cálculo 8. Determinación de la media de adherencia total de las pruebas en triplicado de sulfato de cobre a 1 kilogramo de nitrato de amonio.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

$$96.980\% = \frac{\sum(85.832\% + 86.219\% + 88.889\%)}{3}$$

*El mismo cálculo fue realizado para el resto de pruebas.

Cálculo 9. Determinación del factor de dilución para las muestras de sulfato de cobre en nitrato de amonio sin adherentes.

$$\text{peso muestra (g)} * \% \text{ de compuesto en muestra} * \frac{PM \text{ metal de interés}}{PM \text{ compuesto con metal}}$$

$$= \text{peso del metal en la muestra}$$

$$0.6 \text{ g prueba 1. Cu} * 2.918\% \frac{m}{m} * \frac{63.534 \text{ g Cu}}{249.68 \text{ g CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O}} = 4.580^{-3} \text{ g Cu}$$

$$4.580^{-3} \text{ g Cu} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1}{0.1 \text{ L}} = 45.803 \text{ ppm}$$

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$45.803 \text{ ppm} (V_1) = (2.5 \text{ ppm})(0.1 \text{ L})$$

$$(V_1) = 5.5 \text{ ml}$$

$$\text{Factor de dilución} = \frac{45.803 \text{ ppm}}{2.5 \text{ ppm}} = \frac{100 \text{ ml}}{5.5 \text{ ml}} = 18.321$$

Cálculo 10. Determinación de la concentración real en los resultados de la cuantificación de cobre en la muestra 1.Cu (cuadro 68).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

$$2.5454 \pm 0.0245 \text{ ppm Cu} = \frac{\sum(2.5363 \text{ ppm Cu} + 2.5267 \text{ ppm Cu} + 2.5731 \text{ Cu})}{3}$$

$$2.5454 \pm 0.0245 \text{ ppm Cu} * 18.321 = 46.6343 \pm 0.4487 \text{ ppm Cu}$$

$$46.6343 \pm 0.4487 \text{ ppm Cu} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) * \frac{0.1 \text{ L}}{1} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{249.68 \text{ g CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O}}{63.534 \text{ g Cu}}$$

$$= 0.0183 \pm 0.0002 \text{ g CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O}$$

$$\frac{0.0183 \pm 0.0002 \text{ g } CuSO_4 * 5H_2O}{0.6 \text{ g prueba 1. Cu}} = 3.054 \pm 0.029\% \frac{\text{g } CuSO_4 * 5H_2O}{\text{g muestra}}$$

*Se realizó el mismo cálculo para el reto de muestras.

Cálculo 11. Determinación de los pesos de cada micronutriente a agregar a la mezcla con de las muestras Mx.

$$10\% \frac{m}{m} * 1000 \text{ g } NH_4NO_3 = 100 \text{ g micronutrientes}$$

$$100 \text{ g micronutrientes} * 38 \% MnSO_4 * H_2O = 38 \text{ g } MnSO_4 * H_2O$$

$$100 \text{ g micronutrientes} * 30 \% Na_2B_8O_{13} * 4H_2O = 30 \text{ g } Na_2B_8O_{13} * 4H_2O$$

$$100 \text{ g micronutrientes} * 22 \% ZnSO_4 * 7H_2O = 22 \text{ g } ZnSO_4 * 7H_2O$$

$$100 \text{ g micronutrientes} * 10 \% CuSO_4 * 5H_2O = 10 \text{ g } CuSO_4 * 5H_2O$$

*El mismo cálculo se realizó para las pruebas con 60 gramos y 477 gramos de micronutrientes.

