Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Comparación de las propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por método verde y químico

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero (a) Químico (a)

AUTORES

Mellany de Fatima HURTADO AGRAMONTE

Daniel Armando LEÓN JIMÉNEZ

ASESOR

Dra. María Verónica CARRANZA OROPEZA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Hurtado, M. & León, D. (2025). *Comparación de las propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por método verde y químico*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Daniel Armando León Jimenez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75111299
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-2211-4321
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Mellany de Fatima Hurtado Agramonte
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72041588
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	María Verónica Carranza Oropeza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10727849
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2379-1637
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Ruben Alfredo Palomino Infante
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08326506
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Raymundo Erazo Erazo

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08439329
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.5.2. Síntesis química
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. PCONFIGI 2021. C2107187. Perú. CONCYTEC. CYTED 2020. 207-2020 FONDECYT.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Centro poblado: No aplica Urbanización: No aplica Manzana y lote: No aplica Calle: Av. Carlos Germán Amezaga #375 Latitud: -12.059797 Longitud: -77.081733
Año o rango de años en que se realizó la investigación	abril 2022 - abril 2025 2022 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.00 Nano-materiales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.10.01

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado Evaluador de Sustentación de Tesis, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia del **Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante**, el **Dr. Raymundo Erazo Erazo** (Miembro Revisor) y la **Dra. María Verónica Carranza Oropeza** (Asesora), habiendo presentado para tal efecto la **TESIS** titulada: **"Comparación de las propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por método verde y químico"**, después de sustentar de manera presencial y **habiendo aprobado la Tesis** elaborada por la Bachiller en Ingeniería Química: **Mellany de Fatima Hurtado Agramonte, para optar el TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERA QUÍMICA,** el Jurado Evaluador acuerda calificarla con la **NOTA** de:

Diecisiete (17)
(LETRAS) (NÚMEROS)

Lima, 15 de abril de 2025

Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante
Presidente

Dr. Raymundo Erazo Erazo
Miembro

Dra. María Verónica Carranza Oropeza
Asesora

Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante
Director

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado Evaluador de Sustentación de Tesis, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia del **Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante**, el **Dr. Raymundo Erazo Erazo** (Miembro Revisor) y la **Dra. María Verónica Carranza Oropeza** (Asesora), habiendo presentado para tal efecto la **TESIS** titulada: **"Comparación de las propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por método verde y químico"**, después de sustentar de manera presencial y **habiendo aprobado la Tesis** elaborada por el Bachiller en Ingeniería Química**: Daniel Armando León Jiménez, para optar el TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERO QUÍMICO,** el Jurado Evaluador acuerda calificarlo con la **NOTA** de:

Diecisiete (17)

(LETRAS) (NÚMEROS)

Lima, 15 de abril de 2025

Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante
Presidente

Dr. Raymundo Erazo Erazo
Miembro

Dra. María Verónica Carranza Oropeza
Asesora

Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante
Director

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dra. María Verónica Carranza Oropeza en mi condición de asesora acreditado con el Dictamen N°000003-2025-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **"Comparación de las propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por método verde y químico"**, presentado por los bachilleres **Daniel Armando León Jiménez y Mellany de Fatima Hurtado Agramonte** para optar el título Profesional de Ingeniero (a) Químico (a), CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 14 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Profesional de Ingeniero (a) Químico (a).

Lima, 30 de septiembre del 2025

Firma del Asesora_____

Nombres y Apellidos de la asesora: María Verónica Carranza Oropeza

DNI : 10727849

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de investigación a nuestros padres, quienes han sido nuestra fuente continua de apoyo y motivación, a nuestros docentes y asesores por su continua guía y a todos los que nos apoyaron desde el principio.

AGRADECIMIENTO

Anhelamos expresar nuestra más profunda gratitud, principalmente a nuestros padres, por su incondicional apoyo y la fe que han depositado en nosotros a lo largo de nuestra aventura académica y en este progreso científico.

Gracias, Dra. Verónica Carranza Oropeza, por su guía y asesoramiento, cruciales para la configuración de esta investigación. Agradecemos al Dr. José Vulfrano González Fernández su valiosa asesoría y colaboración en su calidad de co-asesor de este trabajo.

También agradecemos a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por su completa formación académico-profesional y por el financiamiento parcial de la tesis a través del proyecto PCONFIGI 2021 con código C21071871. Y a CONCYTEC por el financiamiento parcial mediante el programa de Proyectos en temas estratégicos CYTED 2020 a través del Contrato 207-2020 FONDECYT.

Por otro lado, agradecemos al Centro de Investigaciones Tecnológicas, Biomédicas y Medioambientales (CITBM) por facilitarnos sus recursos, instalaciones y asesoramiento de las distintas personas que laboran en este centro.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 14

ABSTRACT 15

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 16

1.1. Planteamiento y formulación del problema 17

1.1.1. Problema general 18

1.1.2. Problemas específicos 18

1.2. Justificación de la investigación 19

1.2.1. Tecnológica 19

1.2.2. Ambiental 20

1.3. Objetivos 20

1.3.1. Objetivo general 20

1.3.2. Objetivos específicos 21

1.4. Hipótesis 21

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 22

2.1. ANTECEDENTES 22

2.2. ESTADO DEL ARTE 27

2.3. BASES TEÓRICAS 32

2.3.1. Nanopartículas 32

2.3.2. Nanopartículas de ZnO 32

2.3.3. Síntesis de nanopartículas de ZnO 34

2.3.4. Método químico 36

2.3.5. Método verde 39

2.3.6. Caracterización de las nanopartículas de ZnO 45

2.3.7. Nanofertilizantes de ZnO 52

CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO 56

3.1. Materiales 56

3.2. Equipos 57

3.3. Etapa 1. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc 57

Actividad 1: Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc 57

Actividad 2: Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc 61

Actividad 3: Caracterización de las nanopartículas de óxido de zinc 64

3.4. Etapa 2. Tratamiento estadístico y selección de las nanopartículas de óxido de zinc ... 65

3.5. Etapa 3. Modelamiento de un PFD preliminar del proceso de obtención de nanopartículas de óxido de zinc por ambos métodos 65

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 67

4.1. Etapa 1. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc 67

Actividad 1: Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc 67

Actividad 2: Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc 68

Actividad 3: Caracterización de las nanopartículas de óxido de zinc 72

4.2. Etapa 2. Tratamiento estadístico y selección de las nanopartículas de óxido de zinc ... 82

4.3. Etapa 3. Modelamiento de un PFD preliminar del proceso de obtención de nanopartículas de óxido de zinc por ambos métodos 96

CONCLUSIONES 106

RECOMENDACIONES 108

REFERENCIAS 109

APÉNDICE 126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método químico por precipitación 36

Tabla 2 Factores que influyen en las propiedades de las NPsZnO sintetizadas por el método químico por coprecipitación 38

Tabla 3 Propiedades de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método verde a partir de diversas especies de plantas 40

Tabla 4 Propiedades de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método verde a partir de extracto de hojas de Moringa Oleifera. 41

Tabla 5 Factores que influyen en las propiedades de las NP de ZnO sintetizadas por el método verde 45

Tabla 6 Técnicas para caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas 46

Tabla 7 Efecto de la aplicación de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde en el sector de la agricultura 54

Tabla 8 Efecto de la aplicación de las nanopartículas de ZnO en el sector de la agricultura .. 54

Tabla 9 Diseño experimental para la síntesis química de nanopartículas de ZnO 61

Tabla 10 Código de muestra y formulación para nanopartículas de ZnO sintetizados por el método químico 61

Tabla 11 Diseño experimental para la síntesis química de nanopartículas de ZnO 63

Tabla 12 Código de muestra y formulación para nanopartículas de ZnO sintetizados por el método verde 63

Tabla 13 Cantidad obtenida promedio de nanopartículas de ZnO y el rendimiento del proceso por el método químico 68

Tabla 14 Composición de los reactivos utilizados en la extracción del material biológico y la síntesis de nanopartículas de ZnO mediante el método verde 72
Tabla 15 Cantidad obtenida promedio de nanopartículas de ZnO por el método verde 72
Tabla 16 Resultados de caracterización de tamaño de partículas (DLS) y Potencial Z (PALS) de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 76
Tabla 17 Resultados de caracterización de tamaño de partículas (DLS) y Potencial Z (PALS) de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 78
Tabla 18 Análisis de Varianza – Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 82
Tabla 19 Análisis de Varianza – Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 85
Tabla 20 Análisis de Varianza – Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 89
Tabla 21 Análisis de Varianza – Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 92
Tabla 22 Condiciones de operación de nanopartículas de ZnO seleccionadas sintetizadas por método químico 95
Tabla 23 Condiciones de operación de nanopartículas de ZnO seleccionadas sintetizadas por método verde 95
Tabla 24 Condiciones de operación y número de equipos 97
Tabla 25 Corrientes del diagrama de flujo de proceso para el método químico 99
Tabla 26 Corrientes del diagrama de flujo de proceso para el método verde 103
Tabla 27 Curva de calibración de ácido gálico del método Folin-Ciocalteou 127
Tabla 28 Prueba de independencia de los factores para el tamaño de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método verde 129

Tabla 29 Prueba de independencia de los factores para el tamaño de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método químico 133
Tabla 30 Prueba de independencia de los factores para el potencial Z de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método verde..... 136
Tabla 31 Prueba de independencia de los factores para el potencial Z de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método químico 140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aplicaciones de las nanopartículas de ZnO 33

Figura 2 Métodos de síntesis de nanopartículas de ZnO 35

Figura 3 Esquema de síntesis verde de NPsZnO 40

Figura 4 Mecanismo de biosíntesis de NPsZnO 43

Figura 5 Mecanismo de biosíntesis de NPsZnO para hojas, flores y semillas 44

Figura 6 Espectro de ondas electromagnéticas 47

Figura 7 Espectro de absorción de extracto de *Ruta L.* (Ruda) 48

Figura 8 Fluctuaciones de la intensidad de luz dispersada en función del tiempo 49

Figura 9 Componentes de la microscopía electrónica de transmisión (TEM) 51

Figura 10 Morfologías de nanopartículas de ZnO obtenidas por método de precipitación 52

Figura 11 Comparativa entre los nanofertilizantes químicos y los basados en nanotecnología 53

Figura 12 Flujograma de la síntesis de nanopartículas de ZnO mediante el método químico 58

Figura 13 Flujograma de la síntesis de nanopartículas de ZnO mediante el método verde 62

Figura 14 Síntesis de nanopartículas de ZnO por el método químico 67

Figura 15 Centrifugación y lavado del producto de síntesis química de nanopartículas de ZnO 67

Figura 16 Producto final de síntesis química después del tratamiento térmico 68

Figura 17 Extracción de compuestos fenólicos de hoja de *Moringa Oleífera* 69

Figura 18 Filtración del extracto de hoja de *Moringa Oleífera* 69

Figura 19 Síntesis de nanopartículas de ZnO por el método verde 70

Figura 20 Producto de síntesis por el método verde después del secado 70

Figura 21 Producto de síntesis por el método verde después del pretratamiento térmico 71

Figura 22 Producto final de síntesis por el método verde después del tratamiento térmico ... 71

Figura 23 Picos de absorción característicos de nanopartículas de ZnO sintetizados por el método químico 73
Figura 24 Picos de absorción característicos de nanopartículas de ZnO sintetizados por el método verde - subgrupo 1 74
Figura 25 Picos de absorción característicos de nanopartículas de ZnO sintetizados por el método verde – subgrupo 2 74
Figura 26 Resultados del tamaño de NPsZnO sintetizadas por el método químico 77
Figura 27 Resultados de Potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método químico..... 77
Figura 28 Resultados del tamaño de NPsZnO sintetizadas por el método verde..... 79
Figura 29 Resultados de Potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método verde..... 79
Figura 30 Micrografia TEM de las NPsZnO sintetizadas por método químico..... 80
Figura 31 Micrografía TEM de las NPsZnO sintetizadas por método verde..... 81
Figura 32 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 83
Figura 33 Gráfica de contorno de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico 84
Figura 34 Gráfica de superficie de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico 84
Figura 35 Optimización del tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas por el método químico..... 85
Figura 36 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde..... 86
Figura 37 Gráfica de contorno de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método verde 87

Figura 38 Gráfica de superficie de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método verde 88
Figura 39 Optimización del tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas por el método verde 89
Figura 40 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 90
Figura 41 Gráfica de contorno del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico 91
Figura 42 Gráfica de superficie del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico 91
Figura 43 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 93
Figura 44 Gráfica de contorno del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método verde 94
Figura 45 Gráfica de superficie del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método verde 94
Figura 46 Diagrama de flujo de proceso de la obtención de NPsZnO por el método químico 98
Figura 47 Diagrama de flujo de proceso de la obtención de NPsZnO por el método verde. 102
Figura 48 Relación entre absorbancia y concentración de ácido gálico 128
Figura 49 Gráfica de probabilidad del tamaño hidrodinámico de la nanopartícula de ZnO sintetizada por el método verde 131
Figura 50 Gráfica de valores atípicos de tamaño hidrodinámico de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 132

Figura 51 Gráfica de probabilidad del tamaño hidrodinámico de nanopartículas de ZnO sintetizada por el método químico 134
Figura 52 Gráfica de valores atípicos de tamaño hidrodinámico de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método químico 135
Figura 53 Gráfica de probabilidad del Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 138
Figura 54 Gráfica de valores atípicos de Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde 139
Figura 55 Gráfica de probabilidad del Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 141
Figura 56 Gráfica de valores atípicos de Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico 142
Figura 57 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO Q1 143
Figura 58 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO Q4 143
Figura 59 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V1 144
Figura 60 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V4 144
Figura 61 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V5 145
Figura 62 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V8 145
Figura 63 Potencial Z de NPsZnO Q1 146
Figura 64 Potencial Z de NPsZnO Q4 146
Figura 65 Potencial Z de NPsZnO V1 147
Figura 66 Potencial Z de NPsZnO V4 147
Figura 67 Potencial Z de NPsZnO V5 148
Figura 68 Potencial Z de NPsZnO V8 148

INDICE DE ABREVIATURAS

NPs: Nanopartículas

NPsZnO: Nanopartículas de óxido de zinc

PFD: Diagrama de flujo de proceso

UV-VIS: ultravioleta-visible

DLS: Dispersión de luz dinámica

TEM: Microscopía Electrónica de Transmisión

RESUMEN

Las nanopartículas tienen una amplia aplicación en distintas áreas debido a sus propiedades mejoradas de área superficial y tamaño nanométrico. Particularmente, en el área de agricultura, se han desarrollado innovadores nanomateriales como los nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores. Estas nanopartículas pueden ser obtenidas por distintos métodos de síntesis. En el presente proyecto se sintetizaron nanopartículas de óxido de zinc por el método químico y verde para comparar las propiedades de tamaño y forma que puedan ser utilizados como nanofertilizantes. Esta síntesis permitió proyectar finalmente un diagrama de proceso preliminar de su producción para facilitar su escalamiento para posteriores estudios. Para la síntesis se evaluaron los parámetros del proceso más relevantes de ambos métodos. Para el caso de la síntesis por el método verde, se consideró evaluar dos *ratios*: Hoja de Moringa Oleifera/agente precursor (nitrato de zinc) de 6g/1.5g y 12g/1.5g, mientras que para el método químico se establece un *ratio* estándar según sus estequiometrias, siendo esta 1.3g KOH/3g agente precursor (nitrato de zinc). Las nanopartículas obtenidas mediante ambos métodos se sometieron a un tratamiento térmico para poder obtener finalmente la nanoestructura con características deseadas de tamaño menores de 50 nm y forma esférica. Así, para esta etapa se evaluaron temperaturas de calcinación de 400°C y 500°C y tiempos de calcinación de 2 h y 3 h. Los resultados óptimos que se obtuvieron en ambos métodos son proyectados para un escalamiento preliminar a través de un diagrama de flujo de proceso para ver que método sería más conveniente tanto a nivel de equipos y costo ambiental, tal que el producto represente una potencial aplicación en la industria agrícola como nanofertilizante.

Palabras clave: nanopartículas de óxido de zinc, síntesis verde, síntesis química por precipitación, nanofertilizantes.

ABSTRACT

Nanoparticles have a wide application in different areas due to their improved surface area and nanometric size properties. Particularly, in agriculture, innovative nanomaterials such as nanofertilizers, nanopesticides, nano herbicides and nanosensors have been developed. These nanoparticles can be obtained by different synthesis methods. In the present project, zinc oxide nanoparticles were synthesized by the chemical and green method to compare the size and shape properties that can be used as nanofertilizers. This synthesis finally allowed them to project a preliminary process diagram of their production to facilitate their scaling for later studies. For the synthesis, the most relevant process parameters of both methods were evaluated. For the case of the synthesis by the green method, two ratios were considered to be evaluated: Moringa Oleifera leaf/precursor agent (zinc nitrate) of 6 g/1.5 g and 12 g/1.5 g, while for the chemical method a standard ratio is established according to their stoichiometries, this being 1.3 g KOH/3 g precursor agent (zinc nitrate). The nanoparticles obtained by both methods were subjected to a thermal treatment in order to finally obtain the nanostructure with desired characteristics of size less than 50 nm and spherical shape. Thus, for this stage calcination temperatures of 400 ° C and 500 ° C and calcination times of 2 h and 3 h were evaluated. The optimal results obtained in both methods are projected for a preliminary scaling through a process flow diagram to see which method would be more convenient both at the equipment level and environmental cost, so that the product represents a potential application in the agricultural industry as a nano fertilizer.

Keywords: zinc oxide nanoparticles, green synthesis, chemical synthesis by coprecipitation, nanofertilizers.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Debido al creciente desarrollo poblacional en un país, comunidad o familia, la demanda agrícola y alimentaria seguirá aumentando en los próximos 10 años (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023). Es por esto que el uso de fertilizantes es tan importante para poder cumplir así con la productividad y optimización de recursos (Banco Central de Reserva del Perú, 2022). Sin embargo, estos además de no abastecer el mercado, han desencadenado problemas ambientales debido a su excesivo desperdicio que resulta en altas concentraciones en los suelos buscando así nuevas alternativas tecnológicas (PUCP, 2022).

La nanotecnología, al ser una herramienta innovadora, llega al punto de revolucionar completamente distintas áreas como la cosmética o la electrónica, por mencionar algunas (Britto Hurtado et al., 2022). Específicamente en la agricultura, las propiedades de tamaño, forma y composición tienen impactos positivos relacionados al uso y aprovechamiento de los fertilizantes (Vázquez-Núñez, 2022a). Sin embargo, los costos de síntesis a nivel industrial para la elaboración de nanopartículas de ZnO llegarían a niveles altos debido a los equipos y a los reactivos que se utilizan (Raha & Ahmaruzzaman, 2022). Debido a esto, la síntesis de este tipo de nanopartículas mediante un método verde se plantearía como una alternativa más factible respecto a otros métodos de síntesis de nanopartículas de ZnO, representando de esta forma una potencial vía de obtención industrial para su aplicación como nanofertilizante.

Dentro de la búsqueda de las distintas soluciones que sean eficientes y amigables el medio ambiente, se tienen diversas rutas y variables a considerar durante la síntesis de nanopartículas de ZnO. Es por esto que la presente investigación plantea realizar un estudio comparativo de los procesos de obtención de nanopartículas de ZnO mediante los métodos verde y químico, a partir de la optimización de estos, para evaluar su potencial aplicación como nanofertilizantes.

1.1. Planteamiento y formulación del problema

En el sector agrícola se suman distintos factores desfavorables como los efectos adversos del clima y la urbanización, además de impactos ambientales debido a la acumulación de pesticidas y fertilizantes. Todos estos factores inciden negativamente en la tasa de producción de alimentos a nivel mundial, la cual debe proyectarse a establecer un aumento del 70-90% para el año 2050 debido al incremento exponencial de la población los últimos años (Tomlinson, 2013).

En el Perú, según los datos del CENAGRO (Censo Nacional Agropecuario) del año 2012, el sector agrícola representa más del 70% de la producción de alimentos que se consumen en el país, el cual dispone aproximadamente del 30% del territorio peruano para su uso. Debido a la relevancia del desarrollo del sector agrícola y la alta demanda que conllevan sus productos, se puede optar por la implementación de nuevas tecnologías para las herramientas ya existentes como los fertilizantes, promoviendo así una mayor eficiencia en la producción de alimentos, en virtud de salvaguardar la seguridad alimentaria.

Una alternativa viable es el uso de la nanotecnología, la cual ha generado atención de distintos rubros, y en el caso de la agricultura, permite desarrollar aplicaciones específicas como la elaboración de nanofertilizantes, suponiendo así el aumento de la producción de cultivos de manera sustentable y minimizando la contaminación de agroecosistemas (Hugo et al., 1999). Dentro de esta perspectiva, si bien se ha prestado mayor atención a los nanofertilizantes de macronutrientes (N, P, K), últimamente se han venido desarrollando nanofertilizantes de micronutrientes (Zn, Fe, Cu). Así, se tienen estudios de la aplicación de Zn en cultivos en forma de NP de ZnO, los cuales indican como resultados un incremento en variables fisiológicas respecto a la germinación y crecimiento del tamaño de hojas, tallo, raíces (Tarafdar et al., 2014; Zhang et al., 2015); así como, la mejora de la biomasa, la

fotosíntesis, las proteínas, la actividad de las enzimas antioxidantes, los contenidos de nutrientes minerales (Cd).

El desarrollo de los nanomateriales lleva consigo distintos aspectos que se deben tener en cuenta tales como la facilidad de poder implementar los procedimientos a escala industrial ya que no podría ser económicamente viable (Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014). Así mismo, la contaminación del agua (liberación de aguas residuales), suelos (provenientes de biosólicos o escorrentías) y aire (provenientes de la incineración como parte del proceso) debe ser considerados al momento de la síntesis de los nanomateriales ya que pueden llegar a afectar la sostenibilidad ambiental (Keller & Lazareva, 2013).

La aplicación de nanofertilizantes dentro del rubro agrícola presenta relevancia en su estudio debido a las propiedades de los nanomateriales y a los distintos métodos de síntesis para su obtención óptima y viable (Gao, 2018). Puesto que, el uso de distintos métodos de síntesis puede influir de manera significativa en las propiedades y en el rendimiento final de las nanopartículas obtenidas, invitando a la indagación de las variables que afectan de manera directa el proceso de síntesis para obtener las nanopartículas óptimas para su aplicación como nanofertilizantes.

Por lo antes mencionado, se plantean las siguientes preguntas:

1.1.1. Problema general

¿Cómo determinar el proceso de obtención de nanopartículas de óxido de zinc más factible que represente una potencial aplicación como nanofertilizantes?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cómo sintetizar nanopartículas de óxido de zinc a partir de los métodos químico y verde que cumplan con las propiedades requeridas para su aplicación como nanofertilizantes?

- ¿Cómo establecer las condiciones óptimas para las variables del proceso estudiadas respecto a la síntesis química y verde de nanopartículas de óxido de zinc de forma que representen la mayor afinidad con su potencial uso como nanofertilizante?
- ¿Cómo modelar y evaluar los procesos más óptimos de obtención de nanopartículas de óxido de zinc por ruta química y verde con las condiciones de operación seleccionados para identificar la opción más rentable y ecoamigable?

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Tecnológica

En el (Bhalla et al., 2023), sintetizaron nanopartículas de ZnO mediante el método verde empleando hojas de la planta *Moringa Oleifera.* Los resultados indicaron tamaños de nanopartícula menores a 50 nm y con una estructura esférica. Asimismo, la aplicación de este método de síntesis presenta distintas ventajas al momento de obtener nanopartículas, tales como un bajo costo y una elevada pureza, además de ser amigable con el medio ambiente, ya que para el desarrollo de nanopartículas de óxidos metálicos de diversos tamaños y formas se utilizan compuestos de biomasa como hojas, flores, semillas, raíces, frutos y microorganismos (Ngom et al., 2021a).

En el 2022, Alarcón Hernández indicó que la presencia de distintas biomoléculas permite la reducción de iones metálicos, es por eso que distintos extractos de plantas han sido empleados para la elaboración de nanopartículas a gran escala. Así mismo, la planta *Moringa Oleifera*, posee en su estructura un grupo de distintos biocomponentes que al participar en el mecanismo de síntesis de nanopartículas representan ventajas y una viable sustitución respecto a los distintos métodos químicos.

En el presente estudio se evaluará el *ratio* de extracto de hoja de *Moringa Oleifera*/ Agente Precursor para el método verde y dos factores que, según Salvatierra Paco & Condori Ramos (2021), se sabe que presentan influencia sobre las propiedades físicas de tamaño y

forma de las nanopartículas de ZnO para los métodos químico y verde, los cuales son el tiempo y la temperatura del tratamiento térmico. De esta forma se analizarán las respuestas del proceso para seleccionar los parámetros óptimos de síntesis para ambos métodos y comparar los valores de rendimiento, tamaño y forma obtenidos. Estos resultados permitirán hacer una primera proyección de escalamiento, la cual permite determinar que método emplear para obtener una propuesta de producción más viable.

1.2.2. Ambiental

En la industria de los nanomateriales, el proceso de obtención de las nanopartículas se compone de una serie determinada de operaciones unitarias, las cuales pueden generar desecho como material orgánico y/o inorgánico que llegan a ocasionar un impacto ambiental a largo plazo, (Medina et al., 2015), tanto durante su elaboración como en su posterior aplicación.