Cálculo 12. Determinación del coeficiente de difusión individual para el sulfato de cobre a dilución infinita en la solución del suelo según la ecuación de Nernst.

$$D_{AB} = 8.931 * 10^{-10} T \left(\frac{\lambda_+^o \lambda_-^o |z_-| + |z_+|}{\lambda_+^o + \lambda_-^o |z_-||z_+|} \right)$$

$$1.71 * \frac{10^{(-5)} cm^2}{s}$$

$$= 8.931 * 10^{-10} (25^\circ C + 273.15) \left(\frac{(2 * 53.6 \frac{A}{cm^2}) * (2 * 80 \frac{A}{cm^2}) * (|-2| + |+2|)}{(2 * 53.6 \frac{A}{cm^2} + 2 * 80 \frac{A}{cm^2}) * (|-2||+2|)} \right)$$

*El mismo cálculo se realizó para el resto de coeficientes de difusión, en el caso del octoborato de sodio se utilizó como referencia el ión $(B(C_6H_5)_4)^-$ debido a la falta de literatura.

e. Fichas técnicas de los equipos:

Cuadro 68. Ficha técnica mezcladora.

Volumen total (L)	25
Potencia del motor eléctrico (HP)	1/10
RPM del motor	80
Diámetro de las 2 ruedas (mm)	250

Cuadro 69. Ficha técnica molino de discos.

Descripción	Fabricado en hierro fundido recubierto electrolíticamente con estaño puro. Discos moledores en aleación para evitar desgaste y rectificadas para producir molienda fina.
Uso	Mover el anillo ajustador del disco moledor giratorio para fijar la distancia con el disco moledor fijo.

f. Fotografías de experimentación:



Figura 19. Mezcladora de tambor giratorio con 2 aspas.



Figura 20. Molino de discos y tornillo sin fin ajustador de hierro fundido recubierto con estaño.



Figura 21. 60 gramos de octoborato de sodio.



Figura 22. Adición de 60 gramos del compuesto de octoborato de sodio a 1 kilogramo de nitrato de amonio.



Figura 23. 30 gramos de sulfato de cobre.



Figura 24. Adición de 30 gramos del compuesto de sulfato de cobre a 1 kilogramo de nitrato de amonio.

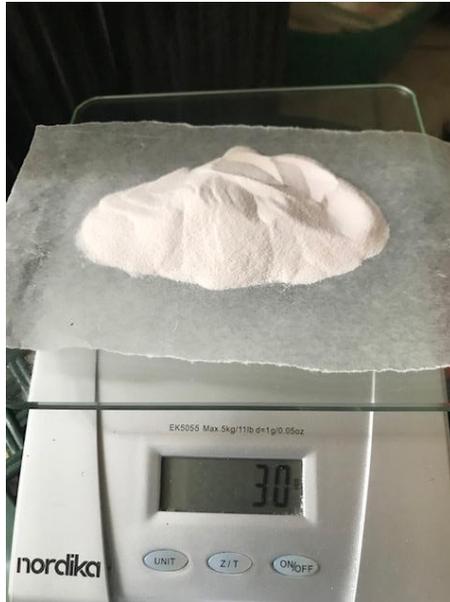


Figura 25. 30 gramos de sulfato de manganeso.



Figura 26. Adición de 30 gramos del compuesto de sulfato de manganeso a 1 kilogramo de nitrato de amonio.



Figura 27. Polvo no adherido de sulfato de manganeso al nitrato de amonio en el fondo de la mezcladora.

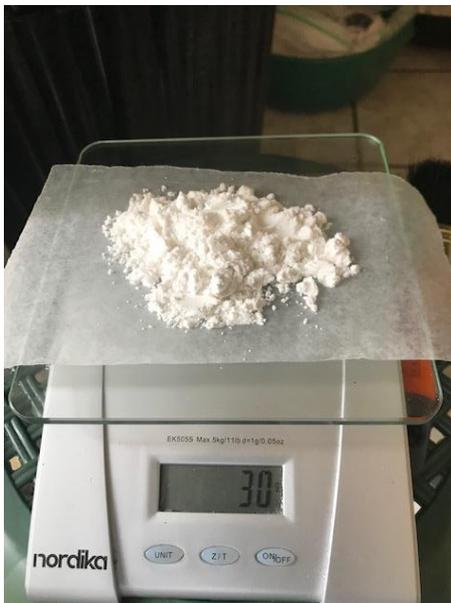


Figura 28. 30 gramos de sulfato de cinc.