Según Escárcega-González et al., (2018), el método verde de obtención de nanopartículas con distintas aplicaciones ha demostrado ser amigable con el medio ambiente reaprovechando residuos orgánicos y mitigando el impacto al medio ambiente

Es así como el presente proyecto evaluará comparativamente los desechos resultantes de las etapas implicadas en la elaboración de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por los métodos químico y verde, para discutir sobre aquel método que sea menos perjudicial para el medio ambiente al momento de su elaboración.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Comparar las propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por los métodos verde y químico, evaluando rendimientos y propiedades de tamaño y forma para su potencial aplicación como nanofertilizante.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar las variables de proceso de obtención de nanopartículas de óxido de zinc utilizando un diseño factorial 2^3 para el método verde (*ratio* g de moringa/g de nitrato de zinc, temperatura de calcinación, tiempo de calcinación) y 2^2 para el método químico (temperatura y tiempo de calcinación), con 3 repeticiones para cada caso, para obtener propiedades físicas de tamaño y forma deseadas para su aplicación como nanofertilizante.
- Analizar la correlación de las variables estudiadas a través de análisis estadístico ANOVA comprendiendo así la influencia de las variables sobre las propiedades físicas de tamaño y forma y rendimiento de producción de las nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por ambos métodos.
- Proyectar de forma preliminar y comparativa dos diagramas de flujo de proceso de la producción de óxido de zinc por los métodos químico y verde empleando el *software* Aspen HYSYS V10 en base a la síntesis desarrollada a nivel laboratorio para validar su potencial producción a escala.

1.4. Hipótesis

Hipótesis general

Las nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por el método verde presentan tamaño promedio de 50 nm y forma esférica que son útiles para su uso como nanofertilizantes, también mayor rendimiento de producción frente al método de síntesis químico.

Hipótesis específicas

- Las nanopartículas de ZnO obtenido por el método verde (*ratio* de 6g de hoja de *Moringa Oleifera*/1.5g agente precursor (Nitrato de Zinc), 400°C y 2h de calcinación) y el método químico (*ratio* de 1.3g KOH/3g agente precursor (Nitrato de Zinc), 400°C y 2h de calcinación) son similares en tamaño de 50 nm y forma esférica.

- El análisis ANOVA identifica el *ratio* de gramos de hoja de *Moringa Oleífera*/gramos Agente precursor como aquel que influencia de manera directa en el aumento del rendimiento de las nanopartículas obtenidas mediante el método verde, y a la temperatura y tiempo de calcinación, 400 °C y 2 h respectivamente, como variables que definen el tamaño de 50 nm y forma esférica de las nanopartículas para ambos métodos.
- La simulación de la producción de nanopartículas de óxido de zinc mediante el software *Aspen HYSYS V10* confirma de forma preliminar que la producción a escala a través del método verde obtiene similar rendimiento que la síntesis por el método químico.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

El estudio de Zahra et al., en el 2020, enfatiza sobre la rápida proliferación de las nanopartículas, las cuales tienen aplicaciones significativas en diferentes áreas, tanto en el sector público como privado, entre estos se tienen al medio ambiente, la agricultura, la alimentación, la biotecnología, la biomedicina, el tratamiento de aguas residuales, entre otros. A continuación, se detallan algunas aplicaciones particulares de las nanopartículas en distintos campos de estudio.

Según Handford et al., 2014, en el campo de la industria alimentaria se emplean a las nanoestructuras para la nanoencapsulación de ingredientes que permiten la liberación de proteínas, vitaminas y minerales; además de enmascarar olores y sabores que no se deseen como parte del producto final. Posteriormente, en el 2016, He & Hwang indicaron que su aplicación dentro de la industria de alimentos brinda beneficios como el detectar niveles de CO_2 liberado a partir de un alimento, desarrollo de nanoemulsiones para la elaboración de mayonesa, helados, entre otros.

En el 2018, Wang et al., indicaron que, en la industria de tratamiento de aguas, se emplean nanomateriales para así poder degradar compuestos orgánicos y evitar cualquier tipo de contaminación. Su aplicación en el proceso de nanofiltración también es de suma importancia para la eliminación de distintos tipos de metales pesados, nitratos y colores no deseados.

Según el reporte del Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN) basado en el artículo económico de (Globe Newswire, 2022), el mercado global de la nanotecnología se pronostica a alcanzar un valor de 70.7 billones de dólares en el año 2026, la cual crece a una tasa promedio compuesta anual de 9.2%; mientras que, el mercado de los nanomateriales presentará una creciente tasa promedio compuesta anual de 10.1% hasta el año 2030.

Debido al amplio posicionamiento de la nanotecnología en la industrial actual, es relevante indagar sobre los métodos más eficientes para su síntesis para investigar nuevos comportamientos y propiedades de materiales con dimensiones nanométricas, para cada aplicación específica.

En el año 2019, Khan et al. proporcionaron una descripción detallada acerca de la síntesis, propiedades y aplicaciones de las nanopartículas. Los autores señalan que las nanopartículas se clasifican según sus propiedades, formas (esféricas, nanotubos, nanoconchas, nanojaula, pseudo-flor) o tamaños (1-100 nm); y, que, según su tipo, las nanopartículas pueden ser a base de carbono, metálicas, cerámicas, semiconductoras, poliméricas o a base de lípidos. Sus diversas aplicaciones son únicas, dado que dependen principalmente de sus propiedades físicas y químicas a nanoescala, en donde interviene su amplia área superficial y tamaño nanométrico; entre estas se encuentran tanto aplicaciones comerciales en los ámbitos de medicamentos, manufactura y materiales, medio ambiente, electrónica, energética y mecánica, como aplicaciones domésticas.

Respecto a nuestro objeto de estudio, las nanopartículas de ZnO, estas han adquirido una importancia considerable debido a sus propiedades físicas y químicas, promoviendo continuas investigaciones. En este contexto, se detallan los diversos métodos de síntesis de las nanopartículas de nanopartículas de ZnO; donde se tienen los métodos químicos, tales como, el proceso mecanoquímico (Raha & Ahmaruzzaman, 2022), la precipitación (Zhou et al., 2023), la co-precipitación (Zhou et al., 2023), el método sol-gel (Zhou et al., 2023), el método de transporte de vapor (Zhou et al., 2023), los métodos solvotérmicos (Zhou et al., 2023) e hidrotérmicos (Zhou et al., 2023), los métodos que utilizan entornos de microemulsión (Zhou et al., 2023); los métodos físicos como molienda de bolas (Zhou et al., 2023), ablasión láser (Zhou et al., 2023), implantación de iones (Coviello et al., 2022) y deposición física de vapor (Zhou et al., 2023); y, los métodos verdes o ecológicos que emplean el uso de extractos de plantas (Zhou et al., 2023) y de microorganismos (Zhou et al., 2023).

En el año 2022, Taka et. al., reportaron la síntesis de nanopartículas de ZnO a través del método de precipitación química, utilizando nitrato de zinc hexahidratado ($Zn(NO_3)_2 .6H_2O$) como agente precursor y NaOH. Cada uno de estos se disolvieron en 200mL de agua destilada para generar soluciones a concentración de 0.1M; la solución de NaOH se agitó a una temperatura de 50°C y 400 RPM durante 30 minutos, mientras que la solución de $Zn(NO_3)_2 .6H_2O$ ocurrió a una temperatura de 60°C y 400 RPM durante 2 horas. Luego se vertió la solución de NaOH 0.1M en la solución de $Zn(NO_3)_2 .6H_2O$ 0.1M y se reguló el pH a 12 con la adición de solución de amoníaco 3%, a condiciones de temperatura ambiente y agitación continua a 400 RPM durante 2 horas. Posteriormente, la solución fue filtrada y lavada con etanol, secada y molida. Las nanopartículas obtenidas se caracterizaron mediante espectroscopía UV-Visible, los resultados indican que las nanopartículas de ZnO presentan una banda de absorción pico en la longitud de onda de 301.2 nm, el cual confirma la existencia de las nanopartículas de ZnO. Asimismo, su caracterización por difracción de rayos

X (XRD) indica que las nanopartículas obtenidas corresponden a una estructura de wurtzita hexagonal y la estimación teórica de tamaño de partícula resultó en 2.19 nm.

En el año (Dhoke, 2023) sintetizó nanopartículas de ZnO mediante el método de precipitación, utilizando acetato de zinc dihidratado ($Zn(O_2CCH_3)_2.2(H_2O)$) como agente precursor y KOH (86.6%). Cada uno de estos se disolvieron y se agitaron en una solución de 1L de metanol a temperatura ambiente, generando las soluciones A y B, respectivamente. Luego se vertió la solución A en la solución B a condiciones de agitación continua durante 70 minutos. Posteriormente, la solución se calentó durante 25 min hasta alcanzar el punto de ebullición y se dejó reposar hasta obtener el precipitado blanco. Por último, se lavó el precipitado con agua desionizada y se dejó secar. Las nanopartículas obtenidas se caracterizaron mediante espectroscopía UV-Visible, micrografía TEM y DLS, para poder determinar la longitud de onda, la estructura y tamaño de la partícula promedio. Los resultados indican que las nanopartículas de ZnO presentan una banda de absorción pico en la longitud de onda de 375 nm, debido a las vibraciones de las nanopartículas de ZnO; una distribución de tamaño promedio de 16 nm, y un rango de tamaño promedio 20-30 nm con forma esférica.

En el estudio de (Sumaya et al., 2023), las nanopartículas de ZnO se sintetizaron mediante el método de precipitación química, a partir de acetato de zinc dihidratado $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ como precursor para preparar la solución de ZnO. En el proceso de elaboración de nanopartículas de ZnO, se emplearon dos rutas de síntesis diferentes denominadas ruta del agua y ruta del alcohol. En la ruta del agua, se disolvieron 4.3 g de acetato de zinc dihidratado $Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$ en 100 ml de agua. Por otro lado, en la ruta del alcohol, se utilizaron 100 ml de isopropanol C_3H_8O como disolvente en lugar de agua. En ambas rutas, la solución preparada se agitó continuamente a 60 °C durante 30 min con un agitador magnético para homogenizar. Luego, se añadió gota a gota exactamente 15 mL de

solución de monoetanolamina C_2H_7NO a la solución homogénea como estabilizador en ambas rutas mientras la solución se agitaba continuamente a 60 °C durante 2 h. Las nanopartículas se caracterizaron por XRD obteniéndose una nanoestructura de wurzita y un tamaño de cristalito de 15.4 nm y 8.04 nm para los disolventes de agua deionizada e isopropanol, respectivamente. Por otro lado, los resultados SEM muestran que el tamaño de las nanopartículas de ZnO que utilizan isopropanol como disolvente es menor que el tamaño de las nanopartículas de ZnO que utilizan agua desionizada, la microestructura en ambos casos presentan forma de flor con pocos cristalitos esféricos.

En el año 2020, Doan Thi et al., estudiaron la obtención de nanopartículas empleando la piel de naranja junto con nitrato de zinc hexahidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$] como precursor. Se empleó 42.5 mL del extracto junto con 2 gramos del agente precursor con agitación constante durante 1 h a temperatura ambiente. Finalmente, la mezcla se secó a 150°C y se calcinó durante 1 h a 400°C. Se obtuvieron nanopartículas con un tamaño promedio de 50 nm con una forma esférica.

En el año 2022, Naiel et al., sintetizaron nanopartículas de ZnO utilizando la planta *Limonium pruinosum*. Así mismo, emplearon acetato de zinc di-hidratado [$Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$)] como agente precursor e hidróxido de sodio [NaOH] como regulador de pH. Para la síntesis se emplearon 2.5 mL del extracto de la planta junto con 25 mL del agente precursor empleando NaOH para regular el pH a un valor de 8. Se agitó de manera continua durante 30 minutos a una temperatura de 70°C hasta la formación de un precipitado de color blanco. La muestra se decantó y se realizaron lavados con agua destilada para remover impurezas. Finalmente se dejó secar a 70°C durante toda la noche. Los resultados de las caracterizaciones indicaron que se presenta un tamaño de nanopartícula de 11 nm y una forma cubica.

En el año 2024, Al Rahbi et al., estudiaron la síntesis de nanopartículas de ZnO empleando la hoja de *Salvadora persica*, nitrato de zinc hexahidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$] como precursor. Se emplearon 30 mL del extracto junto con 3 g del agente precursor con agitación constante durante 3 h a 60°C, se formó una pasta de color amarillo. Finalmente se calcinó la pasta a 400°C durante 2 h y se obtuvo un polvo ligeramente amarillo, el cual se empleará para caracterizaciones. Los resultados indican que se obtiene un tamaño de partícula promedio de 50 nm con forma de varillas. Así mismo, se tiene que la banda de absorción UV-Vis es de 365 nm, lo cual indica una presencia de nanopartículas de ZnO.

En el año (Muhammad et al., 2021), estudiaron la producción a escala industrial de nanopartículas de ZnO empleando $ZnCl_2$ y NaOH como reactivos. Sus resultados mediante la caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) indican que se obtuvieron nanopartículas con un tamaño hidrodinámico de 100 nm y con forma esférica. Realizaron una simulación empleando el software Aspen HYSYS, la cual contaba con distintos equipos, tales como tanques de almacenamiento, reactores y secadores.

En el año 2022, Raha & Ahmaruzzaman, enfatiza en que las nanopartículas de ZnO se han inscrito en múltiples aplicaciones en diversos campos, como la industria del caucho, la industria farmacéutica, la cosmética, la industria textil, la optoelectrónica, la agricultura y de la medicina. Adicionalmente, se han estudiado los impactos ecotóxicos de las nanopartículas de ZnO.

2.2. ESTADO DEL ARTE

En el (Mohamed et al., 2020)estudiaron el método de precipitación de nanopartículas de óxido de zinc, a partir de nitrato de zinc y KOH como precursores. En este trabajo, la solución acuosa (0,2 M) de nitrato de zinc ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) y la solución (0,4 M) de KOH se prepararon con agua desionizada. La solución de KOH se añadió lentamente a la solución de

nitrato de zinc a temperatura ambiente bajo agitación vigorosa, formando una suspensión blanca. El producto blanco se centrifugó a 5000 rpm durante 20 min y se lavó 3 veces con agua destilada y finalmente con alcohol. El producto obtenido se calcinó a 500 °C durante 3 h. Las nanopartículas de ZnO se caracterizaron por XDR y TEM, los resultados mostraron las características de las nanopartículas de ZnO de tamaño de partícula promedio entre 25-32 nm con una forma hexagonal.

En el año (Prasad, 2022) sintetizó nanopartículas de ZnO mediante el método de precipitación directa utilizando nitrato de zinc y KOH como precursores. Para ello, se prepararon soluciones acuosas con agua desionizada de nitrato de zinc ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) 0.2M y la solución de KOH 0.4M. La solución de KOH se añadió lentamente a la solución de nitrato de zinc a temperatura ambiente bajo agitación continua hasta formar una suspensión blanca. El producto se centrifugó a 6000 RPM durante 30 min, se lavó dos veces con agua destilada y, luego con alcohol. Finalmente se calcinó a 450 °C durante 4 h. Las nanopartículas de ZnO se caracterizaron por SEM y XRD. Los resultados indican que las nanopartículas de ZnO presentan un ancho de banda característico de 372 nm, un tamaño de cristalito de 140-160 nm y forma esférica.

En el año (Jahan Tamanna et al., 2024) sintetizaron nanopartículas de ZnO por el método de precipitación, utilizando $Zn(NO_3)_2$ y KOH como materiales precursores. Durante el proceso, el primer paso fue la preparación de una solución acuosa de $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ y para esto, se añadieron 170 mL de agua desionizada a 10 g de $Zn(NO_3)_2.6H_2O$. Luego, la solución de KOH se preparó utilizando 170 mL de agua desionizada en 3.77 g de KOH. Luego, ambas soluciones se mezclaron mediante la adición lenta de solución de KOH a la solución de nitrato de zinc bajo agitación, hasta completar la reacción a partir de la apariencia de una suspensión blanca. La solución de reacción se filtró lavando tres veces con agua desionizada y una vez con etanol, y se recogió el precipitado. Por último, el producto

precipitado se calcinó a 500 °C durante 3 horas, seguido de secado en horno a 105 °C durante 2 horas. Las nanopartículas de ZnO obtenidas se caracterizaron por XRD, obteniendo un tamaño de cristalito de 61.28 nm.

Espenti et al., en el año 2020 en el año 2020, estudiaron la síntesis de nanopartículas de ZnO empleando las raíces de *Moringa Oleifera* empleando como precursor el nitrato de zinc hexa-hidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$]. Para la síntesis se emplearon 5 mL de extracto de las raíces junto con 50 mL de agente precursor y se agitó durante 2 horas entre las temperaturas de 60 – 90°C. Se obtiene una pasta de color marrón que se coloca en la mufla a 400°C durante 4h dando como producto un polvo fino realizar caracterizaciones. Los resultados indican que el tamaño promedio de la nanopartícula es de 25nm y presenta una forma esférica

Abel et al., en el 2021, estudiaron la síntesis de nanopartículas de ZnO empleando las hojas de *Moringa Oleifera*, empleando como precursor nitrato de zinc hexa-hidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$]. Para la síntesis se emplearon 10 mL de extracto de hoja y 50 mL de agente precursor con agitación constante a 70°C hasta tener una mezcla homogénea. Luego se desecará a 100°C durante 90 minutos y finalmente se colocará en la mufla a 330 – 350°C durante 1 hora. El polvo obtenido es molido para realizar futuras caracterizaciones. Los resultados indican que se tienen nanopartículas con un tamaño promedio de 50 nm y presentan una forma de flor.

En el año 2023, (Benyamin & Manurung, 2023) se encargaron de sintetizar nanopartículas de ZnO empleando el extracto de las hojas de *Moringa Oleifera,* en donde se utilizó como precursor el nitrato de zinc hexa-hidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$], hidróxido de sodio [NaOH] como regulador de pH y agua destilada junto con etanol [C_2H_5OH] como reactivo para realizar lavados. Para la síntesis se emplea 10 mL del extracto de la hoja junto con 30 mL del precursor a distintas concentraciones. Las condiciones fueron de 700 rpm durante 10

minutos a una temperatura entre 60 – 70°C. Posterior a esto se utiliza el regulador de pH a una concentración de 0.1 M junto a una agitación continua hasta formar precipitado. Finalmente realizaron 3 lavados continuos con etanol y agua destilada para la eliminación de impurezas a 1000 rpm durante 5 minutos. El precipitado se secó a 100°C y pasó a través de un mortero para obtener polvo fino. Los resultados indicaron que se obtiene un tamaño promedio de nanopartícula de 35nm con forma esférica y cubica.

En el año 2017, Matinise et al. sintetizaron nanopartículas de ZnO utilizando hojas secas de la planta *Moringa Oleifera* y nitrato de zinc hexa-hidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$] como agente precursor. Se realizó la caracterización de las nanopartículas de ZnO sintetizadas para poder reconocer sus propiedades físicas, ópticas, químicas, térmicas y electroquímicas. Los resultados indicaron que las nanopartículas obtenidas presentaban un pico de absorbancia de 380 nm y un tamaño de 30.51 nm, además de poseer una forma anisotrópica.

En el 2021, Hussain et al., desarrolló la síntesis verde para obtener nanopartículas de óxido de zinc a partir de la planta de *Moringa Oleifera*, para esto se utilizó como agente precursor al nitrato de zinc hexa-hidratado [$Zn(NO_3)_2.6H_2O$] realizando distintas síntesis variando la cantidad de precursor utilizado. Las nanopartículas obtenidas se caracterizaron mediante DRX, UV-Vis y FTIR, los resultados obtenidos indicaron que se presentaba actividad antibacterial frente al *E.coli, S. aeruginosa y K. pneumonia*.

Dentro de este marco cabe considerar que, Zhang et al. en el año 2015 investigaron el impacto de las nanopartículas de ZnO en una cantidad excesiva sobre la germinación de semillas y el alargamiento de raíces en plantas de maíz (*Zea mays L.*) y de pepino (*Cucumis sativus L.*), donde los resultados mostraron una toxicidad respecto a la elongación de la raíz por parte de las nanopartículas aplicadas a una concentración de 1000 mgL^{-1}; sin embargo, no se mostraron efectos sobre la germinación debido a las capas presentes en la semilla, las

cuales lograron mitigar la absorción de aproximadamente el 50% de las nanopartículas en la raíz y endospermo, lo que podría generan problemas futuros en el crecimiento de la planta.

En los estudios de León Moreno Karina, 2017, se evaluó el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de ZnO, CuO y Fe_2O_3 en el desarrollo de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*). La síntesis de nanopartículas se efectuó bajo el método físico de molienda y se realizó tratamiento térmico y lavado, para su posterior caracterización, obteniéndose tamaños de partícula entre 16 y 45 nm. Los resultados de las variables agronómicas estudiadas, como la altura, número de hojas, diámetro de tallo y número de flores, indican que el uso de nanopartículas en la planta favoreció su crecimiento, sobre todo en altura y diámetro de tallo, además de estimular la floración temprana.

En el año 2019, Bala et al. estudiaron la eficacia de la aplicación de nanopartículas de ZnO como agente remediador de planta de arroz con deficiencia de Zn. Estas se aplicaron de manera foliar a concentraciones de 0, 0.5, 1.0, 5.0 $\frac{g}{L}$ en intervalos de 15 días. Se analizaron las propiedades químicas, recuentos microbianos cultivables, actividad deshidrogenasa y características vegetativas de la planta, así como rendimiento y perfil de nutrientes del suelo. Los resultados indicaron un revertimiento de la deficiencia de Zn y se señala además que cada respuesta específica dependía de cierta concentración aplicada.

Según la información recopilada se conoce que, el desarrollo de la nanotecnología aplicada a la agroindustria como nanofertilizante representa una vía de mejora respecto a los materiales a granel, a partir del aumento de la germinación de semillas, crecimiento de plantas, actividad microbiana en el caso de la síntesis verde, entre otros.

Actualmente, en el ámbito nacional, la empresa CAPEAGRO viene desarrollando nuevas tecnologías para generar beneficios a favor de la agricultura desarrollando

nanofertilizantes, nanoestimulantes, nanoacondicionadores de suelo, etc., mejorando así la asimilación del componente activo de la planta y aumentando la producción. (Agraria, 2021)

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.1. Nanopartículas

Las nanopartículas presentan hoy en día una importancia dentro de los avances tecnológicos debido a su característica a adaptarse a distintas áreas y a su rendimiento mejorado en comparación a los materiales originales que son utilizados para su síntesis (Altammar, 2023). Se pueden encontrar nanopartículas de metales como la plata, el oro, el hierro, el cobre y el paladio; de óxidos metálicos como el óxido de zinc, el óxido de titanio IV, óxidos de cobre I y II, óxido de indio III y sales de valencia cero como el sulfuro de plomo (Kharissova et al., 2013), que se sintetizan con el objetivo de mejorar sus propiedades y diversificar su aplicación a una mayor cantidad de industrias.

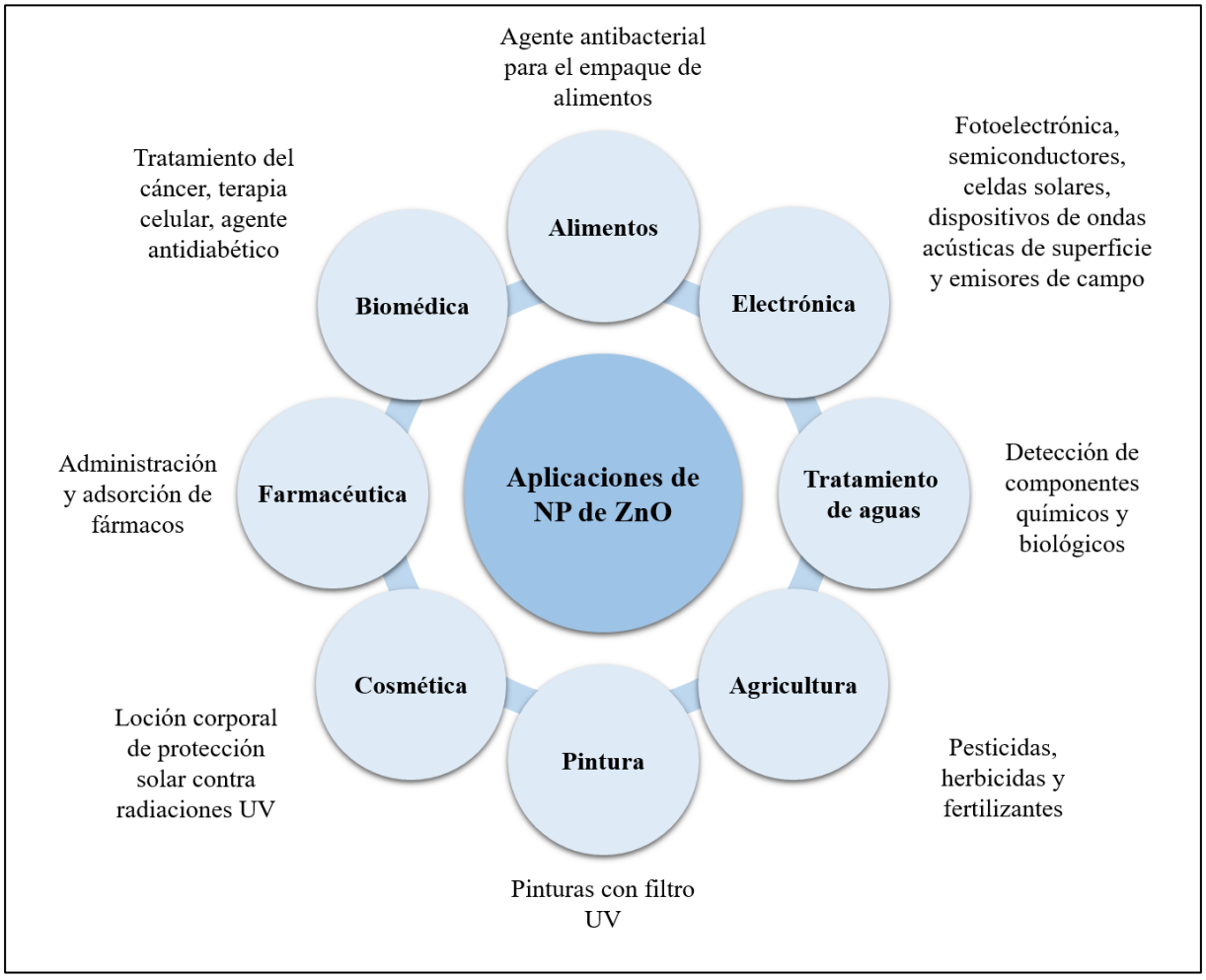
En el 2023, Paarakh & Muthukumar,señalan que las nanopartículas se clasifican según sus propiedades físicoquímicas, morfología y tamaño (1-100 nm); y, que, según su tipo, las nanopartículas pueden ser a base de orgánicas, inorgánicas, metálicas, cerámicas, semiconductoras y poliméricas. Según Y. Khan et al., 2022, sus diversas aplicaciones son únicas, dado que dependen principalmente de su tamaño, forma, estructura y sus propiedades físicas y químicas distintivas.

2.3.2. Nanopartículas de ZnO

Las nanopartículas de óxido de zinc presentan diversas estructuras, entre ellas se encuentran las unidimensionales, las cuales comprenden nanobarras, agujas, hélices, resortes, fibras, tubos y alambres, por su parte, las estructuras bidimensionales incluyen nanoplacas, nanohojas, nanocintas y nanoanillos, por último, las estructuras tridimensionales cuentan con dientes de león, flores y copos de nieve (Jiang et al., 2023).

Con respecto a su cristalización existen dos tipos de estructuras, la cúbica de zinc-blenda y la wurtzita hexagonal, siendo esta última la que posee la estructura más estable en situaciones ambientales. Las características y propiedades que presentan las nanopartículas de óxido de zinc, tales como su semiconductividad, actividad microbiana, activador de vulcanización y absorción UV (Bandeira et al., 2020); lo convierte en un material con beneficios múltiples para distintas áreas en la industria como optoelectrónica, cosméticos, textil, catalizadores, cerámicos, películas finas, sensores de gas, aditivos de caucho, pigmentos, transistores y transductores (Aquino et al., 2018a). La Figura 1 presenta de forma esquemática las aplicaciones de las nanopartículas de óxido de zinc en distintas industrias.

Figura 1 Aplicaciones de las nanopartículas de ZnO

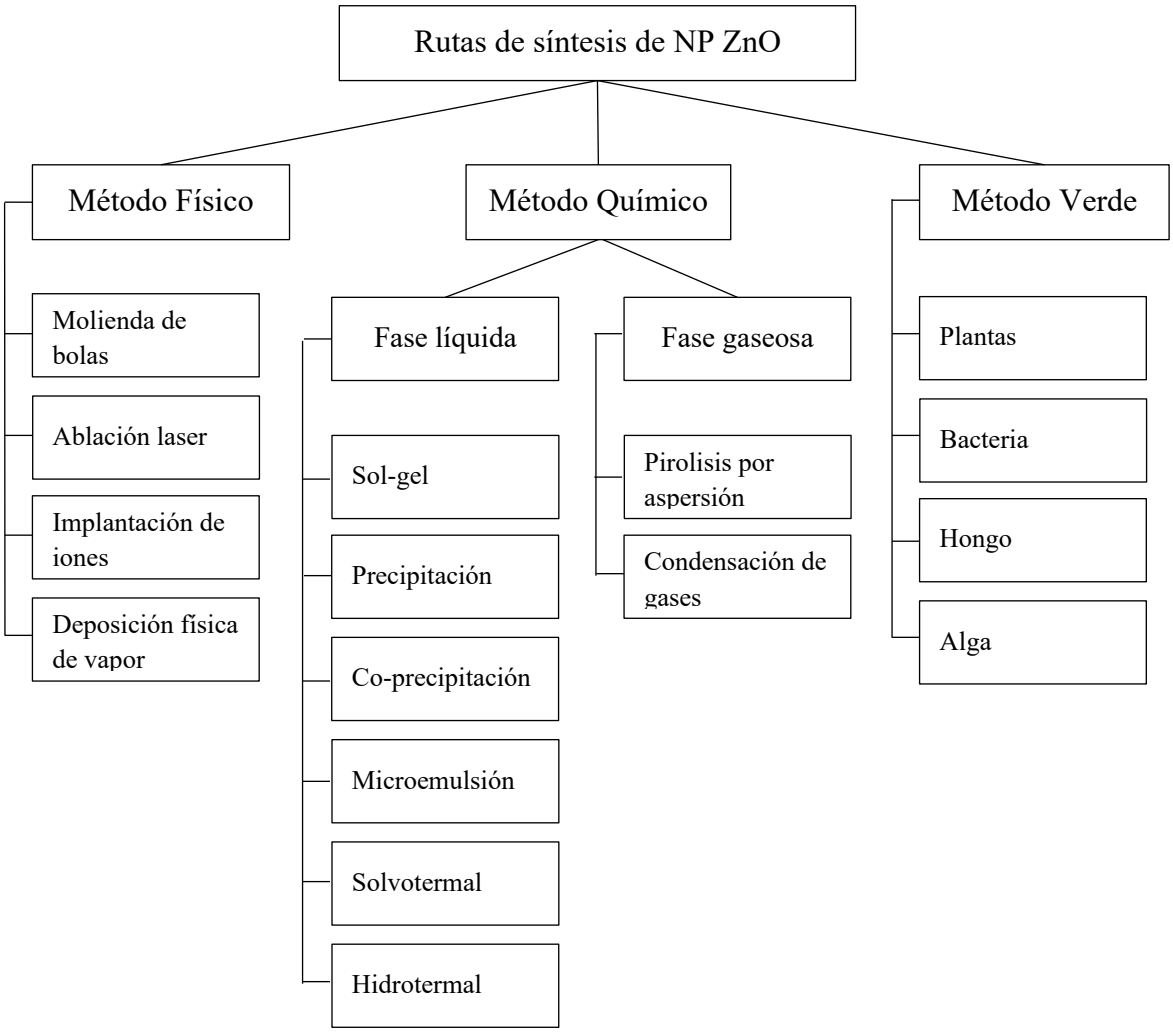


Fuente: Adaptado de *Zinc Oxide Nanoparticles: Different synthesis approaches and applications*, por Kundu et al., 2021

2.3.3. Síntesis de nanopartículas de ZnO

La síntesis de nanopartículas de ZnO se puede llevar a cabo a partir de diversas rutas, así tenemos a la síntesis física que se rige a métodos deposición láser, pulverización catódica magnetrónica, electrodeposición y evaporación por haz de electrones (Mandal et al., 2022); la síntesis química comprende métodos hidrotérmicos, solvotérmicos, sol-gel, deposición por baño químico, proceso químico húmedo, pirólisis por aspersión, microemulsión y precipitación (Islam et al., 2022); y por su parte, la síntesis verde, biogénica o biológica se basa en una fuente de materia prima de sustratos biológicos, como pueden ser las algas, bacterias, hongos o plantas (Mandal et al., 2022), estos se clasifican con detalle en la Figura 2.

Figura 2 Métodos de síntesis de nanopartículas de ZnO



Fuente: Adaptado de *Current Research of Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, characterization and Biomedical Applications*, (p.3066), por Mandal et al., 2022, Nanomaterials ,12(17)

Con el fin de comparar las particularidades de los métodos químicos, físicos y biológicos, se define que los métodos físicos poseen un elevado costo de los productos; el método biológico expresa un menor consumo de energía y de sustancias químicas, que resulta más rentable y ecológico ya que cumple con los fundamentos para un desarrollo sustentable, adicionando que esta ruta de síntesis a partir de extractos son biocompatibles y pueden servir como agentes *capping* para estabilizar las nanopartículas. Por su parte, los métodos químicos

pueden llegar a presentar un alto consumo de energía cuando se presentan altas condiciones de presión o temperatura. Sin embargo, aunque la síntesis química presenta toxicidad para el medio ambiente, se producen cristales puros deseados con alta estabilidad y alto rendimiento (Bandeira et al., 2020; Droepenu et al., 2022).

2.3.4. Método químico

Entre los diversos métodos químicos, tales como sol-gel, deposición química de vapor, precipitación, descomposición térmica o síntesis hidrotermal (Galindo-Guzmán et al., 2022), el método de coprecipitación es el más rentable ya que no requiere complejos parámetros de proceso, ni equipos costosos y sofisticados (Katiyar et al., 2020). Sin embargo, presenta la desventaja de altos costos operativos y liberación de impurezas (Aalami et al., 2024). Así, en la Tabla 1 se reportan los precursores utilizados para la síntesis por el método de precipitación, las condiciones de operación y propiedades de las nanopartículas de ZnO obtenidas.

Tabla 1 Propiedades de las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método químico por precipitación

N°	Compuestos	Condiciones de operación	Propiedades	Ref.
1	$Zn(CH_3COO)_2$, $(NH_4)_2CO_3$, PEG10000	Secado: 12 h, 100 °C Calcinado: 3 h, 450 °C	Estructura: Zincita Forma: esférica Diámetro: ~ 30 nm	(Hong et al., 2006)
2	$Zn(NO_3)_2$	Calcinado: 2 h, 600 °C	Estructura: wurtzite Diámetro: 50 nm	(Xu et al., 2000)
3	$Zn(NO_3)_2$, NaOH	Síntesis: 2 h Secado: 2 h, 100 °C	Forma: esférica Diámetro: ~ 40 nm	(Lanje et al., 2013)
4	$ZnSO_4$, NH_4HCO_3, etanol	Secado: overnight, 100 °C Calcinado: 300–500 °C	Estructura: wurtzite Diámetro: 50 nm Tamaño cristalito: 9–20 nm Tamaño de partícula: ~12 nm	(Wang et al., 2010)

5	$ZnSO_4$, NH_4OH, NH_4HCO_3	Reacción: 30 min, 60 °C Secado: 12 h, 100 °C Calcinado: 2 h, 400 °C	Estructura: hexagonal Forma: Escamas (D: 0.1–1 μm, L: 60 nm)	(Cao et al., 2009)
6	$Zn(CH_3COO)_2$, NaOH	Reacción: 30 min, 75 °C Secado: overnight, temperatura ambiente	Estructura: hexagonal wurtzite Forma: Flores y barras Diámetro: 15–25 nm	(Khoshhesab et al., 2012)

Fuente: Adaptado de *Zinc oxide – From Synthesis to application: A review*, (p.2835), por A. Kolodziejczak-Radzimska, 2014, Materials, 7(4).

2.3.4.1. Mecanismo de reacción de la síntesis química por la técnica de coprecipitación

El método químico por coprecipitación requiere de sales de Zn, estas pueden ser el $ZnCl_2$, $Zn(Ac)_2$ y $Zn(NO_3)_2$, así como hidróxidos alcalinos, llamados también mineralizadores, encargados de mejorar la solubilidad de los reactivos para acelerar la reactividad y proporcionar alcalinidad para la cristalización de óxidos metálicos, entre ellos se tienen al amoniaco, KOH y NaOH, además se pueden adicionar tensioactivos (PVC, CTAB). (Katiyar et al., 2020; Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014)

En el método de coprecipitación, se han estudiado las reacciones de síntesis de nanopartículas de ZnO, tomando al nitrato de zinc como precursor, fuente de Zn^{2+}, en presencia de hidróxido alcalino (KOH / NaOH), fuente de OH^-. Luego de la síntesis, los nitratos solubles en agua de metales alcalinos formados durante la coprecipitación pueden eliminarse del producto ZnO mediante lavado con agua desionizada y etanol (Katiyar et al., 2020). Este mecanismo de reacción se presenta a continuación, utilizando KOH.

$$Zn(NO_3)_2.6H_2O + 2KOH \rightarrow Zn(OH)_2 + 2KNO_3 + 6H_2O$$

$$Zn(OH)_2 + 2OH^- \rightarrow Zn(OH)_4^{2-}$$

$$Zn(OH)_4^{2-} \rightarrow ZnO + H_2O + 2OH^-$$

Nota. Adaptado de Influence of Alkali Hydroxides on Synthesis, Physico-chemical and Photoluminescence properties of Zinc Oxide Nanoparticles, (p.6), por Katiyar et al., 2019

2.3.4.2. Efecto de los factores de síntesis por el método químico sobre las propiedades de las NPsZnO

Se han estudiado distintos factores que podrían influir en las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas sintetizadas por el método químico por coprecipitación, estos se muestran en la Tabla 2. Se puede apreciar en la mayoría de los estudios, una tendencia creciente de tamaño y pureza de las nanopartículas al aumentar la temperatura y tiempo de calcinación.

Tabla 2 Factores que influyen en las propiedades de las NPsZnO sintetizadas por el método químico por coprecipitación

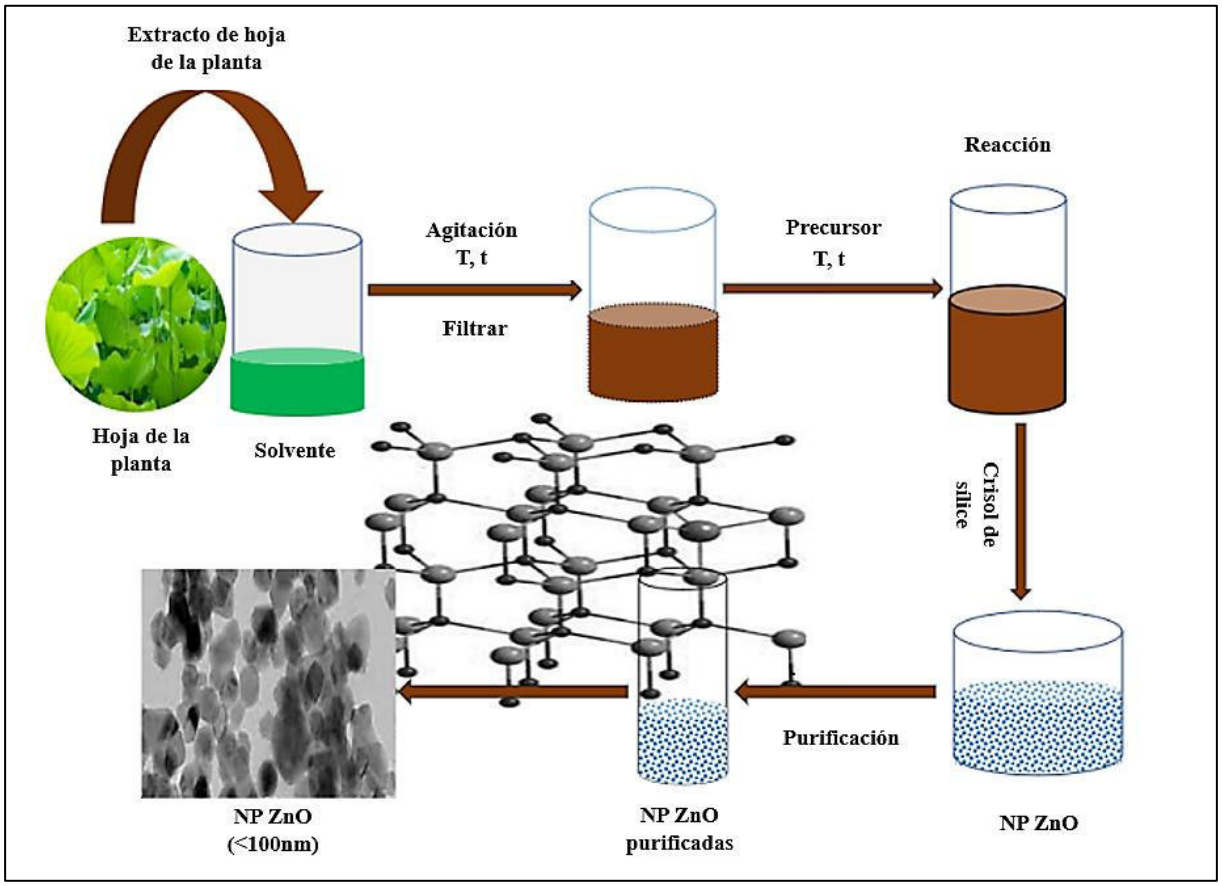
Factores	Compuestos	Variable independiente	Tamaño (nm)	Pureza (%)	Forma	Ref.
	$ZnSO_4.7H_2O$	300	9.4	96.2	N.R.	(Y. Wang et al., 2010)
	NH_4HCO_3	350	11.3	97.1		
		400	13.2	98.2		
		500	19.4	99.0		
Temperatura de calcinación (°C)	$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	350	14.58	N.R.	N.R.	(Salahuddin et al., 2015)
	Na_2CO_3	400	15.41			
		450	28.33			
		500	44.2			
		550	72.5			
		600	91.44			

	$Zn(NO_3)_2$ KOH	- 600 700 800	18.60 25.45 27.77 31.56	N.R.	Esférico para todos los casos	(Chaithanatkun et al., 2017)
	$ZnC_2O_4.2H_2O$	400 500 600	3 28 25	N.R.	Esférico para todos los casos	(Baharudin et al., 2018)
Tiempo de calcinación (h)	$ZnSO_4.7H_2O$ NH_4HCO_3	0.5 1 2 3 4	~12.7 ~13.5 ~13.3 ~14 ~14.7	N.R.	N.R.	(Y. Wang et al., 2010)

2.3.5. Método verde

El método verde presenta distintas ventajas al momento de la síntesis de nanopartículas como un bajo costo y una elevada pureza, además de ser amigable con el medio ambiente, ya que para el desarrollo de nanopartículas de óxidos metálicos de diversos tamaños y formas se utilizan compuestos de biomasa como hojas, flores, semillas, raíces, frutos y microorganismos (Ngom et al., 2021). El uso de los sustratos vegetales presenta ciertas ventajas respecto del uso de los microorganismos, dado que resultan ser más rentables, presentan mayor facilidad durante su procesamiento ya que la extracción de la planta solo requiere de un solvente como el agua o etanol, y son menos tóxicos tanto para la salud como para el medio ambiente (Bandeira et al., 2020).

Figura 3 Esquema de síntesis verde de NPsZnO



Fuente: Adaptado de *Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biosynthesis: Overview*, por al Jabri et al., 2022, Life.

La literatura reporta las propiedades de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas a partir de diversas especies de plantas mostrados en la Tabla 3. Por otro lado, se logró recopilar datos de diversos estudios de la síntesis verde de nanopartículas de ZnO a partir del extracto de hojas de *Moringa Oleifera* a partir de nitrato de zinc hexahidratado como precursor de Zn tal como se aprecia en la Tabla 4, la cual representará nuestro caso de estudio.

Tabla 3 Propiedades de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método verde a partir de diversas especies de plantas

N°	Planta	Parte de la planta	Tamaño NPsZnO (nm)	Forma NPsZnO	Ref.
1	*Aloe Vera L.*	Hojas	25 - 55	Esferas	(Sangeetha et al., 2011)

2	*Camelia sinensis*	Hojas	8	Esferas	(Nava et al., 2017)
3	*Eclipta alba*	Hojas	3 - 9	Esferas	(A. K. Singh et al., 2018)
4	*Menta Pulegium L.*	Hojas	38 - 49	Esferas	(Rad et al., 2019)
5	*Stevia*	Hojas	12 - 30	Esferas y bastones	(Khatami et al., 2018)
6	*Punica granatum*	Hojas	10 - 30	Esferas	(K. Singh et al., 2019)

Tabla 4 Propiedades de nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método verde a partir de extracto de hojas de Moringa Oleifera.

N°	Precursor	Tamaño NP ZnO (nm)	Forma NP ZnO	Ref.
1	$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	50	Floreada	(Abel et al., 2021b)
2	$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	16	Escamosa	(Elumalai et al., 2015)
3	$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	20	Esférica	(González-Fernández et al., 2022a)
4	$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	25	-	(Kayalvizhi P & Jayanthi G, 2020)
5	$Zn(NO_3)_2.6H_2O$	25	Esférica	(Thirunavukkarasu et al., 2016)
6	$Zn(CH_3CO_2).2H_2O$	40	Hexagonal	(Letsholathebe et al., 2019)

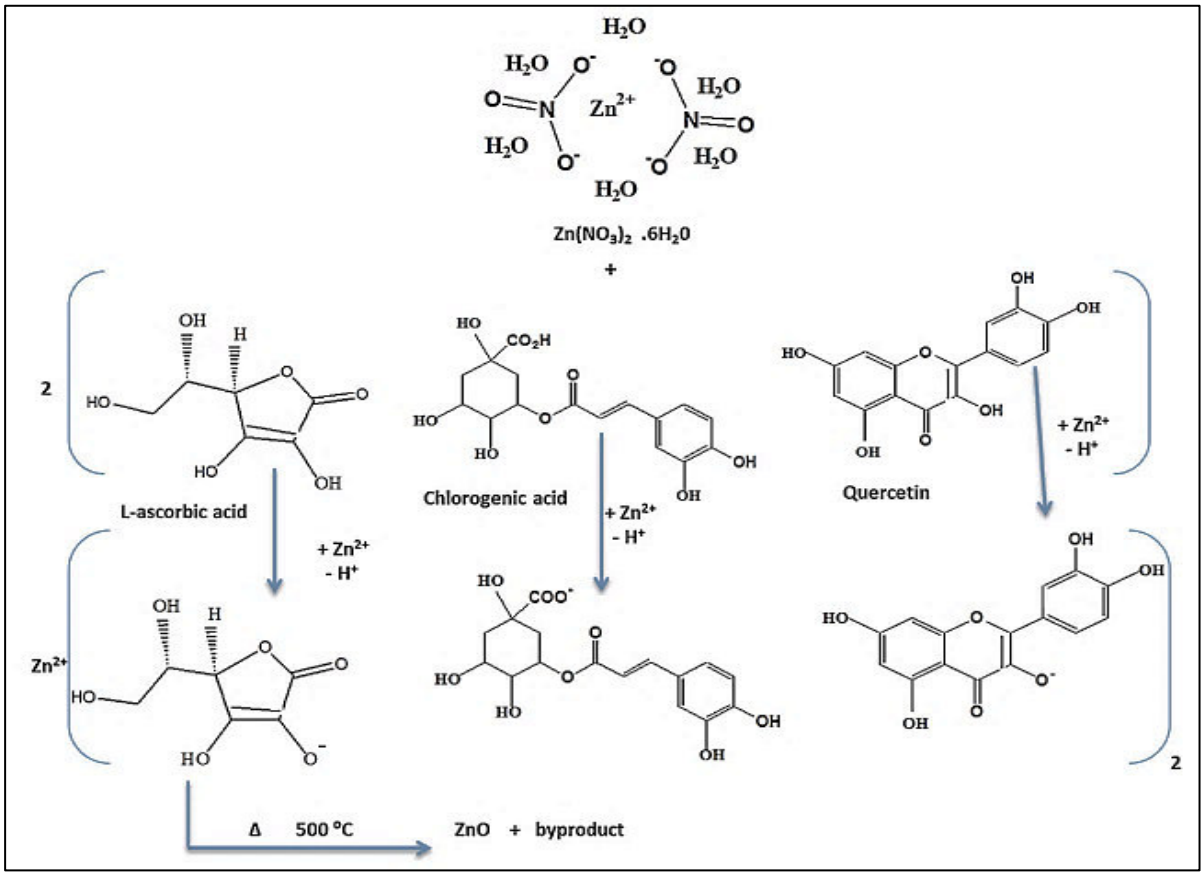
2.3.5.1. Mecanismo de reacción de la síntesis verde

La síntesis verde a partir de extractos de plantas se basa entonces, en la reducción de una sal de óxido de zinc, la cual contiene iones de zinc (II), por los compuestos activos de la planta al zinc metálico. Después de la biorreducción de zinc, el zinc metálico reacciona con el oxígeno disuelto presente en la solución para formar los núcleos de ZnO (Bandeira et al., 2020). El mecanismo propuesto de biosíntesis de nanopartículas de ZnO se propone en la Figura 4, este considera tres reacciones químicas de los iones Zn^{2+} solvatados con los fitoquímicos de la planta *Moringa Oleífera*, es decir, con un ácido fenólico (ácido clorogénico), un flavonoide (quercetina) y compuestos a base de vitaminas (ácido ascórbico). Se produce una probable oxidación del compuesto biológico a través de radicales libres, seguido de atracción electrostática entre el radical libre y el catión del precursor (Matinise

et al., 2017). Otros autores coinciden con el mecanismo previamente mencionado, donde el ion nitrato ioniza los compuestos bioactivos para el primer paso y luego los cationes resultantes interactúan con Zn^{+2} a través de atracciones electrostáticas. Se eligen una vitamina (ácido l-ascórbico) para el extracto de hojas, un flavonoide (quercetina) para las flores y un ácido graso (ácido oleico) para las semillas, estas se presentan en la Figura 5. (Ngom et al., 2021).