Figura 29. Adición de 30 gramos del compuesto de sulfato de cinc a 1 kilogramo de nitrato de amonio.



Figura 30. Kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente A con mezcla de 60 gramos de micronutrientes.



Figura 31. Kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente B con mezcla de 60 gramos de micronutrientes.



Figura 32. Kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente C con mezcla de 60 gramos de micronutrientes.



Figura 33. 10 kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente A con mezcla de 477 gramos de micronutrientes.



Figura 34. 10 kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente B con mezcla de 477 gramos de micronutrientes.



Figura 35. 10 kilogramo de nitrato de amonio recubierto de adherente C con mezcla de 477 gramos de micronutrientes.

XII. GLOSARIO

- A. Adherente:** Un adherente puede tener distintas funciones al momento de agregarlo a un proceso de aglomeración. Le da durabilidad y reduce la segregación del gránulo para su manipulación y almacenamiento. Para agregar y retener partículas o polvos en gránulos de mayor tamaño que no se adhieren por sí solos. Estos pueden ser ceras, plásticos o almidón. Un factor importante es el costo-beneficio de su selección (Kozicki, 2020).
- B. Difusión:** Es el movimiento de un componente a través de una mezcla por un estímulo físico. Ocurre un gradiente de concentración del componente que difunde. Este tiende a alcanzar el equilibrio (Warren, *et al*; 2007).
- C. Presión osmótica:** Presión que debe ejercerse para detener la difusión de un flujo a través de una membrana semipermeable (Guerrero, s.f.).
- D. Solubilidad:** La solubilidad de un fertilizante se define como la cantidad máxima que puede ser disuelta por completo en un volumen determinado de agua. Esta aumenta con la temperatura del agua. Los compuestos o sales solubles están integradas por un anión y catión. Los fertilizantes nitrogenados y potásicos son de muy alta solubilidad. Se les denomina hidrosolubles. La solubilidad es una medida de aprovechabilidad nutricional de la planta (Guerrero, s.f.).
- E. Densidad:** Esta puede variar dependiendo del grado de empaque de los granos. La densidad de un fluido es función de la temperatura y presión. Y cada una de las partículas en un sólido también lo es. Pero difieren la densidad aparente o global. Esta es mínima cuando la masa está floja y alcanza su máximo cuando se somete a vibraciones (Warren, *et al*; 2007).
- F. Molienda:** Operación en la que se reduce el tamaño de partícula de un sólido. En un molino de atrición o desgaste las partículas sólidas son frotadas entre las caras planas estriadas de unos discos circulares rotatorios. Uno de los discos es estacionario y el otro gira. La separación entre los discos es ajustada dentro de ciertos límites (Warren, *et al*; 2007).

G. Tamizaje: Método de separación de partículas basado en la diferencia de tamaños. Los sólidos se colocan sobre la superficie de un tamiz donde las partículas con un menor tamaño o finos pasan a través de las aberturas. Mientras que los de mayor tamaño o colas, se quedan en el tamiz. Un solo tamiz puede realizar una separación en dos fracciones (Warren, *et al*; 2007).

H. Mezclado: Para el mezclado de sólidos intervienen dos o más componentes separados para formar un producto más o menos uniforme. La mezcla se realiza por agitación de la masa a baja velocidad con un agitador por volteo o embarrado por centrifugación e impacto (Warren, *et al*; 2007).

I. Media: Es una medida de la ubicación central de los datos, si es para una muestra se denota como \bar{x} (Anderson, *et al*; 2012).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

J. Desviación estándar: Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Se denota como s . Se mide en las mismas unidades que los datos (Anderson, *et al*; 2012).

K. Partes por millón (ppm): Para disoluciones muy diluidas las partes por millón son una manera de expresar la concentración. Es el cociente de la masa del soluto entre la masa de la disolución (Skoog, 2015).

$$c_{ppm} = \frac{\text{masa del soluto (g)}}{\text{masa disolución (g)}} \times 10^6 ppm = \frac{\text{masa del soluto (mg)}}{\text{volumen disolución (L)}} ppm$$