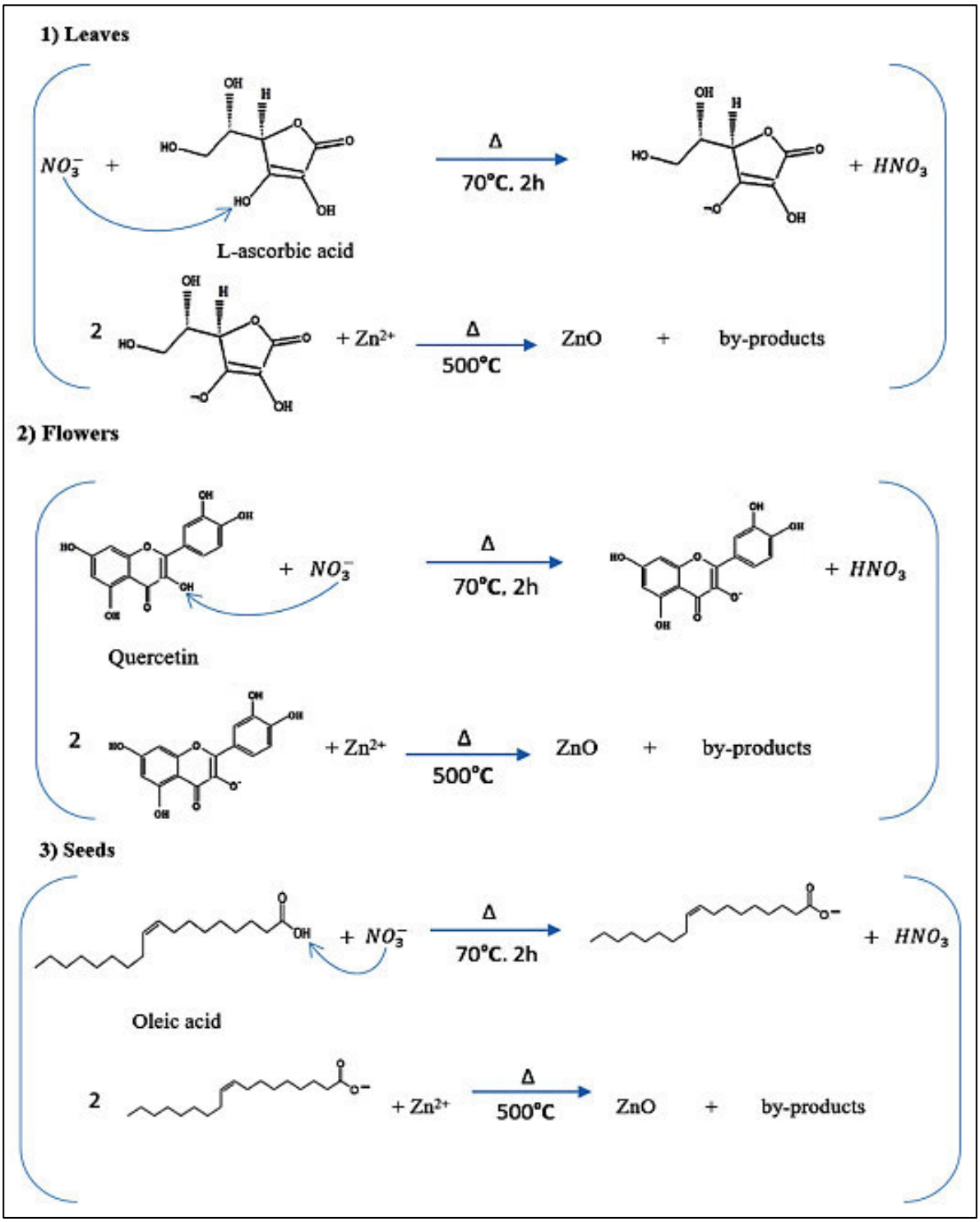
Muchos compuestos metabólicamente importantes, como los flavonoides, los terpenoides y los agentes sensibles al estrés oxidativo, desempeñan un papel prometedor en la protección y estabilización de las nanopartículas. Se realizó una biosíntesis de nanopartículas de óxido de zinc se llevó a cabo utilizando extractos acuosos de frutos de *M. Fragrans* como agentes reductores, taponadores y estabilizantes. Los grupos funcionales responsables de estabilizar y tapar las nanopartículas de ZnO se confirmaron mediante análisis FTIR, siendo estos componentes alcohólicos, fenólicos y flavonoides.

Figura 4 Mecanismo de biosíntesis de NPsZnO



Fuente: Adaptado de *ZnO nanoparticles via Moringa oleifera green synthesis: Physical properties & mechanism of formation*, (p.345), por Matinise et al., 2017, Applied Surface Science, 406(2017).

Figura 5 Mecanismo de biosíntesis de NPsZnO para hojas, flores y semillas



Fuente: Adaptado de *Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using extracts of Moringa Oleifera: Structural & optical properties*, (p.345), por Matinise et al., 2017, Applied Surface Science. *(Ngom et al., 2021)*

2.3.5.2. Efecto de los factores de síntesis por el método verde sobre las propiedades de las NPsZnO

Distintos factores influyen a las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas empleando el método verde en su rendimiento de producción, morfología, tamaño y en su posterior aplicación en distintas áreas dentro de las industrias. Estos factores comúnmente incluyen a la temperatura y el tiempo de reacción, el pH y a la relación en la cual se mezcla el extracto de la planta y el agente precursor de Zn (Mutukwa et al., 2022). La Tabla 5 muestra como estos factores influencian en las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas de óxido de zinc.

Tabla 5 Factores que influyen en las propiedades de las NP de ZnO sintetizadas por el método verde

Factores	Planta	Precursor de Zn	Variable independiente	Tamaño (nm)	Ref.
Temperatura de calcinación (°C)	*Aspalathus linearis*	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	300	12.5	(Diallo et al., 2015)
	Lessertia frutescens	$Zn(NO)_3 \cdot 6H_2O$	700	13.3	(Mahlaule-Glory et al., 2019)
	Athrixia phylicoides	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	800	24.5	(Kaningini et al., 2022a)
Tiempo de calcinación (h)	*Monsomia burkeana*	$ZnCl_2 \cdot 6H_2O$	1	5-15	(Ngoepe et al., 2018)
	Agathosma betulina	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	2	15.8	(Thema et al., 2015)
	Dovyalis caffra	$Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$	2	25.29	(Adeyemi et al., 2022)

2.3.6. Caracterización de las nanopartículas de ZnO

Las nanopartículas metálicas sintetizadas se caracterizan dependiendo de las propiedades a estudiar, entre ellas, su forma, tamaño, morfología y área de superficie, esto se realiza por medio de diversas técnicas de caracterización, como espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Vis), difracción de rayos X (XRD), rayos X de dispersión de energía (EDAX), distribución del tamaño de partículas (PDS), potencial zeta (ZP), fotoluminiscencia

(PL), dispersión de luz dinámica (DLS), espectroscopia Raman (R), espectroscopia infrarroja (IR), voltamperometría cíclica (CV), seguimiento de nanopartículas (NTA), espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), análisis gravimétrico térmico (TGA), difracción electrónica de área seleccionada (SAED), microscopía de fuerza atómica (AFM), microscopio electrónico de barrido (SEM), microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) (Begum et al., 2022), que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Técnicas para caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas

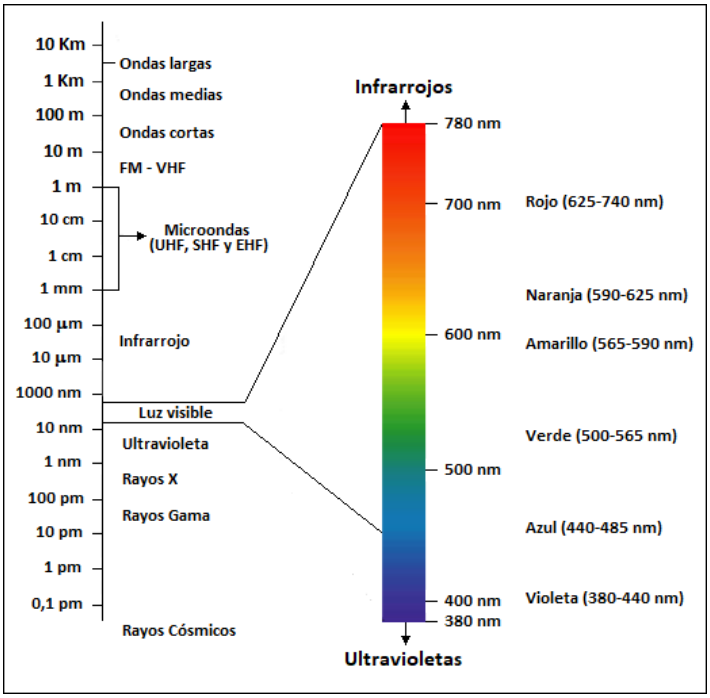
Técnica	Equipos	Número	Distribución de tamaño	Estado de aglomeración	Forma	Composición química
Técnicas de espectroscopia	Espectroscopia UV-Visible		✓			✓
	Difracción de Rayos X		✓			✓
	Espectroscopia FT-IR					✓
	Espectroscopia RAMAN					✓
	Absorción atómica/Espectroscopia de emisión óptica					✓
	Espectroscopia de masa					✓
	Fotoelectrón de rayos X					✓
	Dispersión dinámica de la luz		✓	✓		
Técnicas de microscopía	Microscopía electrónica de barrido	✓	✓	✓	✓	
	Microscopia de transmisión por electrones	✓	✓	✓	✓	
	Microscopía de sonda de barrido	✓	✓	✓	✓	

Nota: Adaptado de *Recent Advances in Green Synthesis, Characterization, and Applications of Bioactive Metallic Nanoparticles* por Begum et al., 2022

2.3.6.1. Técnica de caracterización por Espectroscopía UV-Visible

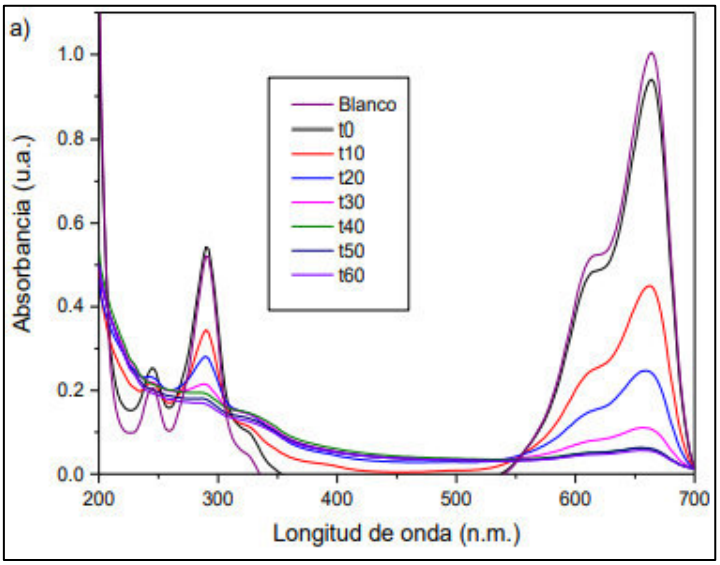
La espectroscopía UV-Vis es una técnica analítica no destructiva, versátil, rentable y sencilla utilizada para identificar distintos compuestos orgánicos y algunas especies inorgánicas (Khalid et al., 2024). Es una de las técnicas más aplicadas en el análisis cualitativo para detectar eficazmente metales pesados y distintas sustancias químicas evaluando su pureza (Chen, 2024). Y su rango de longitud de onda esta entre 160-780 nm (ver figura 6). Como se muestra en la Figura 7, la información brindada por la espectroscopía UV-Vis se representa en un gráfico de absorbancia, en el eje Y, y de longitud de onda, en el eje X. El proceso de absorción de esta radiación se da debido a una excitación de electrones de enlace al hacer incidir una luz sobre la muestra acuosa, como resultado se observará una banda de absorción en cierto intervalo de onda (370-390 nm) (Jessica, 2023). Dentro de las aplicaciones de la espectroscopía UV-Vis se registran cultivos bacterianos, análisis de bebidas, análisis de ADN y ARN, análisis farmacéutico, entre otros (Wajiha Shabbir, 2024).

Figura 6 Espectro de ondas electromagnéticas



Fuente: Adaptado de *Color y Coloración | Ciência e Tecnologia da Borracha. (n.d.). Ciência E Tecnologia Da Borracha.* https://www.ctborracha.com/color-y-coloracion/

Figura 7 Espectro de absorción de extracto de *Ruta L.* (Ruda)



Fuente: Adaptado de *Síntesis y caracterización de nanopartículas de ZnO mediante extracto de RUTA L. y su aplicación fotocatalítica en la degradación de azul de metileno*, Jessica, 2023

Así mismo, respecto al uso de la planta Moringa Oleifera para la respectiva síntesis, se tienen datos de picos de absorción observados a 361 nm (Pal et al., 2018), 350 nm (Abel et al., 2021) y 381.8 nm (Ngom et al., 2021). Por otro lado, para la síntesis química de nanopartículas por el método de coprecipitación, la literatura reporta picos de absorción de 373 nm y 370 nm, utilizando KOH y NaOH respectivamente (Katiyar et al., 2020).

2.3.6.2. Técnica de caracterización por Dispersión de Luz Dinámica (DLS)

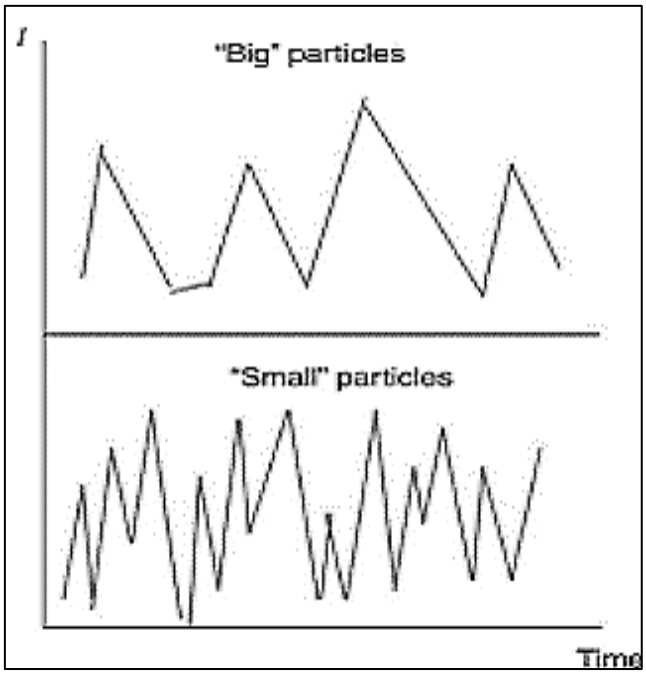
La dispersión de luz dinámica (DLS por sus siglas en inglés) es una técnica popular para realizar la medición de distribuciones de tamaño de partícula en emulsiones y suspensiones. Así mismo, se deben considerar distintos parámetros en función de las propiedades de la materia prima, temperatura y concentración de los componentes (Rodriguez-Loya et al., 2024).

La ecuación de Stokes-Einstein, que se muestra en la Ec.1, nos permite determinar el diámetro hidrodinámico de las partículas ($\boldsymbol{d_h}$), el cual representa el diámetro de una esfera

rígida hipotética y presenta el mismo coeficiente de difusión o viscosidad de la nanopartícula que se desea caracterizar (Baer et al., 2024). El diámetro hidrodinámico de las nanopartículas puede verse afectado debido a la estabilidad, esto debido a la gran área superficial específica que se presenta, originando aglomeraciones con el tiempo. Además, estos resultados también dependen del tamaño, morfología y estado de la superficie del sistema (Loza et al., 2019). Como se observa en la Figura 8, partículas pequeñas se llegan a difundir más rápido, ocasionando fluctuaciones rápidas, mientras que partículas de mayor tamaño, genera fluctuaciones lentas (Vera Nuñez & Tamo Cornejo, 2018). La ecuación de Stokes-Einstein se describe a continuación, donde k es la constante de Boltzmann $\left(1.3806 \times 10^{-23} \frac{J}{K}\right)$, T es la temperatura, η es la viscosidad del medio y R_h es el radio hidrodinámico (Baer et al., 2024).

$$d_h = \frac{k\mathrm{T}}{3\pi\eta R_h} \qquad \text{Ec.1}$$

Figura 8 Fluctuaciones de la intensidad de luz dispersada en función del tiempo



Fuente*:* Adaptado de *Biosíntesis y caracterización de nanopartículas de plata (AgNPs) con Thelypteris glandulosolanosa (Raqui-Raqui) y evaluación de su efecto anticancerígeno en línea celular de cáncer de mama MCF-7, (p.27)* (L. Vera, 2018).

2.3.6.3. Técnica de caracterización por Dispersión de luz por análisis de fase (PALS)

En lugar de examinar el cambio por frecuencia, PALS es una técnica más sensible para determinar las cargas superficiales observando el cambio de desplazamiento de fase (Suparno & Nur Aziz, 2024).

La información que brinda el potencial Z es una medida de atracción o repulsión entre distintas partículas que se encuentran cargadas electrostáticamente, esto permite estudiar las emulsiones, dispersiones y suspensiones (Vergara et al., 2022). Los valores que se brindan pueden ser positivos o negativos. Si estos son menores a -30 mV y mayores a 30 mV confieren estabilidad a la suspensión coloidal (Herrera Robalino, 2021)

2.3.6.4. Técnica de caracterización por Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

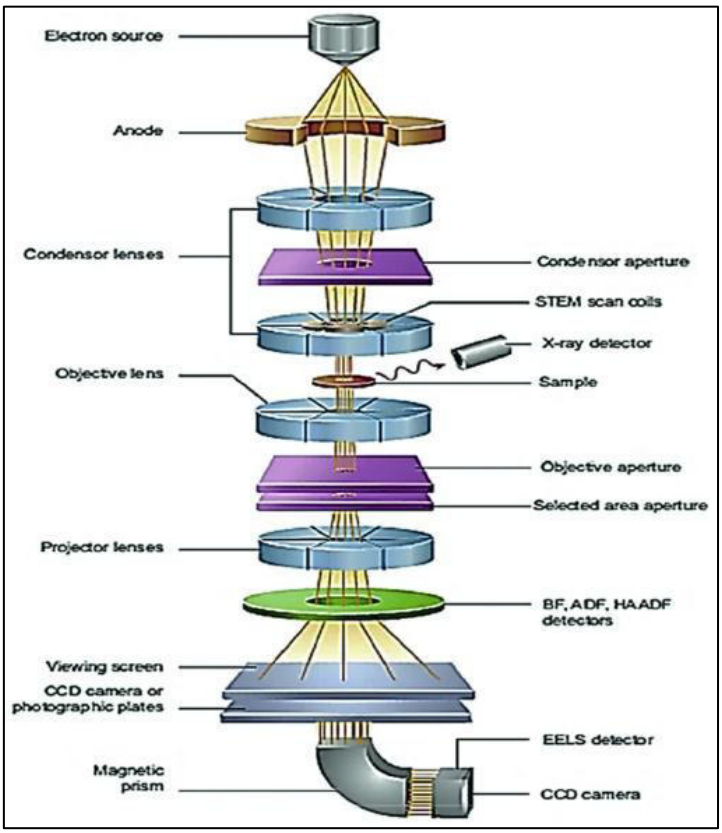
El principio del microscopio electrónico de transmisión es similar al del microscopio óptico, pero en lugar de utilizar rayos de luz, se emplea un haz de electrones para enfocar el objetivo y producir una imagen. La resolución que presenta el TEM es 1000 veces mayor en comparación a un microscopio óptico dado a que la longitud de onda de los electrones empleados es 100 000 veces más corta que la onda de luz, brindando una mejor ilustración de las estructuras internas de partículas muy pequeñas (Sharma, 2023).

El uso del TEM para estudiar la morfología, información cristalográfica e información composicional (Sharma, 2023) de los materiales permite que su uso se dé en distintas áreas como la nanotecnología, biología, ciencia de los materiales, entre otras (Henderson, 2023).

El funcionamiento presenta tres etapas fundamentales. En primer lugar, se tiene un cañón que genera un haz de electrones, el cual, gracias a un sistema de condensador, enfoca el haz sobre el material. Luego un sistema que consiste en lentes y platinas móviles se encargan de enfocar los electrones que pasan a través del material, generando así una imagen real y ampliada. Finalmente, un sistema de registro de imágenes convierte la imagen electrónica en una forma perceptible para poder realizar evaluaciones futuras (Frod & Joy, 2024).

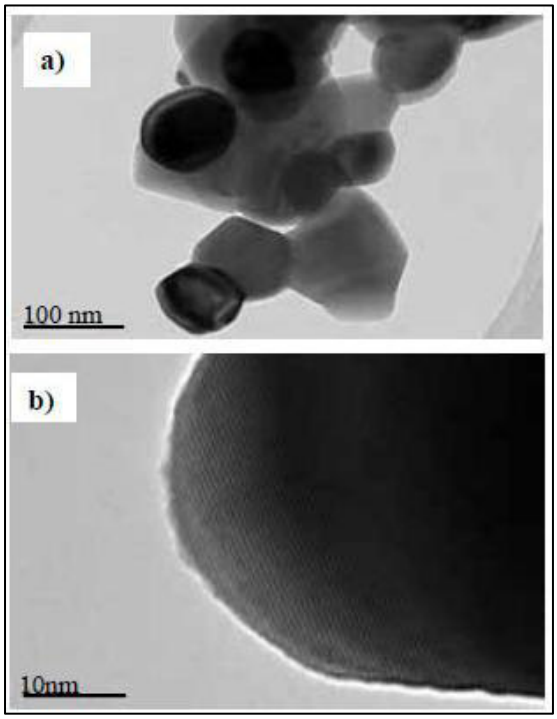
La Figura 9 muestra los componentes del equipo para realizar la microscopía electrónica de transmisión. La Figura 10 muestra los resultados de la microscopía electrónica brindando información sobre la morfología de las NPsZnO.

Figura 9 Componentes de la microscopía electrónica de transmisión (TEM)



Fuente*:* Adaptado de *Characterization Techniques in Nanotechnology: The State of the Art , (p.21)* (Asafa et al., 2021)

Figura 10 Morfologías de nanopartículas de ZnO obtenidas por método de precipitación

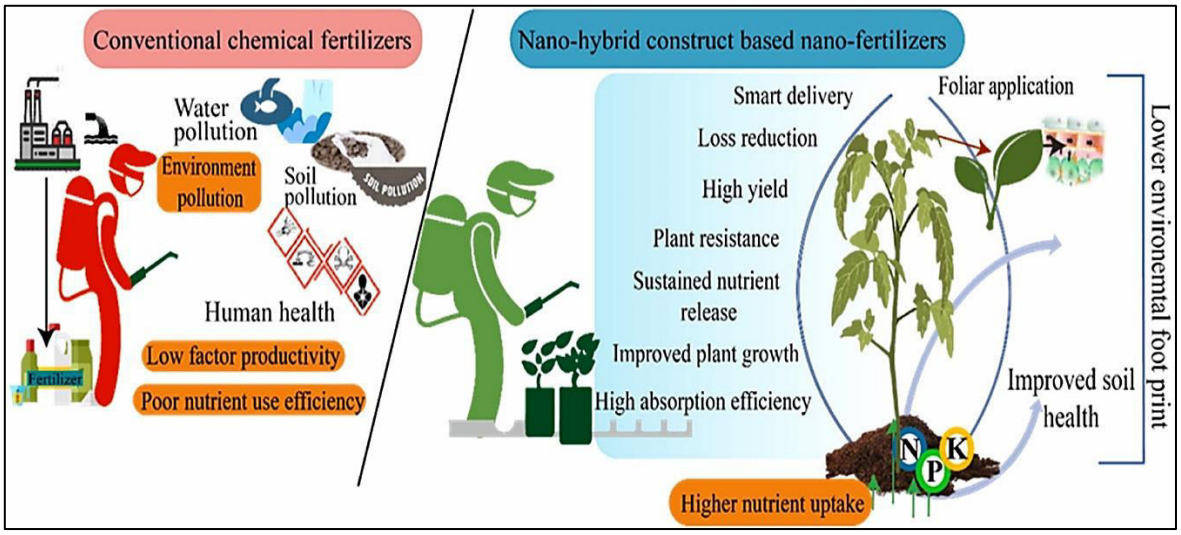


Fuente: Adaptado de *Caracterización de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método de precipitación y su evaluación en la incorporación en pinturas esmalte, (Aquino et al., 2018b)*

2.3.7. Nanofertilizantes de ZnO

La nanotecnología en el sector agrícola presenta un gran potencial mostrando eficiencia en la liberación controlada de agroquímicos, aumento en el rendimiento y productividad de los cultivos (Vázquez-Núñez, 2022). Es así como el uso de nanomateriales en nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoherbicidas asegura la proveeduría de nutrientes para el crecimiento de la planta (Havlin, 2020). La Figura 11 muestra una comparativa entre los fertilizantes obtenidos de manera convencional y los que utilizan nanomateriales.

Figura 11 Comparativa entre los nanofertilizantes químicos y los basados en nanotecnología



Fuente: Adaptado de *Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability*, por Babu et al., 2022, Chemosphere

Las nanopartículas de óxido de zinc tienen una aplicación potencial como nanofertilizantes, dado que su uso conlleva una mayor producción de metabolitos beneficiosos para el cultivo (Fortis-Hernández et al., 2024).Algunos reportes indican que las nanopartículas de óxido de zinc usadas en cultivos de fresa (*Fragaria*) (Z. Wang et al., 2023) incrementaron su rendimiento de cultivo mientras que hubo una disminución en la presencia de moho. Su aplicación en cultivos de olivo (*Olea europaea L.*) indica que se observaron mejoras en los parámetros de crecimiento, el número de brotes, el peso seco total y un aumento en el contenido de clorofila (Regni et al., 2022).

Como se mencionó en la sección 4.3.1, se ha estudiado la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc a partir de diversas plantas como *Moringa oleifera*, *Aloe vera*, *Anisochilus carnosus*, entre muchas otras; siendo algunas de estas utilizadas para investigaciones posteriores como nanofertilizantes. En las Tabla 7 y 8 se aprecia la recopilación de estas indicándose las propiedades de las nanopartículas obtenidas y su aporte a la agricultura.

Tabla 7 Efecto de la aplicación de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde en el sector de la agricultura

N°	Planta	Parte de la planta	Propiedades de las NPsZnO	Aplicación en la agricultura	Ref.
1	*Azadirachta Indica*	Hojas	Forma esférica Tamaño: 20-40 nm	Mejora el crecimiento de las plantas	(Singh et al., 2019)
2	*Curcuma longa*	Tubérculo	20 nm	Plántula (alargamiento de raíces y brotes)	(Venkateswara & Taraka, 2015)
3	*Nigella sativa*	Hojas	20 nm	Planta (aumenta la ramificación, el crecimiento)	(Alaghemand et al., 2018)
4	*Calotropis gigantea*	Extracto de hoja	1.5–8 nm	Plántula (actúa como nanofertilizante y mejora el crecimiento y desarrollo)	(Chaudhuri & Malodia, 2017)
5	*Elaeagnusangustifolia*	Extracto de hoja	40 nm	Mejora el crecimiento y la germinación de las plántulas	(Singh et al., 2016); (Kim et al., 2016)
6	*Nigella sativa*	Extracto de semilla	24 nm	Mejora el crecimiento del brote y la raíz y aumenta el contenido de clorofila de las hojas	(Awan et al., 2021)

Nota. Adaptado de *The Role of Green Synthesised Zinc Oxide Nanoparticles in Agriculture* (p.133), por Rather et al., 2022 , Sustainable Agriculture.

Tabla 8 Efecto de la aplicación de las nanopartículas de ZnO en el sector de la agricultura

N°	Ruta de síntesis de NPsZnO	Propiedades de las NPsZnO	Especie de la planta de estudio	Efecto	Ref.
1	Método de descomposición de oxalato modificado	Tamaño: 25 nm	*Zea mays*	Crecimiento, rendimiento y contenido de zinc de los granos de maíz	(Subbaiah et al., 2016)
2	Método verde	Tamaño: 1.2-6.8 nm Forma: Oblato esférica Estructura: Hexagonal	*Cyamopsis tetragonoloba L.*	Incremento en longitud del brote y la raíz, área de la raíz, biomasa seca, proteína soluble total, contenido de clorofila y	(Raliya & Tarafdar, 2013)

				concentración de P en la planta de frijol	
3	Comprado a Sigma-Aldrich	Tamaño: <50 nm Potencial Z: -7.63 Forma: Esférica irregular	*Zea mays L.* *Oryza sativa L.*	Toxicidad dependiente a concentraciones aplicadas 25-2000 mg/L. Las NPsZnO presentan mayor toxicidad en crecimiento de tallos que el ZnO a granel	(Yang et al., 2015)

Nota. Adaptado de *Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biosynthesis: Overview*, por Al Jabri et al., 2022, Life. (Recopilación de bibliografía)

CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

La investigación se ha desarrollado en 3 etapas principales. La primera etapa se subdivide tres actividades. La actividad 1 consiste en la síntesis de las nanopartículas de óxido de zinc mediante método químico para el cual se evalúan 2 factores temperatura y tiempo de calcinación, utilizando un diseño factorial, la actividad 2 consiste en el método verde en base al extracto de hoja de *Moringa oleífera*, se evalúan 3 factores principales, *ratio* g de *Moringa Oleifera*/g de nitrato de zinc, temperatura de calcinación y tiempo de calcinación, utilizando un diseño factorial 2^3, con 3 repeticiones para cada método y la actividad 3 consiste en la caracterización de las nanopartículas mediante espectroscopía UV-Vis, dispersión de luz dinámica (DLS) y microscopía electrónica de transmisión (TEM). En la segunda etapa de evalúa estadísticamente la influencia de los parámetros sobre las variables de respuesta tamaño de partícula y potencial zeta de las nanopartículas obtenidas. Y en la tercera etapa se propone un PFD de la síntesis de las nanopartículas de óxido de zinc a fin de evaluar la viabilidad preliminar de escalado del proceso de producción de estas nanopartículas a través de la síntesis verde.

A continuación, se presenta el listado de materiales, equipos a ser utilizados y el procedimiento metodológico a detalle.

3.1. Materiales

Hoja de *Moringa Oleifera*, nitrato de zinc hexahidratado 98.5% adquirido de *Spectrum* e hidróxido de potasio 85% de *Central Drug House* (P) Ltd.

Los materiales tales como vaso precipitado de 500 mL, probeta de 100 mL, pastillas magnéticas, embudo Buchner, papel filtro Whatman #40, parafilm, un matraz Kitasato, fiolas de 10 mL, micropipeta de 100 a 1000 µL, crisoles, jeringas de 20 mL, criotubos de 5 mL, mortero ágata, tamiz y malla 200. Todos los materiales eran de grado analítico y se utilizaron sin purificación adicional.

3.2. Equipos

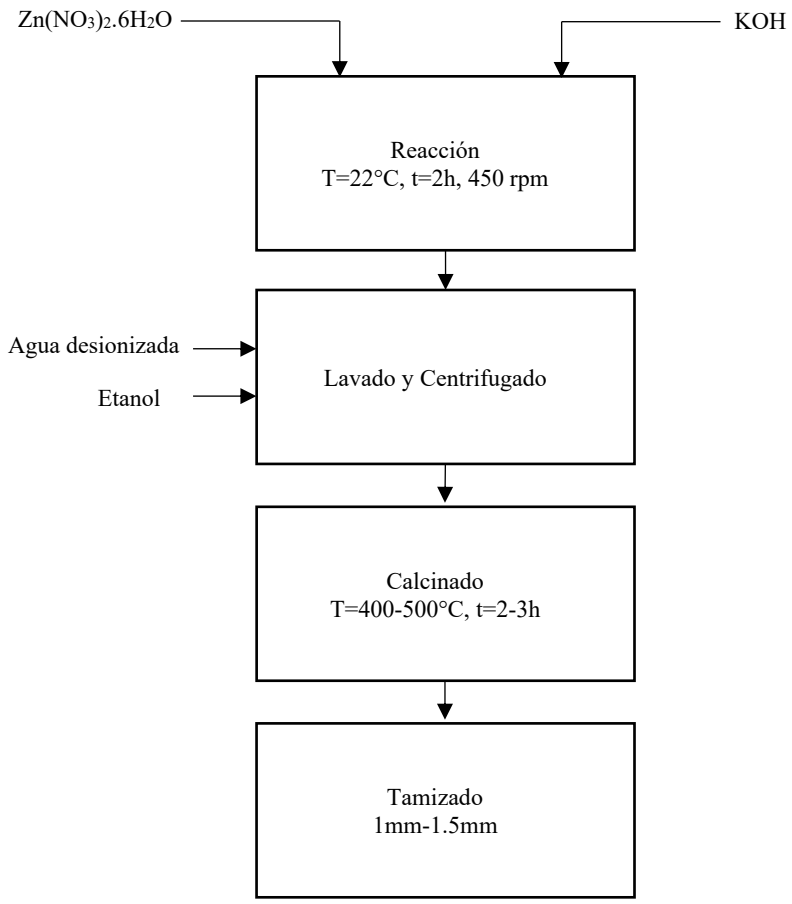
Los procesos de extracción y síntesis por ambos métodos se realizaron en un agitador magnético modelo MS-H280-Pro equipado con un sensor de temperatura, balanza analítica DP603N, además el agua ultrapura utilizada en el proceso se obtiene del equipo Purificador de agua ultrapura modelo *Simplicity* UV de la marca MILLIPORE WATER. La extracción de hoja de *Moringa Oleifera* necesita también una bomba de filtración al vacío GM-0.20. El secado y pretratamiento térmico se realiza en una estufa WHL-25AB, mientras que el tratamiento térmico se realiza en una mufla. Para la caracterización de las nanopartículas de ZnO se utilizaron los equipos Espectrofotómetro UV-VIS modelo LIBRA S22 de la marca Biochrom, agitador orbital vórtex MX-S. Todos ellos ubicados en los laboratorios del Centro de Investigaciones Tecnológicas Biomédica y Medioambientales (CITBM), ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM.

3.3. Etapa 1. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc

Actividad 1: Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc

Se sintetizaron nanopartículas de ZnO a partir de $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ como precursor de Zn y KOH como mineralizador alcalino, mediante la técnica química por el mecanismo de coprecipitación, reportadas por (Ghorbani et al., 2015) estableciendo un tiempo de reacción constante de 2 horas, los tiempos de lavado se ven especificados en la Tabla 19, y el procedimiento general empleado se muestra en el flujograma en la Figura 12.

Figura 12 Flujograma de la síntesis de nanopartículas de ZnO mediante el método químico



La producción teórica de nanopartículas de ZnO se rige por el mecanismo de reacción descrita en el apartado 3.3., la cual se desarrolla a continuación.

$$Zn(NO_3)_2.6H_2O + 2KOH \rightarrow Zn(OH)_2 + 2KNO_3 + 6H_2O \ldots (\boldsymbol{Ec.1})$$

$$Zn(OH)_2 \rightarrow ZnO + H_2O \ldots (\boldsymbol{Ec.2})$$

Ecuación global: $\mathbf{Zn(NO_3)_2.6H_2O + 2KOH \rightarrow ZnO + 2KNO_3 + 7H_2O}$

De la **Ec.1** se tienen los siguientes cálculos de termodinámica

- Entalpía de reacción $(\Delta_f H^\circ)$

$$\Delta_f H^\circ = \sum \Delta_f H^\circ_{Productos} - \sum \Delta_f H^\circ_{Reactivos}$$

Según los valores termodinámicos recopilados de Wagman et al. en 1982, se tiene que:

- $\Delta_f H^\circ \ \mathrm{Zn(NO_3)_2.6H_2O} = \ -2306.64 \ \frac{kJ}{mol}$
- $\Delta_f H^\circ \ \mathrm{KOH} = \ -424.764 \ \frac{kJ}{mol}$
- $\Delta_f H^\circ \ \mathrm{Zn(OH)_2} = \ -641.91 \ \frac{kJ}{mol}$
- $\Delta_f H^\circ \ \mathrm{KNO_3} = \ -494.63 \ \frac{kJ}{mol}$
- $\Delta_f H^\circ \ \mathrm{H_2O} = \ -285.83 \ \frac{kJ}{mol}$

Se reemplazan los valores para poder obtener el $\Delta_f H^\circ_{Ec.1}$

$$\Delta_f H^\circ_{Ec.1} = \left[\left(1 * \Delta_f H^\circ \ \mathrm{Zn(OH)_2}\right) + \left(2 * \Delta_f H^\circ \ \mathrm{KNO_3}\right) + \left(6 * \Delta_f H^\circ \ \mathrm{H_2O}\right)\right]$$

$$- \left[\left(1 * \Delta_f H^\circ \ \mathrm{Zn(NO_3)_2.6H_2O}\right) + \left(2 * \Delta_f H^\circ \ \mathrm{KOH}\right)\right]$$

$$\Delta_f H^\circ_{Ec.1} = -189.98 \ kJ$$

Los cálculos para determinar la energía libre de Gibbs ($\Delta_f G^\circ$) y la entropía de reacción (ΔS°) en la **Ec.1** se desarrollan de la misma manera. Se tienen los siguientes resultados:

$$\Delta_f G^\circ_{Ec.1} = \ -235.14 \ kJ$$

$$\Delta S^\circ_{Ec.1} = 152.06 \ \frac{J}{mol.K}$$

De igual manera se obtendrán los resultados para la **Ec.2**. Los resultados son los siguientes:

$$\Delta_f H^\circ_{Ec.2} = 7.8 \ kJ$$

$$\Delta_f G^\circ_{Ec.2} = \ -1.91 \ kJ$$

$$\Delta S^\circ_{Ec.2} = 32.35 \ \frac{J}{mol.K}$$

Finalmente, para la ecuación global, se tienen los siguientes resultados:

$$\Delta_f H^\circ_{Ec.Global} = -182.18 \ kJ$$

$$\Delta_f G^\circ_{Ec.Global} = \ -237.05 \ kJ$$

$$\Delta S^\circ_{Ec.Global} = 184.41 \ \frac{J}{mol.K}$$

Luego, se realizan los cálculos base para los compuestos $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ (0.2M) y KOH (0.4M), con un volumen de 50 mL para ambos.

$$\theta = \frac{m}{\bar{M} \times V}$$

- Para $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ (0.2M, 98.5%)

$$0.2 = \frac{m}{297.47 \times 0.05}$$

$$m_{Zn(NO_3)_2.6H_2O,teórico} = 2.9747\ g$$

Al 98.5% pureza:

$$m_{Zn(NO_3)_2.6H_2O,real} = 3.0200\ g$$

- Para KOH (0.4M, 85%)

$$0.4 = \frac{m}{56.11 \times 0.05}$$

$$m_{KOH,teórico} = 1.1222\ g$$

Al 85% pureza:

$$m_{KOH,real} = 1.3202\ g$$

Finalmente se calcula la masa de nanopartículas de ZnO producida teóricamente.

$$\rightarrow 1.1222 g KOH \times \frac{1 mol\ KOH}{56.11 g\ KOH} \times \frac{1\ mol\ ZnO}{2 mol\ KOH} \times \frac{81.38 g\ ZnO}{1 mol\ ZnO} = 0.8138\ g\ ZnO$$

Se planteó un diseño experimental del tipo Factorial Completo 2^2 (DFC). En este diseño las variables dependientes (temperatura y tiempo de calcinación) toman dos valores específicos (Tabla 9), la combinación de los valores cuantitativos de estas variables da un total de 4 tratamientos. Estos experimentos se realizarán por triplicado y se analizará la desviación estándar de los resultados obtenidos.

Tabla 9 Diseño experimental para la síntesis química de nanopartículas de ZnO

Orden de corrida	Temperatura[a] (°C)	Tiempo[b] (h)
1	400	2
2	400	3
3	500	2
4	500	3

Nota. [a]Temperatura de calcinación, [b]Tiempo de calcinación

Las muestras de nanopartículas de ZnO se almacenaron en tubos de muestra con tapa a temperatura ambiente. Además, se asignó un código a cada muestra para su posterior análisis (ver tabla 10).

Tabla 10 Código de muestra y formulación para nanopartículas de ZnO sintetizados por el método químico

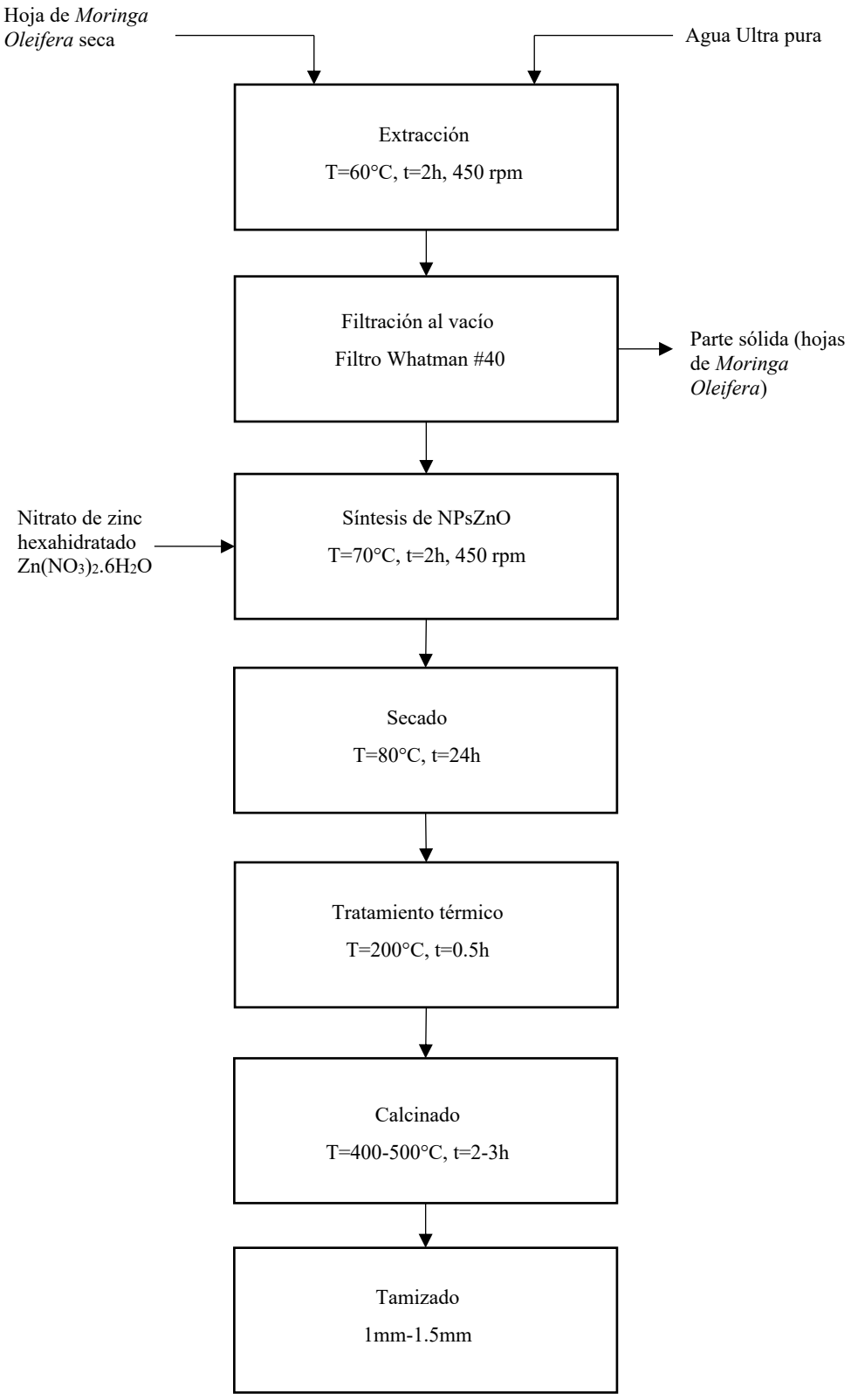
Muestra	Código	Temperatura[a] (°C)	Tiempo[b] (h)
NP ZnO 1	Q-1	400	2
NP ZnO 2	Q-2	400	3
NP ZnO 3	Q-3	500	2
NP ZnO 4	Q-4	500	3

Nota. [a]Temperatura de calcinación, [b]Tiempo de calcinación

Actividad 2: Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc

Se sintetizaron nanopartículas de ZnO a partir del extracto de hoja de *Moringa Oleifera* y de $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ como precursor de Zn, mediante la técnica verde a partir de plantas por el mecanismo de radicales libres, reportadas por (González-Fernández et al., 2022), la cual se muestra en el flujograma en la Figura 13.

Figura 13 Flujograma de la síntesis de nanopartículas de ZnO mediante el método verde



Se planteó un diseño experimental del tipo Factorial Completo 2^3 (DFC). En este diseño las variables dependientes (*ratio* másico hoja de *Moringa Oleifera*/$Zn(NO_3)_2.6H_2O$, temperatura y tiempo de calcinación) toman dos valores específicos (Tabla 11), la combinación de los valores cuantitativos de estas variables da un total de 8 tratamientos. Estos experimentos se realizarán por triplicado y se analizará la desviación estándar de los resultados obtenidos.

Tabla 11 Diseño experimental para la síntesis química de nanopartículas de ZnO

Orden de corrida	Relación másica[a]	Temperatura[b] (°C)	Tiempo[c] (h)
1	4	400	2
2	4	400	3
3	4	500	2
4	4	500	3
5	8	400	2
6	8	400	3
7	8	500	2
8	8	500	3

Nota. [a]Concentración másica de extracto de hoja de *Moringa Oleifera* basado en precursor (g hoja de *Moringa Oleifera*/g precursor), [b]Temperatura de calcinación, [c]Tiempo de calcinación

Las muestras de nanopartículas de ZnO se almacenaron en tubos de muestra con tapa a temperatura ambiente. Además, se asignó un código a cada muestra para su posterior análisis (ver Tabla 12).

Tabla 12 Código de muestra y formulación para nanopartículas de ZnO sintetizados por el método verde

Muestra	Código	Relación másica[a]	Temperatura[b]	Tiempo[c]
NP ZnO 1	V-1	4	400	2
NP ZnO 2	V-2	4	400	3
NP ZnO 3	V-3	4	500	2
NP ZnO 4	V-4	4	500	3
NP ZnO 5	V-5	8	400	2

NP ZnO 6	V-6	8	400	3
NP ZnO 7	V-7	8	500	2
NP ZnO 8	V-8	8	500	3

Nota. [a]Concentración másica de extracto de hoja de *Moringa Oleifera* basado en precursor (g hoja de *Moringa Oleifera*/g precursor), [b]Temperatura de calcinación, [c]Tiempo de calcinación

Actividad 3: Caracterización de las nanopartículas de óxido de zinc

La síntesis de nanopartículas se óxido de zinc se verificó a partir de la identificación del pico característico del material mediante espectroscopía UV-Visible utilizando un equipo de la marca BIOCHROM LIBRA S22, el cual fue configurado con los siguientes parámetros utilizando agua ultrapura como blanco:

- Longitud de onda entre 190 – 900 nm,
- Velocidad de escaneo: Slow
- Modo: Absorbancia

El análisis de tamaño y estabilidad de las nanopartículas de realizó en un equipo medidor de tamaño de partícula que utiliza la técnica *Dynamic Light Scattering* (DLS) de la marca ENTEGRIS NICOMP®, empleando los siguientes parámetros para el análisis de tamaño utilizando agua ultrapura como solvente de las nanopartículas:

- Temperatura: 23°C
- Viscosidad: 0.933 cP
- Índice de refracción: 1.333
- Diámetro mínimo: 10 nm
- Channel Width: 20.0 uSec
- Tiempo de lectura: 5 min

Mientras que, para el análisis de estabilidad coloidal de las nanopartículas que utiliza la técnica Dispersión de Luz de Análisis de Fases (PALS), se emplearon los siguientes parámetros:

- Temperatura: 23°C
- Viscosidad: 0.933 cP
- Índice de refracción: 1.333
- E-Field Strength: 10.00 V/cm
- Tiempo de lectura: 5 min

El análisis morfológico de las nanopartículas se realizó en un equipo TEM, Hitachi Regulus 8230, Hitachi HighTech Co., utilizando una señal electrónica secundaria y un voltaje de 3,0 kV. Además, se empleó un equipo TEM Thermo Fisher Scientific Talos F200X empleando un voltaje de 200 keV

3.4. Etapa 2. Tratamiento estadístico y selección de las nanopartículas de óxido de zinc

El tratamiento estadístico se llevará a cabo utilizando la desviación estándar para cada muestra. Así mismo, se evaluarán los valores promedio de las cantidades obtenidas en producción de nanopartículas de ZnO junto con sus características fisicoquímicas y se seleccionarán aquellas que presenten un mejor desempeño para su futura aplicación como nanofertilizante.

3.5. Etapa 3. Modelamiento de un PFD preliminar del proceso de obtención de nanopartículas de óxido de zinc por ambos métodos

Se realizará la simulación de los procesos de obtención de nanopartículas de ZnO según las rutas seleccionadas en la etapa anterior mediante el software *Aspen HYSYS V10*. Para ello se definirán las condiciones de operación de los equipos y la relación de cantidad de materia prima necesaria para cada método, según los valores óptimos de las variables establecidas en el apartado anterior. Asimismo, se tendrá en cuenta además un estudio de demanda en el mercado nacional, de modo que se establezcan valores de materia prima necesaria para satisfacer dicha demanda. Cabe mencionar que, puesto que este es un estudio

comparativo entre los métodos verde y químico, y al ser un estudio a nivel preliminar, no se estimarán valores concretos respecto a costos de materia prima e insumos; sin embargo, se definirán el número de equipos y los costos ambientales respecto a los efluentes de cada proceso.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Etapa 1. Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc

Actividad 1: Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc

Se prepararon soluciones de hidróxido de potasio 0.2 M y nitrato de zinc hexahidratado como agente precursor de zinc 0.4 M. La solución de hidróxido de potasio se agregó a la solución de zinc a temperatura ambiente con agitación constante de 450 rpm durante 2 horas, obteniéndose una suspensión de color blanco.

Figura 14 Síntesis de nanopartículas de ZnO por el método químico

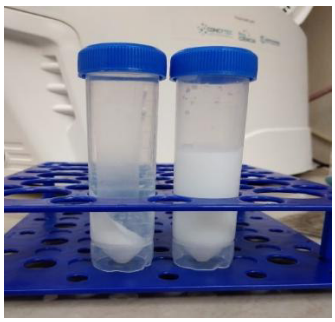


Esta suspensión fue sometida a centrifugación a 5000 rpm durante 20 min y luego de decantar el líquido, el precipitado se lavó tres veces con agua ultrapura y una vez con etanol 96%.

Figura 15 Centrifugación y lavado del producto de síntesis química de nanopartículas de ZnO



Centrifugación



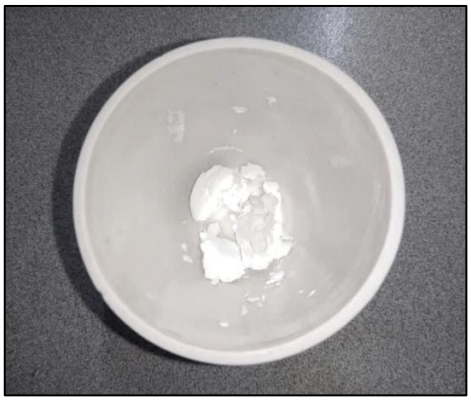
Decantado y lavado



Producto para tratamiento térmico

El producto del lavado se llevó a la mufla a una temperatura de 400 - 500°C, durante 2 - 3 horas. Como parte final del proceso, el producto obtenido se tamiza con una malla de 1mm-1.5mm. Se presenta la Figura 16, la cual es el producto final de la síntesis química luego del tratamiento térmico, como muestra representativa dado que el dado que el resto de las muestras con la codificación Q-1, Q-2, Q-3 fueron idénticos.

Figura 16 Producto final de síntesis química después del tratamiento térmico



La cantidad obtenida de nanopartículas de ZnO y el rendimiento del proceso para cada muestra se muestra en la Tabla 13 respecto a los cálculos teóricos de la sección 3.3.

Tabla 13 Cantidad obtenida promedio de nanopartículas de ZnO y el rendimiento del proceso por el método químico

Código	Producción de NP ZnO (g)	Rendimiento del proceso (%)
Q-1	0.6051	74.4
Q-2	0.6412	78.8
Q-3	0.6009	73.8
Q-4	0.5931	73.6

Actividad 2: Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc

Se sintetizaron las nanopartículas de ZnO a partir de extracto de hoja de *Moringa Oleifera* y nitrato de zinc hexahidratado $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ como precursor. El proceso se describe minuciosamente a continuación, siguiendo las cantidades y composiciones de los reactivos que se muestran en la Tabla 14.

- **Extracción de hoja de Moringa Oleifera**

Se realizó la extracción de los compuestos fenólicos pertenecientes a la hoja de *Moringa Oleifera* mediante la técnica convencional de extracción utilizando agua ultrapura a temperatura de 60°C durante 2 horas, con agitación continua de 450 rpm. La Figura 17 muestra esta etapa a concentraciones de 0.3 - 0.6 gL^{-1} respectivamente.

Figura 17 Extracción de compuestos fenólicos de hoja de *Moringa Oleífera*



El extracto obtenido fue filtrado en vacío empleando un embudo Buchner y un filtro Whatman #40 separando las hojas de la parte líquida. El producto líquido obtenido se utilizó directamente para la síntesis. Este se puede conservar refrigerándolo en un envase de plástico estéril a 4°C hasta por 2 días.

Figura 18 Filtración del extracto de hoja de *Moringa Oleífera*



- **Reacción de síntesis entre el agente precursor de Zn y extracto de *Moringa Oleifera***

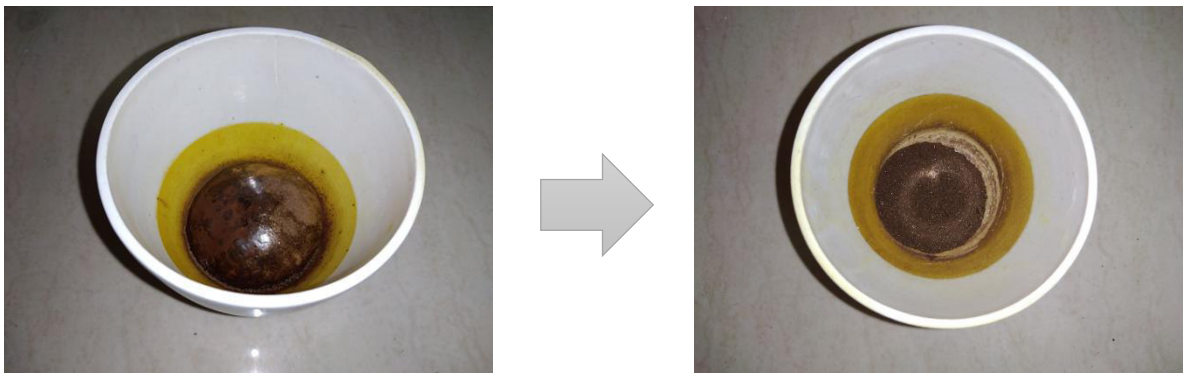
Un volumen del extracto será empleado para realizar la síntesis y se utilizará nitrato de zinc hexahidratado como agente precursor de Zn en *ratios* de 1:1 y 2:1, la Figura 19 muestra esta etapa a estos *ratios* respectivamente. Esta mezcla se lleva a 70°C durante 2 horas con una agitación de 450 rpm.

Figura 19 Síntesis de nanopartículas de ZnO por el método verde



Para el secado se prepararon múltiples crisoles con la síntesis. Estos son colocados junto con la tapa en un secador a 90°C durante la noche para eliminar la humedad presente, formando un *cupcake*.

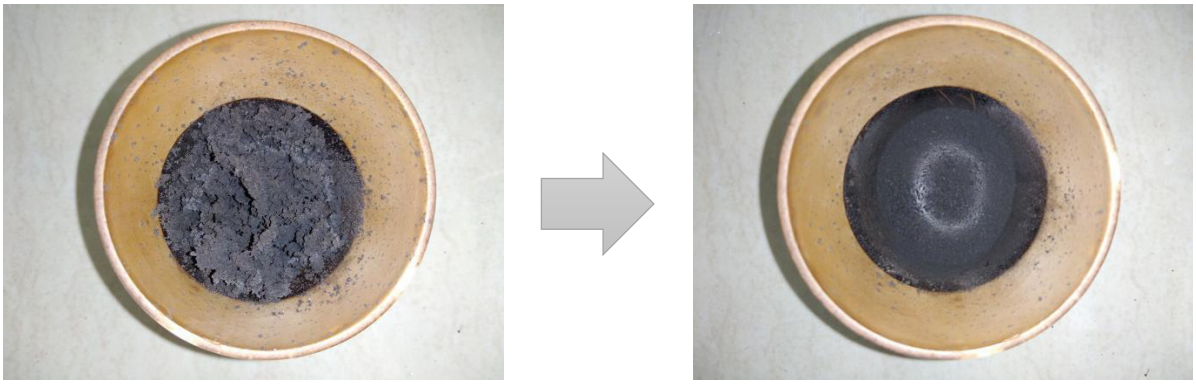
Figura 20 Producto de síntesis por el método verde después del secado



Producto del secado | Producto del secado pulverizado

Luego, pasaron a un pretratamiento térmico, para el cual los crisoles del secado fueron envueltos con papel aluminio y son colocados en el secador a 200°C durante 30 minutos.

Figura 21 Producto de síntesis por el método verde después del pretratamiento térmico



Producto del pretratamiento térmico

Producto del pretratamiento térmico pulverizado

Se continuó el tratamiento térmico de calcinación y para esto se retiró el aluminio y las tapas de los crisoles del pretratamiento y fueron llevados a la mufla a una temperatura de 400 - 500°C, durante 2 - 3 horas. Finalmente, el producto obtenido se tamizó con una malla de 1mm - 1.5mm. Se presenta la Figura 22, la cual es el producto final de la síntesis verde luego del tratamiento térmico, como muestra representativa dado que el resto de las muestras con la codificación V-1, V-2, V-3, V-4, V-5, V-6, V-7 fueron idénticos.

Figura 22 Producto final de síntesis por el método verde después del tratamiento térmico



La cantidad obtenida de nanopartículas de ZnO para cada muestra se muestra en la Tabla 15.

Tabla 14 Composición de los reactivos utilizados en la extracción del material biológico y la síntesis de nanopartículas de ZnO mediante el método verde

Código de muestra	Material biológico Hoja de *Moringa Oleifera* seca (g)	Agua ultrapura para la extracción (mL)	Alícuota utilizada para la síntesis (mL)	Precursor de Zn $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ 98.5% pureza (g)
V-1	6	200	50	1.5
V-2	6	200	50	1.5
V-3	6	200	50	1.5
V-4	6	200	50	1.5
V-5	12	200	50	1.5
V-6	12	200	50	1.5
V-7	12	200	50	1.5
V-8	12	200	50	1.5

Tabla 15 Cantidad obtenida promedio de nanopartículas de ZnO por el método verde

Código	Producción de NP ZnO (g)
V-1	0.4211
V-2	0.4736
V-3	0.4034
V-4	0.4457
V-5	0.5407
V-6	0.5528
V-7	0.5422
V-8	0.5459

Actividad 3: Caracterización de las nanopartículas de óxido de zinc

- **Longitud de onda característica de la nanopartícula**

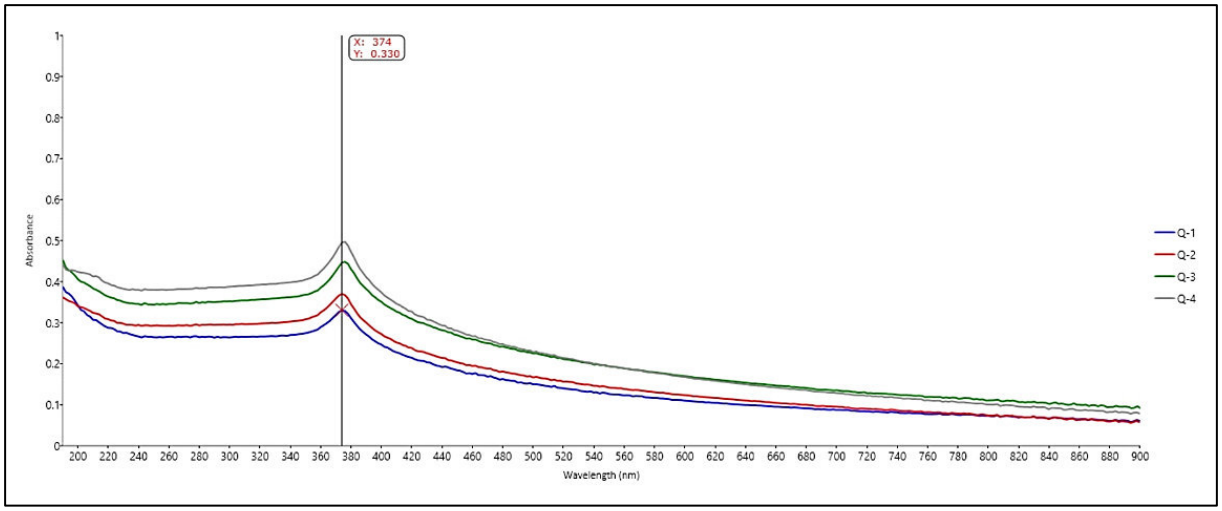
Espectroscopia UV-Visible

Para los experimentos mediante el método químico, los picos de absorción de las muestras Q-1 y Q-2 fueron de 372 nm, mientras que para las muestras Q-3 y Q-4 resultaron

en 374 nm (ver Figura 23). Estos valores se encuentran dentro del rango indicado para determinar la presencia de ZnO para la síntesis química por coprecipitación a partir de $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ y KOH (Ghorbani et al., 2015).

Además, la alta banda de absorción observada a 378 nm podría atribuirse a la absorción de banda prohibida inherente de ZnO causada por las transiciones de electrones de la banda de valencia (EV) a la banda de conducción (EC) (O_{2p}–Zn_{3d}) (Abdelbaky et al., 2022).

Figura 23 Picos de absorción característicos de nanopartículas de ZnO sintetizados por el método químico



Por otro lado, los experimentos mediante el método verde fueron evaluados en dos subgrupos, el primero conformado por V-1, V-2, V-3 y V-4 y el segundo por V-5, V-6, V-7 y V-8. Los picos de absorción del subgrupo 1 oscilan entre 356-364 nm (ver Figura 24), mientras que para las muestras del subgrupo 2 oscilan entre 348-356 nm (ver Figura 25). Estos valores se encuentran dentro del rango indicado para determinar la presencia de ZnO reportada para la síntesis verde a partir de extracto de hoja de *Moringa Oleifera* (Letsholathebe et al., 2019).

Se puede apreciar que, para ambos métodos químico y verde, no se registran otros picos en el espectro, esto significaría que las nanopartículas de ZnO sintetizadas son un producto puro (Abdelbaky et al., 2022).

Figura 24 Picos de absorción característicos de nanopartículas de ZnO sintetizados por el método verde - subgrupo 1

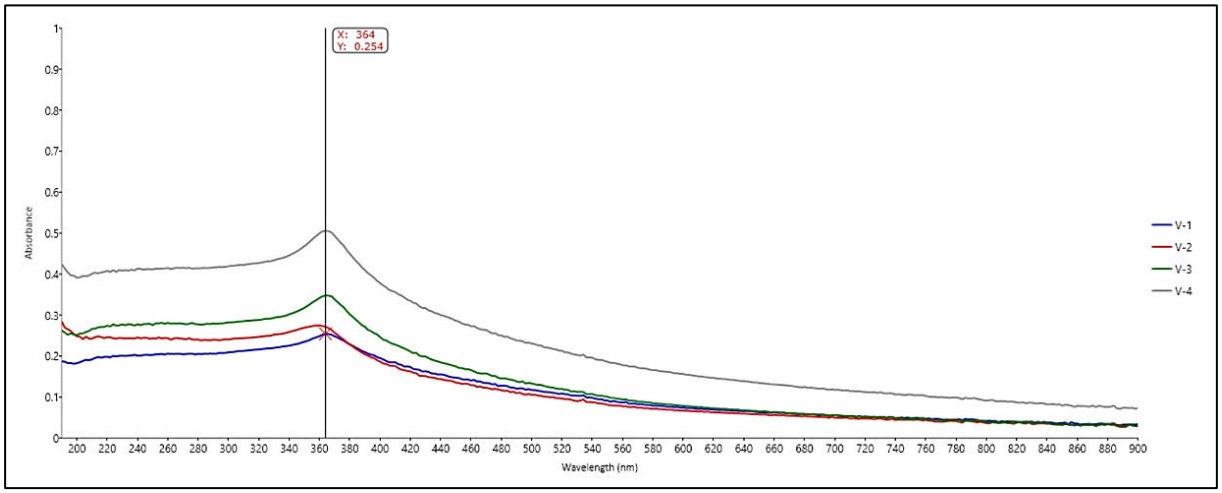
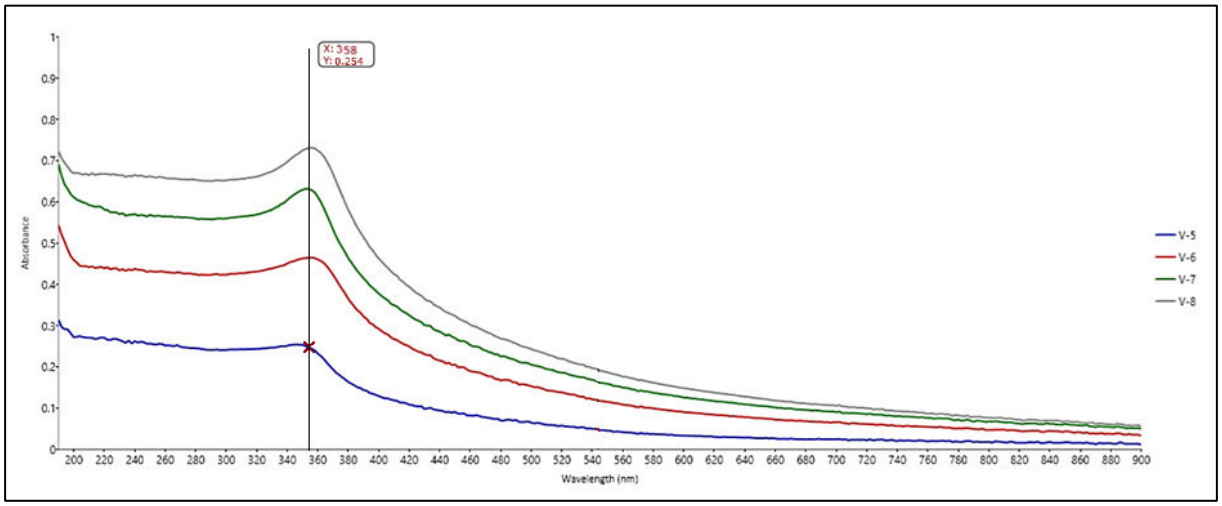


Figura 25 Picos de absorción característicos de nanopartículas de ZnO sintetizados por el método verde – subgrupo 2



- **Tamaño hidrodinámico de nanopartícula**

Dispersión De Luz Dinámica (DLS)

La técnica de Dispersión de Luz Dinámica produce valores de tamaño de partícula significativamente más altos en comparación a los análisis que se realizan según la técnica TEM, esto es originado gracias a la capa hidrodinámica, la cual se encuentra influenciada tanto por la forma y estructura de la partícula (Abdelbaky et al., 2022).

Los resultados de tamaño de partícula obtenidos mediante síntesis química se encuentran en un rango entre 21.6 y 62.4 nm, y varían de forma directamente proporcional en función a la temperatura y el tiempo de calcinación. El aumento del tamaño de grano al aumentar la temperatura de recocido se puede atribuir al proceso de fusión inducido debido al recocido térmico, basado en la coalescencia de los granos durante la calcinación que a su vez resultó en la fusión de defectos de Zn u O en los límites de los granos en altas temperaturas. (Arya et al., 2021).

Respecto a los resultados de tamaño de partícula obtenidos mediante síntesis verde, estos se encuentran en un rango entre 16.2 y 39.4 nm, y varían directamente proporcional en función a la temperatura y el tiempo de calcinación, de forma similar a las NPsZnO obtenidas por método químico. Sin embargo, el rango de tamaño de partícula obtenidas para el método verde es inferior al rango obtenido para las NPsZnO sintetizadas por método químico, esto se atribuye a los compuestos biológicos presentes en la hoja de *Moringa oleífera*, que proporciona un agente de recubrimiento en las NPsZnO (Matinise et al., 2017), regulando la aglomeración de estas.

Por otro lado, se observa también que varían de forma directamente proporcional en función al *ratio* hoja de *Moringa oleífera*/precursor. Esta aglomeración de las nanopartículas respecto a la concentración del precursor podría deberse a la polaridad y la atracción electrostática de las nanopartículas de ZnO sintetizadas biológicamente (Kaningini et al., 2022)

Los resultados puntuales de tamaño de partícula de las NPsZnO para los métodos químico y verde se indican en las Tablas 16 y 17, respectivamente. Asimismo, la distribución de tamaño de partícula mediante DLS para ambos métodos se aprecia en el apéndice 3.

- **Potencial Z**

Dispersión de Luz de Análisis de Fases (PALS)

Las cargas superficiales y la estabilidad coloidal de las NPsZnO biosintetizadas se evaluaron mediante la dispersión de luz de análisis de fases. Los resultados puntuales del potencial Z de las nanopartículas por fase se indican en las Tablas 16 y 17.

Estos muestran que el potencial Z de las nanopartículas sintetizadas por el método químico son cargas positivas en todos los casos, mientras que las sintetizadas por el método verde son negativas. En el caso del método químico se da gracias a la variación del pH (Andrea et al., 2021). Para el método verde, esto surge debido a los agentes reductores (componentes fenólicos y flavonoides) que se encuentran en el extracto de hojas de *Moringa Oleifera*. También confirma que la sustancia producida contiene fuerzas electrostáticas sustanciales (Abdelbaky et al., 2022).

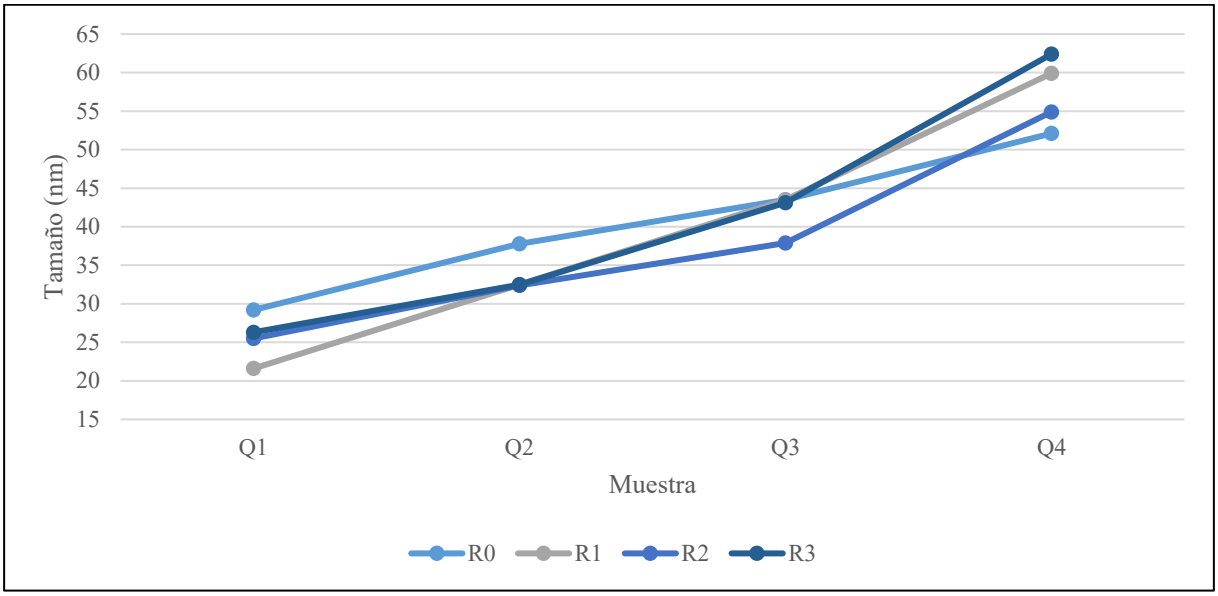
Tabla 16 Resultados de caracterización de tamaño de partículas (DLS) y Potencial Z (PALS) de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico

Código de muestra	Tamaño de partícula (nm)	Potencial Z – Fase (mV)
Q1	29.2	18.03
Q2	37.8	26.92
Q3	43.5	6.19
Q4	52.1	26.8
R1-Q1	21.6	20.95
R1-Q2	32.5	29.18
R1-Q3	43.5	19.05
R1-Q4	59.9	18.58
R2-Q1	25.5	17.35
R2-Q2	32.4	24.88
R2-Q3	37.9	18.01
R2-Q4	54.9	23.59
R3-Q1	26.3	29.34
R3-Q2	32.5	14.96

R3-Q3	43.1	20.38
R3-Q4	62.4	10.17

En la Figura 26 se observa cierta tendencia a aumentar el tamaño de nanopartícula al trabajar con una mayor temperatura y tiempo de calcinación.

Figura 26 Resultados del tamaño de NPsZnO sintetizadas por el método químico



La Figura 27 muestra la tendencia del Potencial Z a aumentar cuando se trabaja con una mayor temperatura y tiempo de calcinación.

Figura 27 Resultados de Potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método químico

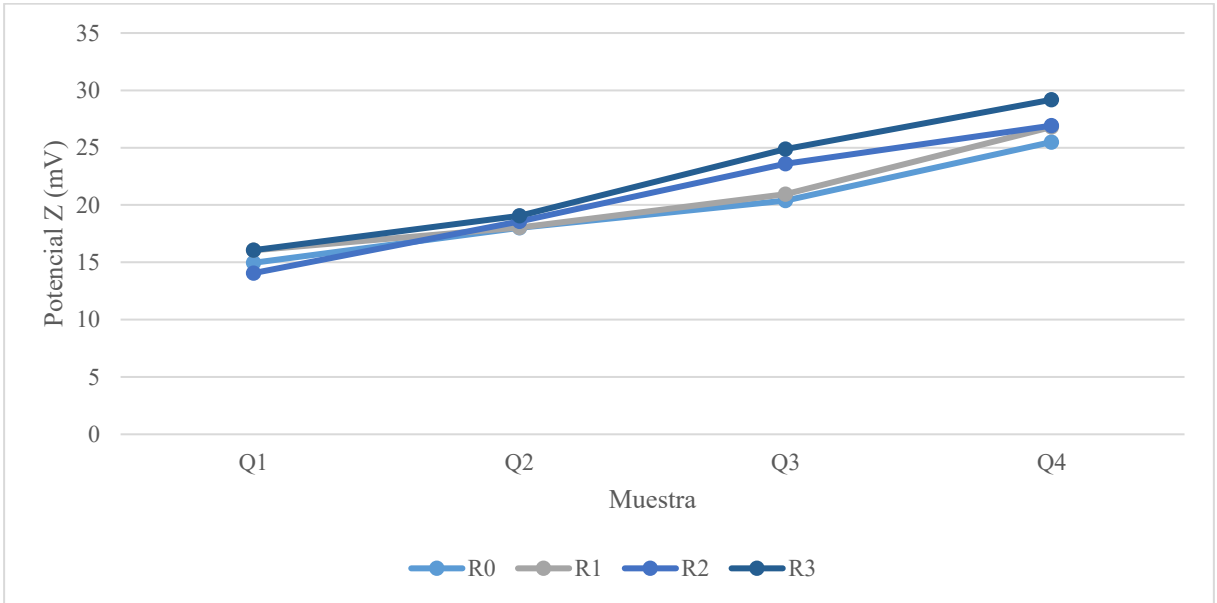


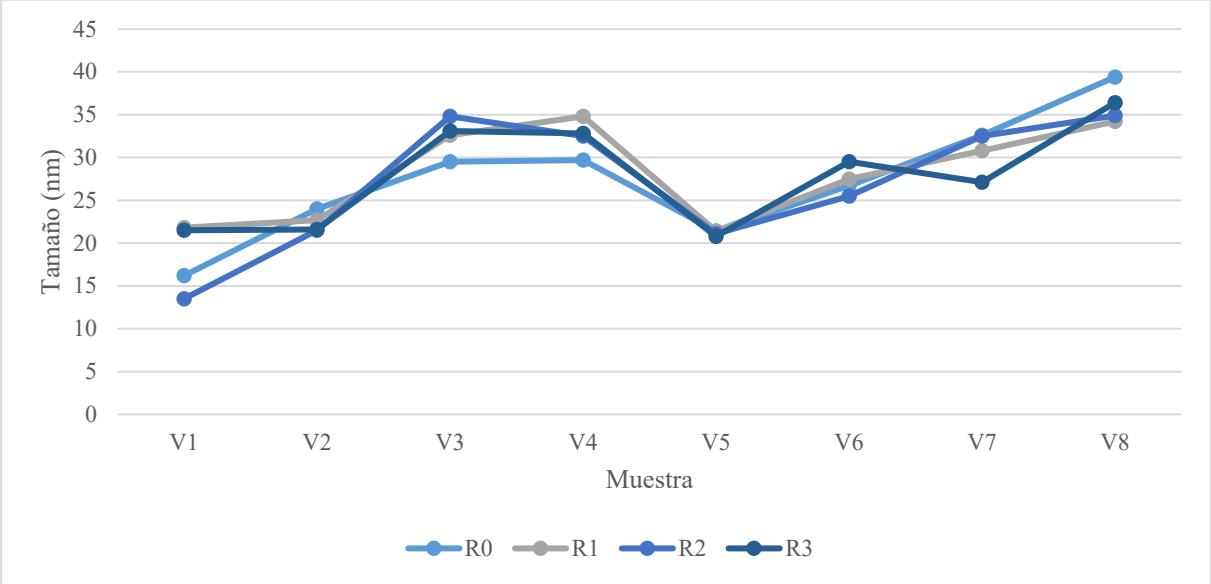
Tabla 17 Resultados de caracterización de tamaño de partículas (DLS) y Potencial Z (PALS) de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde

Código de muestra	Tamaño de partícula (nm)	Potencial Z – Fase (mV)
V1	16.2	-12.79
V2	24	-13.42
V3	29.5	-14.6
V4	29.7	-16.45
V5	21.4	-17
V6	26.7	-18.82
V7	32.6	-19.16
V8	39.4	-19.75
R1-V1	21.8	-11.21
R1-V2	22.7	-12.25
R1-V3	32.6	-12.94
R1-V4	34.8	-14.35
R1-V5	21.4	-15.17
R1-V6	27.5	-16.85
R1-V7	30.8	-16.92
R1-V8	34.2	-17.47
R2-V1	13.5	-13.56
R2-V2	21.5	-13.98
R2-V3	34.8	-14.89
R2-V4	32.5	-16.7
R2-V5	21.1	-17.7
R2-V6	25.5	-18.07
R2-V7	32.5	-18.37
R2-V8	34.9	-19.24
R3-V1	21.5	-11.23
R3-V2	21.6	-12.98
R3-V3	33.1	-13.45
R3-V4	32.8	-15.25
R3-V5	20.8	-15.46
R3-V6	29.5	-17.45

R3-V7	27.1	-17.64
R3-V8	36.4	-18.25

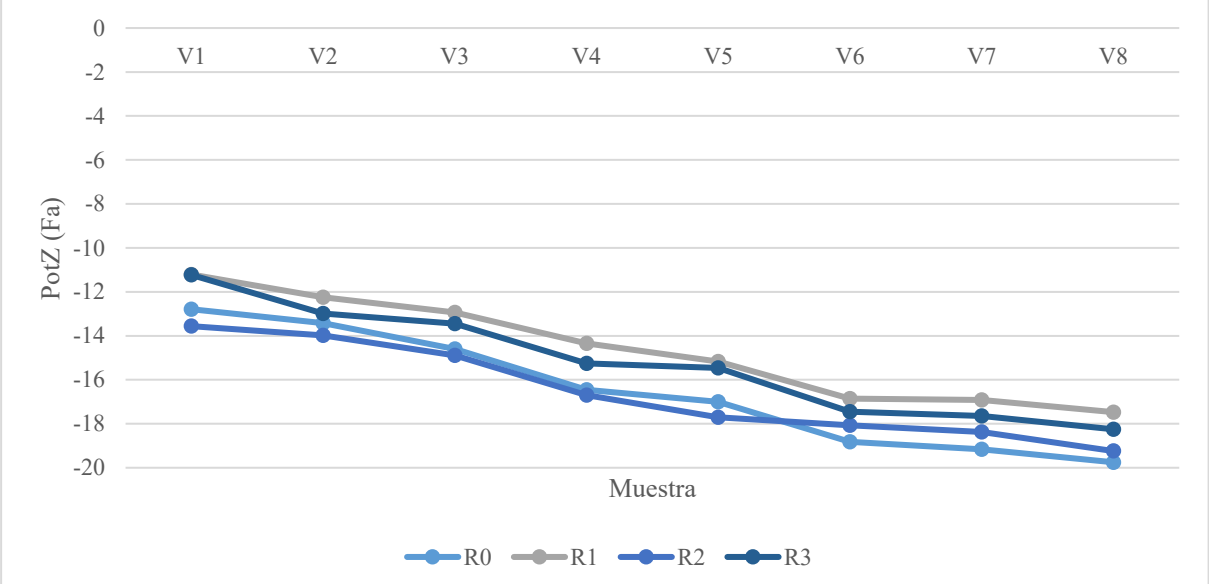
En la Figura 28 se observa cierta tendencia a aumentar el tamaño de nanopartícula al trabajar con una mayor temperatura y tiempo de calcinación.

Figura 28 Resultados del tamaño de NPsZnO sintetizadas por el método verde



La Figura 29 muestra la tendencia del Potencial Z a aumentar cuando se trabaja con una mayor temperatura y tiempo de calcinación.

Figura 29 Resultados de Potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método verde



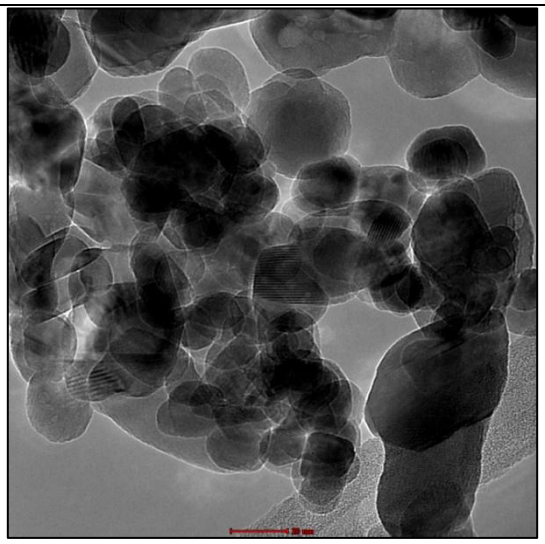
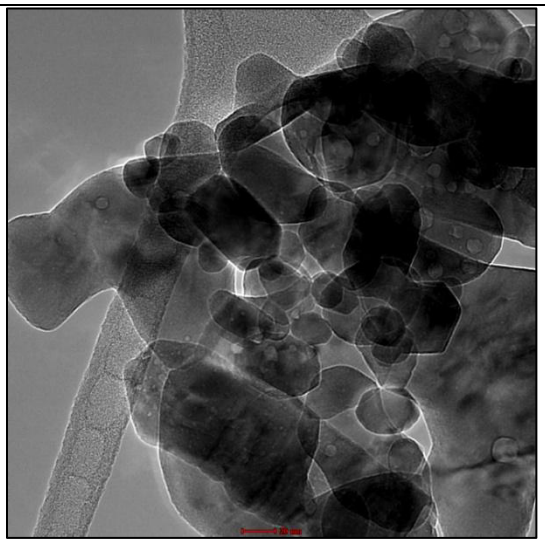
- **Morfología de la nanopartícula de óxido de zinc**

Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Gracias al apoyo de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA (UNSA) y su centro de microscopía se tomaron imágenes TEM con dimensiones de escala mostradas de 5 y 20 nm para examinar la forma y tamaño de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por los métodos químico y verde, las muestras representativas seleccionadas fueron Q-1, Q-4, V-1, V-4, V-5 y V-8 dado que se buscó evaluar el tamaño obtenido según las condiciones de operación de temperatura de calcinación y tiempo de calcinación. Los valores de temperatura se encuentran entre los 400 y 500°C, mientras que los valores de tiempo se encuentran entre las 2 y 3 horas.

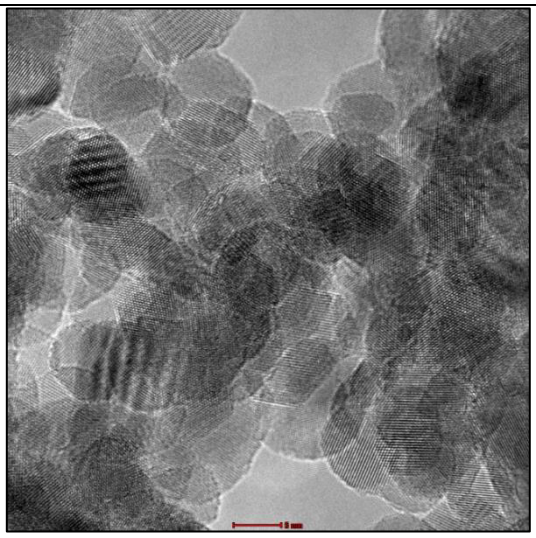
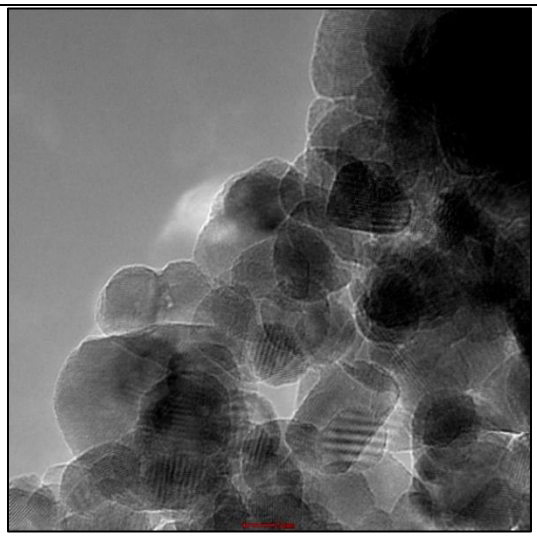
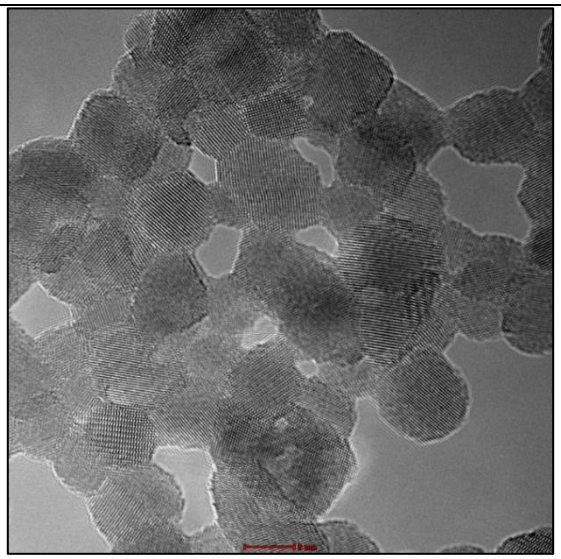
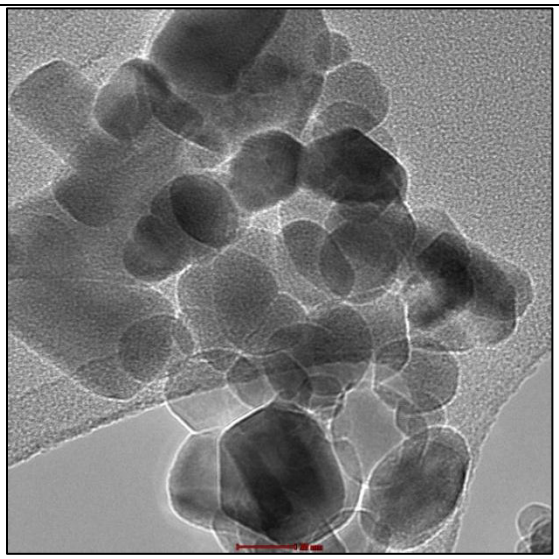
Las nanopartículas sintetizadas por el método químico se presentan en forma esférica. Se puede apreciar también una aglomeración de estas, puesto que al estar sometidas a tratamiento térmico a altas temperaturas las nanopartículas de pequeño tamaño se fusionan formando nanopartículas más grandes (Giorgio, 2024). La Figura 30 muestra los resultados obtenidos mediante la síntesis por el método químico.

Figura 30 Micrografia TEM de las NPsZnO sintetizadas por método químico

	
Muestra NPsZnO Q1	Muestra NPsZnO Q4

Por otro lado, la forma de las nanopartículas sintetizadas por el método verde fue esférica en todos los casos. Donde, las variaciones en el tamaño de la forma de NPsZnO a partir del aumento de la concentración de precursor se pueden atribuir a la reducción de la reorganización de las nanopartículas y la disminución de su homogeneidad (Kaningini et al., 2022). La Figura 31 muestra los resultados obtenidos mediante la síntesis por el método verde.

Figura 31 Micrografía TEM de las NPsZnO sintetizadas por método verde

	
Muestra NPsZnO V1	Muestra NPsZnO Q4
	
Muestra NPsZnO Q5	Muestra NPsZnO Q8

4.2. Etapa 2. Tratamiento estadístico y selección de las nanopartículas de óxido de zinc

Se evaluarán los resultados obtenidos de tamaño hidrodinámico y potencial Z de las nanopartículas sintetizadas mediante ambos métodos. Los resultados obtenidos mediante las mediciones realizadas por UV-Vis no refleja de manera directa la funcionalidad de la nanopartícula, mientras que el TEM indica la forma de la nanopartícula, siendo esta información principalmente cualitativa. Por estas razones no se consideraron dentro del tratamiento estadístico dado que la funcionalidad de la nanopartícula depende más de su tamaño y estabilidad.

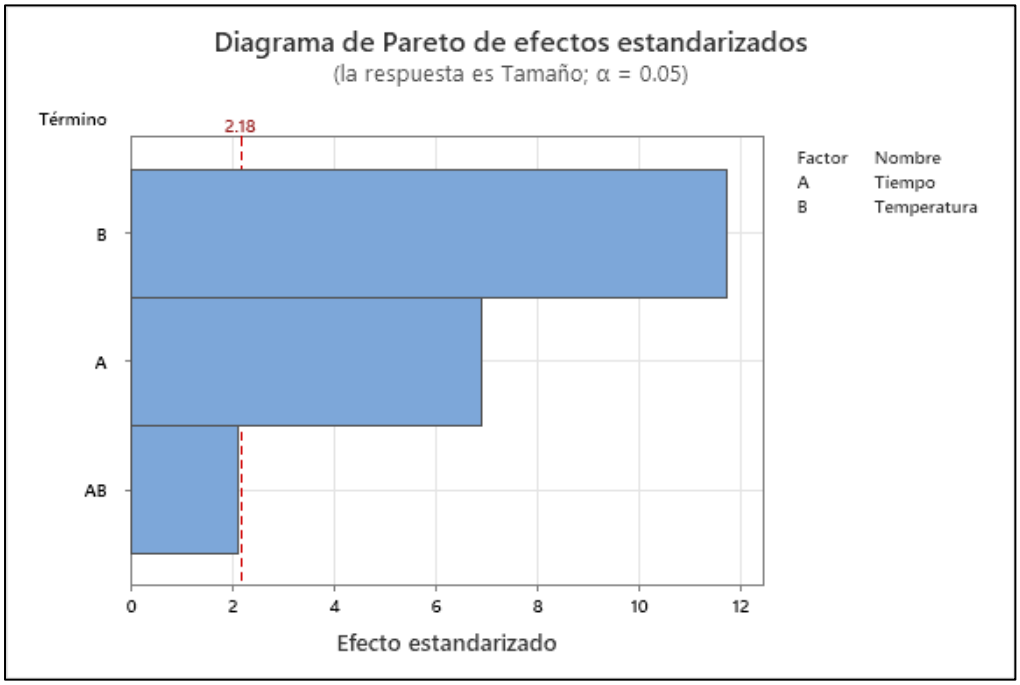
- **Análisis del diseño del tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO**

Los datos del tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO que se obtuvieron mediante el método químico fueron ingresados al software Minitab 21 y se utilizó un análisis factorial. Los análisis estadísticos de los datos experimentales de realizaron con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 18 Análisis de Varianza – Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	2192.57	730.86	63.15	0.000
Lineal	2	2141.09	1070.55	92.50	0.000
Tiempo	1	551.08	551.08	47.62	0.000
Temperatura	1	1590.02	1590.02	137.39	0.000
Interacciones de 2 términos	1	51.48	51.48	4.45	0.057
Tiempo*Temperatura	1	51.48	51.48	4.45	0.057
Error	12	138.88	11.57		
Total	15	2331.45			
R-cuadrado: 94.04%					
R-cuadrado(ajustado): 92.55%					

Figura 32 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico



De la Tabla 18 se puede afirmar que el tiempo y la temperatura de calcinación presentan un efecto significativo en el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método químico dado que el valor p obtenido es menor al nivel de significancia admitido ($p < 0.05$). La Figura 32 muestra que los factores que sobrepasan el nivel de referencia son el tiempo y la temperatura, siendo el tiempo el que presenta el mayor impacto sobre el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas. Así mismo, la interacción de los factores de tiempo y temperatura no llega a ser significativo dado que su valor p obtenido es mayor al nivel de significancia permitido ($p > 0.05$).

El valor de R^2 es cercano al 100%, lo cual indica un ajuste lineal ideal. En el caso que este valor se encuentre muy alejado del 100%, indicaría la no representatividad del modelo lineal (Rodríguez, 2005).

Con los factores mencionados anteriormente, se tiene la siguiente ecuación:

$$\textbf{Tamaño de partícula} = 1.3 - 20.5\,t + 0.0200\,T + 0.0717\,t \times T$$

Donde:

- t: Tiempo (horas)
- T: Temperatura (°C)

Por último, se realizaron las pruebas de Durbin-Watson, Anderson Darling y Grubbs localizadas en el Apéndice 2. El tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO por el método químico evidenció que los datos no están correlacionados entre sí, siguen una distribución normal y no presentan valores atípicos.

Figura 33 Gráfica de contorno de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico

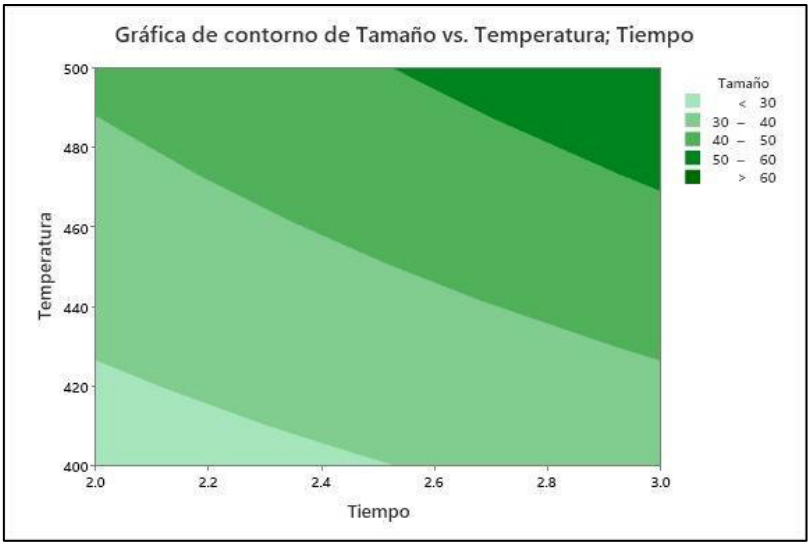
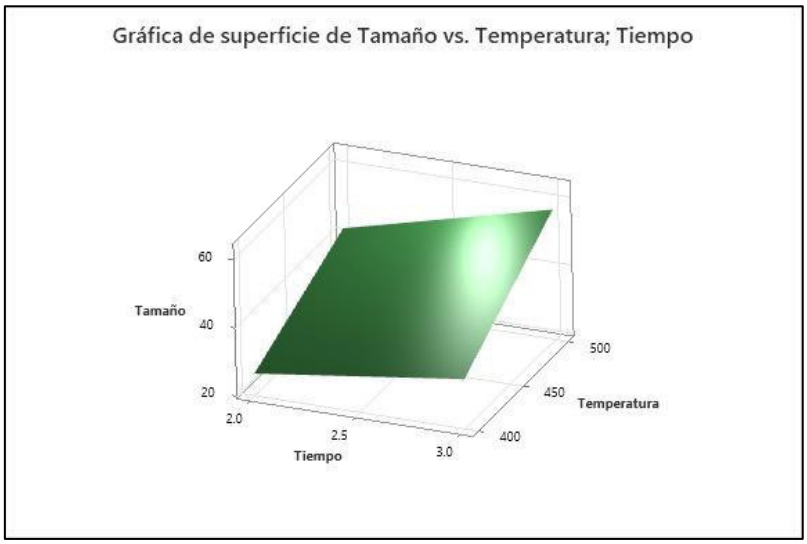


Figura 34 Gráfica de superficie de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico



Las Figuras 33 y 34 representan la gráfica de contorno y la gráfica de superficie de respuesta respectivamente obtenido mediante el software Minitab 21, las cuales muestran la relación que existe entre la temperatura y el tiempo de calcinación (variables independientes) y el tamaño hidrodinámico de la nanopartícula sintetizada por el método químico (variable dependiente). Se observa que las condiciones de menor tamaño hidrodinámico se encuentran a una temperatura de calcinación de 400°C y tiempo de calcinación de 2h. La Figura 35 muestra la optimización del tamaño hidrodinámico mínimo de las nanopartículas de Óxido de Zinc el cual es 25.65 nm.

Figura 35 Optimización del tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas por el método químico

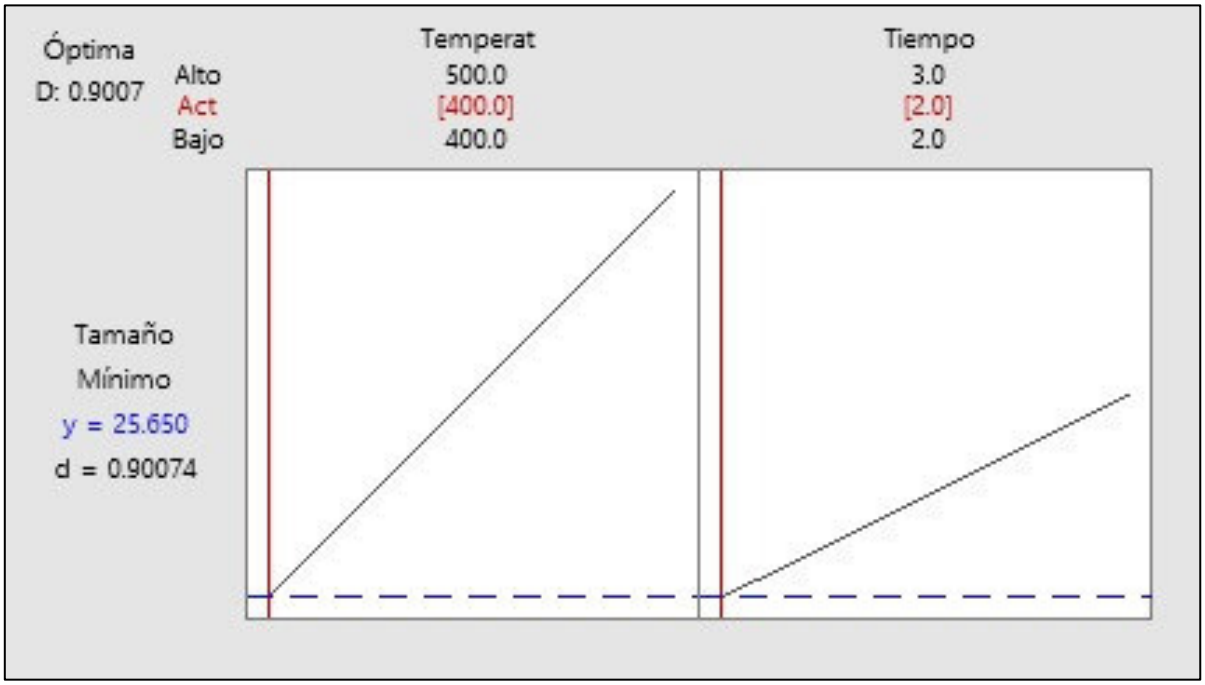
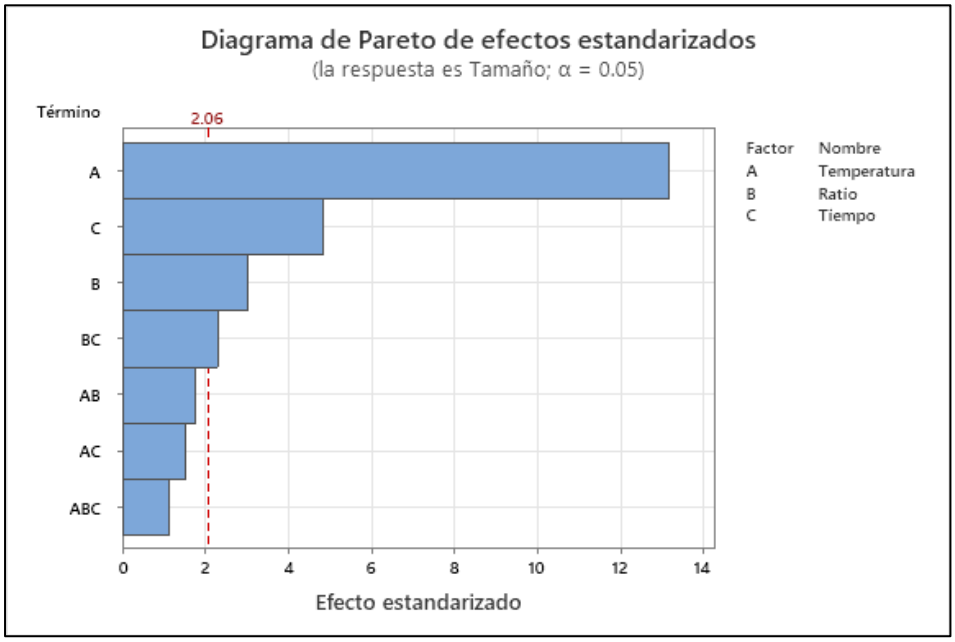


Tabla 19 Análisis de Varianza – Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	1148.60	164.086	31.16	0.000
Lineal	3	1085.83	361.944	68.73	0.000
Temperatura	1	913.78	913.781	173.51	0.000

Ratio	1	48.02	48.020	9.12	0.006
Tiempo	1	124.03	124.031	23.55	0.000
Interacciones de 2 términos	3	56.29	18.762	3.56	0.029
Temperatura*Ratio	1	16.53	16.531	3.14	0.089
Temperatura*Tiempo	1	12.00	12.005	2.28	0.144
Ratio*Tiempo	1	27.75	27.751	5.27	0.031
Interacciones de 3 términos	1	6.48	6.480	1.23	0.278
Temperatura*Ratio*Tiempo	1	6.48	6.480	1.23	0.278
Error	24	126.39	5.266		
Total	31	1274.99			
R-cuadrado: 90.09%					
R-cuadrado(ajustado): 87.20%					

Figura 36 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde



De la Tabla 19 se puede afirmar que el *ratio*, el tiempo y la temperatura de calcinación presentan un efecto significativo en el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método verde dado que el valor p obtenido es menor al nivel de significancia admitido ($p < 0.05$). La Figura 36 muestra que los factores que sobrepasan el

nivel de referencia son el tiempo y la temperatura y el *ratio*, siendo la temperatura el que presenta el mayor impacto sobre el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas.

El valor de R^2 es cercano al 100%, lo cual indica un ajuste lineal ideal. En el caso que este valor se encuentre muy alejado del 100%, indicaría la no representatividad del modelo lineal. (Rodríguez, 2005)

Con los factores mencionados anteriormente, se tiene la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Tamaño = -127.7 + 0.346\,T + 7.76R + 33.7t - 0.0198\,T*R - 0.0785\,T*t - 2.08\,R*t + 0.006\,T*R*t}$$

Donde:

- $t: Tiempo\ (horas)$
- $T: Temperatura\ (°C)$
- $R: Ratio$

Por último, se realizaron las pruebas de Durbin-Watson, Anderson Darling y Grubbs localizadas en el Apéndice 2. El tamaño hidrodinámico de las nanopartículas de ZnO por el método químico evidenciaron que los datos no están correlacionados entre sí, siguen una distribución normal y no presentan valores atípicos.

Figura 37 Gráfica de contorno de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método verde

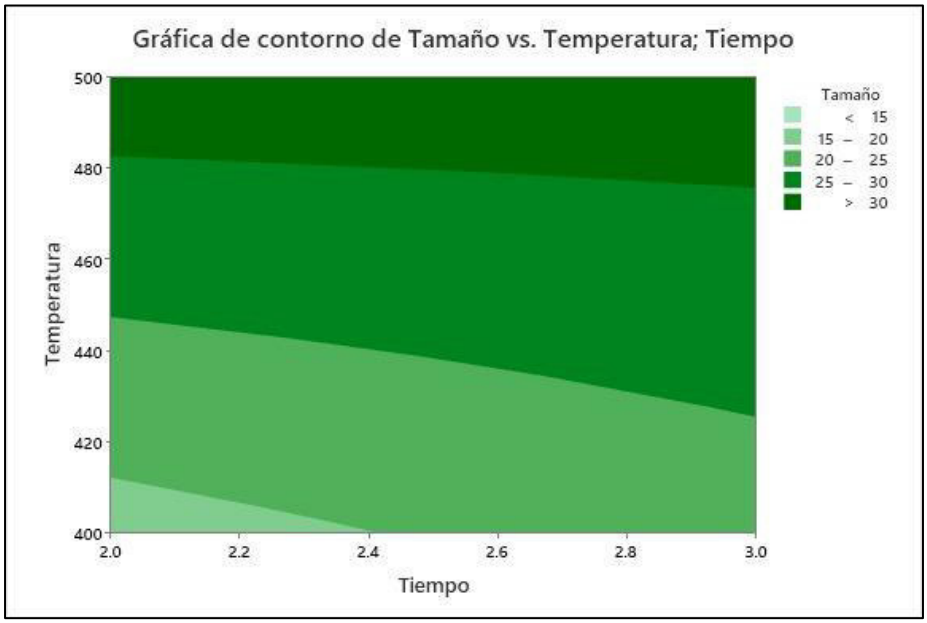
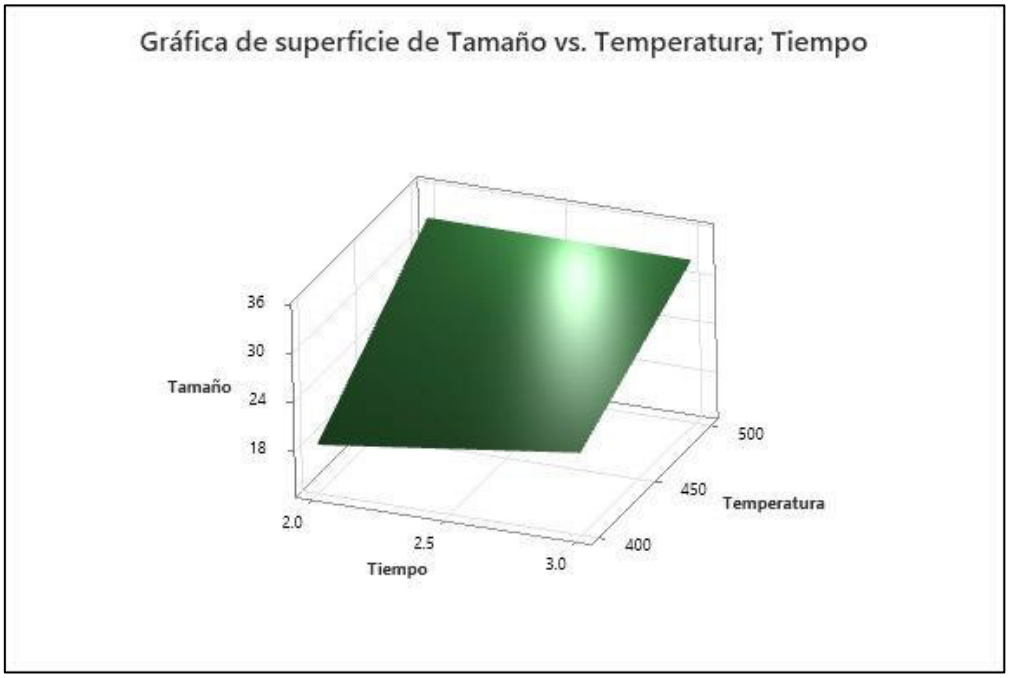
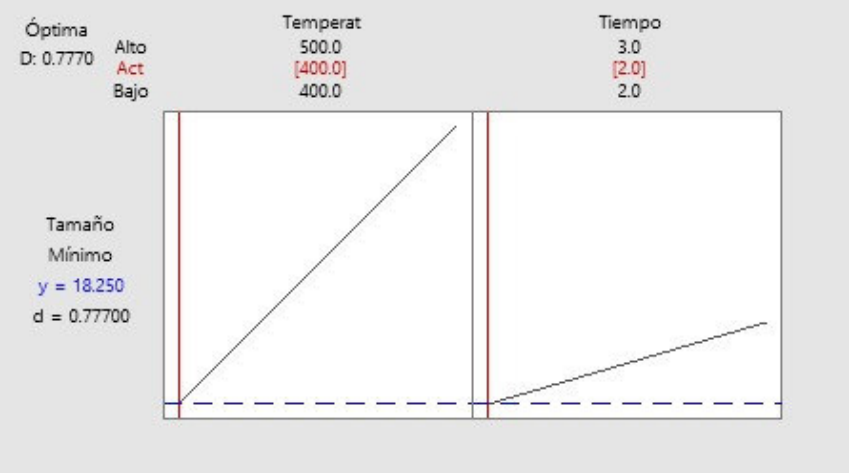


Figura 38 Gráfica de superficie de tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas mediante el método verde



Las Figuras 37 y 38 representan la gráfica de contorno y la gráfica de superficie de respuesta respectivamente obtenidos mediante el software Minitab 21. Se fijó el *ratio* a 4 y se muestra la relación que existe entre la temperatura y el tiempo de calcinación (variables independientes) y el tamaño hidrodinámico de la nanopartícula sintetizada por el método verde (variable dependiente). Se observa que las condiciones de menor tamaño hidrodinámico se encuentran a una temperatura de calcinación de 400°C y tiempo de calcinación de 2h. La Figura 39 muestra la optimización del tamaño hidrodinámico mínimo de las nanopartículas de óxido de zinc el cual es 18.25 nm.

Figura 39 Optimización del tamaño hidrodinámico de las NPsZnO sintetizadas por el método verde



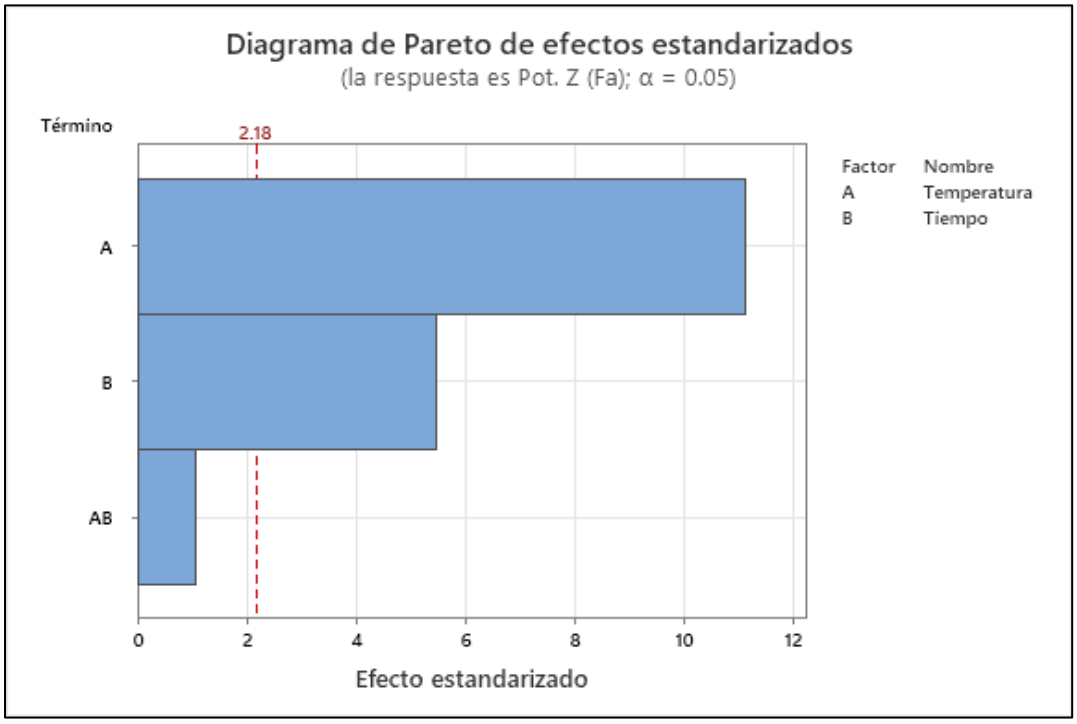
- **Análisis del diseño del Potencial Z de las nanopartículas de ZnO**

Los datos del potencial Z de las nanopartículas de ZnO que se obtuvieron mediante el método químico fueron ingresados al software Minitab 21 y se utilizó un análisis factorial. Los análisis estadísticos de los datos experimentales de realizaron con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 20 Análisis de Varianza – Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	2314.094	104.698	51.68	0.000
Lineal	2	311.791	155.896	76.96	0.000
Temperatura	1	251.302	251.302	124.05	0.000
Tiempo	1	60.490	60.490	29.86	0.000
Interacciones de 2 términos	1	2.303	2.303	1.14	0.307
Temperatura*Tiempo	1	2.303	2.303	1.14	0.307
Error	12	24.309	2.026		
Total	15	338.402			
R-cuadrado: 92.82%					
R-cuadrado(ajustado): 91.02%					

Figura 40 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico



De la Tabla 20 se puede afirmar que la temperatura y el tiempo de calcinación presentan un efecto significativo en el potencial Z de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método químico dado que el valor p obtenido es menor al nivel de significancia admitido ($p < 0.05$). La Figura 40 muestra que los factores que pasan el nivel de referencia son la temperatura y el tiempo de calcinación, siendo estos lo que presenta el mayor impacto sobre el potencial Z de las nanopartículas. Así mismo, la interacción de los factores de tiempo y temperatura no llegan a ser significativo dado que su valor p obtenido es mayor al nivel de significancia permitido ($p > 0.05$).

El valor de R^2 es cercano al 100%, lo cual indica un ajuste lineal ideal. En el caso que este valor se encuentre muy alejado del 100%, indicaría la no representatividad del modelo lineal. (Rodríguez, 2005)

Con los factores mencionados anteriormente, se tiene la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Pot\ Z = -7.5 + 0.0413\ T - 2.94\ t + 0.0152\ T \times t}$$

Donde:

- t: Tiempo (horas)
- T: Temperatura (°C)

Por último, se realizaron las pruebas de Durbin-Watson, Anderson Darling y Grubbs localizadas en el Apéndice 2. El potencial Z de las nanopartículas de ZnO por el método químico evidenciaron que los datos no están correlacionados entre sí, siguen una distribución normal y no presentan valores atípicos.

Figura 41 Gráfica de contorno del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico

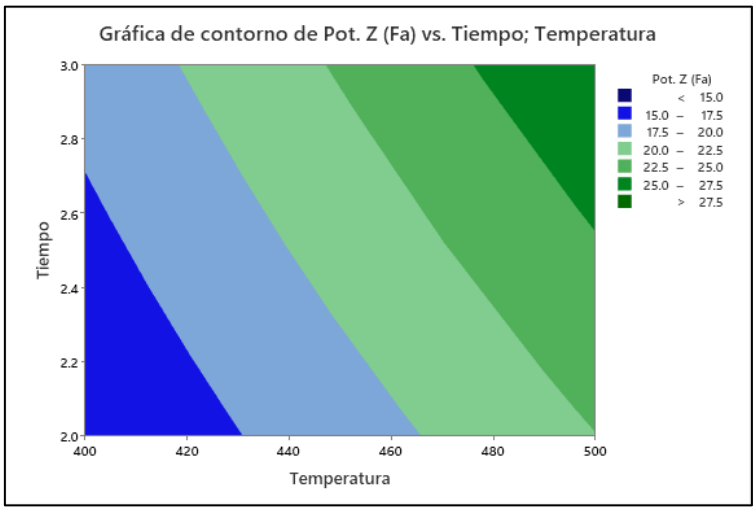
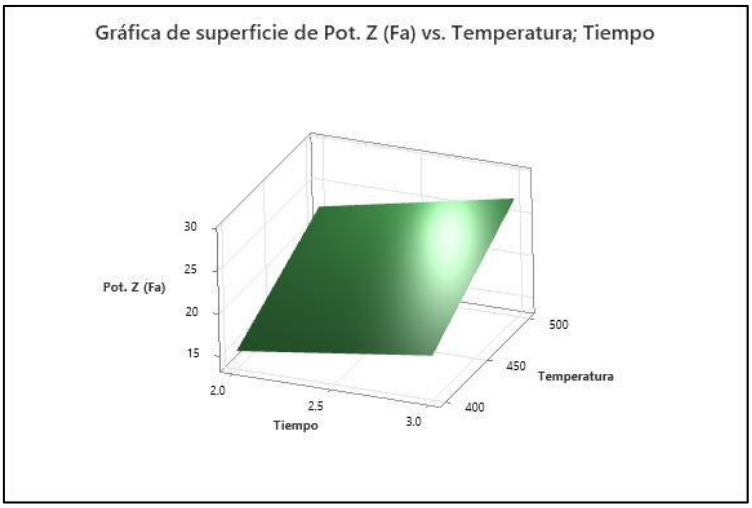


Figura 42 Gráfica de superficie del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas mediante el método químico

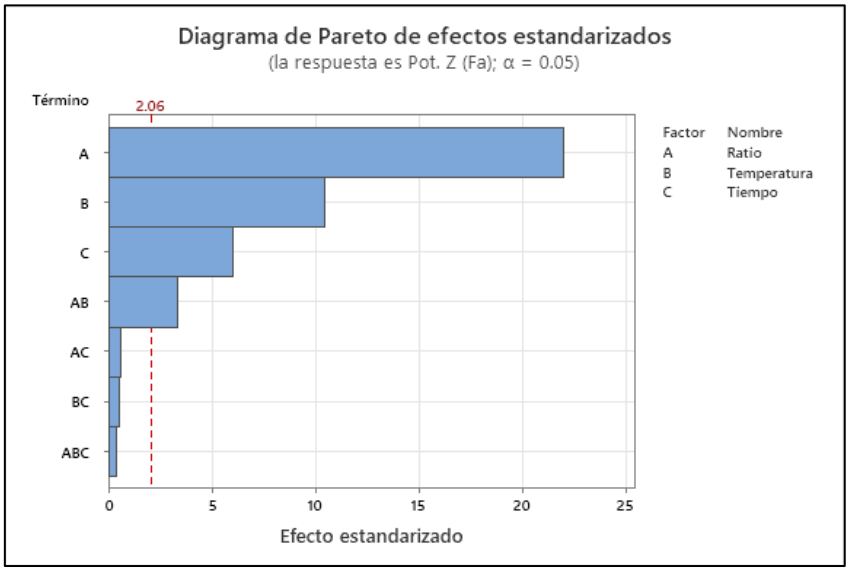


Las Figuras 41 y 42 representan la gráfica de contorno y la gráfica de superficie de respuesta respectivamente obtenido mediante el software Minitab 21. Se muestra la relación que existe entre la temperatura y el tiempo de calcinación (variables independientes) y el potencial Z de la nanopartícula sintetizada por el método químico (variable dependiente).

Tabla 21 Análisis de Varianza – Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	108.993	15.5704	92.02	0.000
Lineal	3	106.928	35.6428	210.65	0.000
Ratio	1	82.176	82.1762	485.66	0.000
Temperatura	1	18.575	18.5745	109.77	0.000
Tiempo	1	6.178	6.1776	36.51	0.000
Interacciones de 2 términos	3	2.042	0.6807	4.02	0.019
Ratio*Temperatura	1	1.931	1.9306	11.41	0.002
Ratio*Tiempo	1	0.067	0.0666	0.39	0.536
Temperatura*Tiempo	1	0.045	0.0450	0.27	0.611
Error	1	0.022	0.0221	0.13	0.721
Interacciones de 3 términos	1	0.022	0.0221	0.13	0.721
Ratio*Temperatura*Tiempo	24	4.061	0.1692		
Total	31	113.054			
R-cuadrado: 96.41%					
R-cuadrado(ajustado): 95.36%					

Figura 43 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados - Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde



De la Tabla 21 se puede afirmar que el *ratio*, la temperatura y el tiempo de calcinación presentan un efecto significativo en el potencial Z de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método verde dado que el valor p obtenido es menor al nivel de significancia admitido ($p < 0.05$). La Figura 43 muestra que el factor que sobrepasa el nivel de referencia es el *ratio*, la temperatura y el tiempo de calcinación, siendo estos los que presentan el mayor impacto sobre el potencial Z de las nanopartículas. Así mismo, la interacción de 2 y 3 factores no llega a ser significativo dado que su valor p obtenido es mayor al nivel de significancia permitido ($p > 0.05$).

El valor de R^2 es cercano al 100%, lo cual indica un ajuste lineal ideal. En el caso que este valor se encuentre muy alejado del 100%, indicaría la no representatividad del modelo lineal. (Rodríguez, 2005)

Con los factores mencionados anteriormente, se tiene la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Pot\ Z = 8.0 + 0.11\ R + 0.0046\ T + 1.35\ t + 0.00076\ R \times T - 0.127R \times t}$$

$$\mathbf{- 0.00165\ T \times t + 0.000350R \times T \times t}$$

Donde:

- t: Tiempo (horas)
- T: Temperatura (°C)
- R: Ratio

Por último, se realizaron las pruebas de Durbin-Watson, Anderson Darling y Grubbs localizadas en el Apéndice 2. El potencial Z de las nanopartículas de ZnO por el método verde evidenciaron que los datos no están correlacionados entre sí, siguen una distribución normal y no presentan valores atípicos.

Figura 44 Gráfica de contorno del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método verde

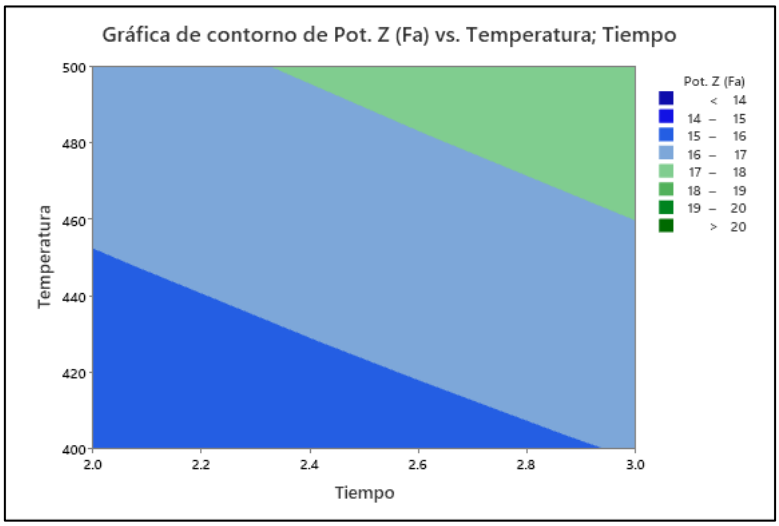
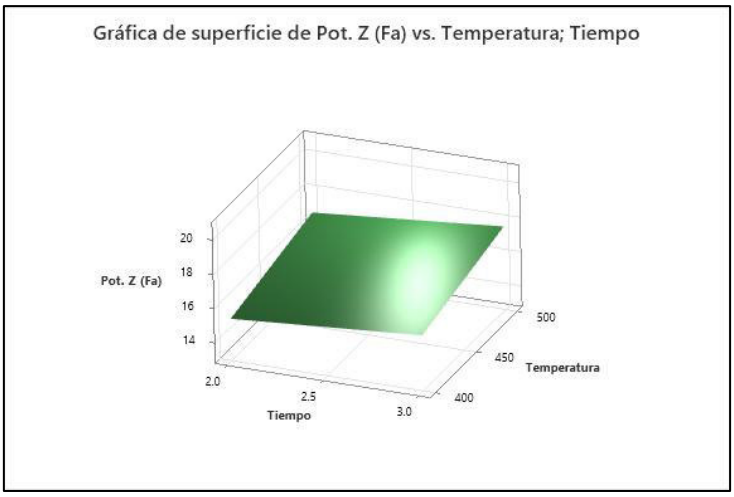


Figura 45 Gráfica de superficie del potencial Z de las NPsZnO sintetizadas por el método verde



Las Figuras 44 y 45 representa la gráfica de contorno y la gráfica de superficie de respuesta respectivamente obtenido mediante el software Minitab 21. Se fijó el *ratio* a 4 y se

muestra la relación que existe entre la temperatura y el tiempo de calcinación (variables independientes) y el potencial Z de la nanopartícula sintetizada por el método verde (variable dependiente).

Así, las muestras de nanopartículas de ZnO seleccionadas son Q-1 y V-6 para los métodos químico y verde, respectivamente. En la Tabla 22 y 23 se especifican las condiciones de operación de estos experimentos.

Tabla 22 Condiciones de operación de nanopartículas de ZnO seleccionadas sintetizadas por método químico

Etapa	Operación	Condiciones
Síntesis de nanopartículas de ZnO	Síntesis	T=22°C, t=2h, 400 RPM
	Centrifugación, lavado y decantado	• Producto de síntesis, t=20min, 5000 RPM • Agua destilada, 3 veces, t=5min, 5000 RPM • Etanol, 1 vez, t=10min, 5000 RPM
	Tratamiento térmico	T=400°C, t=2h

Tabla 23 Condiciones de operación de nanopartículas de ZnO seleccionadas sintetizadas por método verde

Etapa	Operación	Condiciones
Extracto de hoja de Moringa Oleifera seca	Extracción por método convencional	T=50°C, t=2h, 400 RPM
	Filtración al vacío	P=5000W
Síntesis de nanopartículas de ZnO	Síntesis	T=70°C, t=2h, 400 RPM
	Secado	T=90°C, t=18h
	Pretratamiento térmico	T=70°C, t=0.5h
	Tratamiento térmico	T=400°C, t=3h

4.3. Etapa 3. Modelamiento de un PFD preliminar del proceso de obtención de nanopartículas de óxido de zinc por ambos métodos

La simulación de los PFD para los procesos de obtención de nanopartículas de ZnO se desarrollan en el software *Aspen HYSYS V10* y se establecen las variables de operación de las síntesis óptimas que se muestran en las Tabla 22 y 23.

Así, para la simulación se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. El proceso se realiza en estado estacionario, siendo las condiciones normales de presión de 1 atm y a una temperatura ambiente de 25°C.
2. Las propiedades para los flujos del sistema se rigen al modelo termodinámico de dos líquidos no aleatorios (NRTL) por caracterizarse en trabajar a condiciones de baja presión.
3. Los compuestos químicos como el nitrato de zinc hexahidratado $Zn(NO_3)_2.6H_2O$, óxido de zinc ZnO, hidróxido de potasio KOH, y la hoja de *Moringa oleífera* como sólido hipotético. Por otro lado, se deben agregar también los compuestos químicos acuosos como el nitrato de potasio KNO_3. Además, la cantidad de compuestos fenólicos del extracto de hoja de *Moringa oleífera* se presenta en función del ácido gálico $C_7H_6O_5$, el cual también es añadido a la lista de componentes.
4. La simulación de los procesos de obtención de nanopartículas de ZnO se ajustará a la demanda de ZnO en la industria agrícola, debido a que se apunta a este rubro de aplicación, como reemplazo del material a granel por nanopartículas. Así, a partir de información de los años 2022 y 2023 según OEC (*Observatory of Economic Complexity*), se estima que la importación anual es de 10 000 toneladas/año de ZnO. Por otro lado, se conoce según MIDAGRI que del total de ZnO a granel, un 10% está destinado a la agricultura. Entonces, la demanda estimada anual es de 1 000 toneladas.

5. Según el anterior punto, para un flujo anual de 1 000 ton/año, estableciendo el flujo de trabajo para 8 horas diarias laborables, 3 turnos operativos, 26 días al mes y 12 meses al año, se tendría una producción diaria de 133.5 kg/h.

De este modo quedarán definidas las condiciones de operación y el número de equipos mostradas en la Tabla 24.

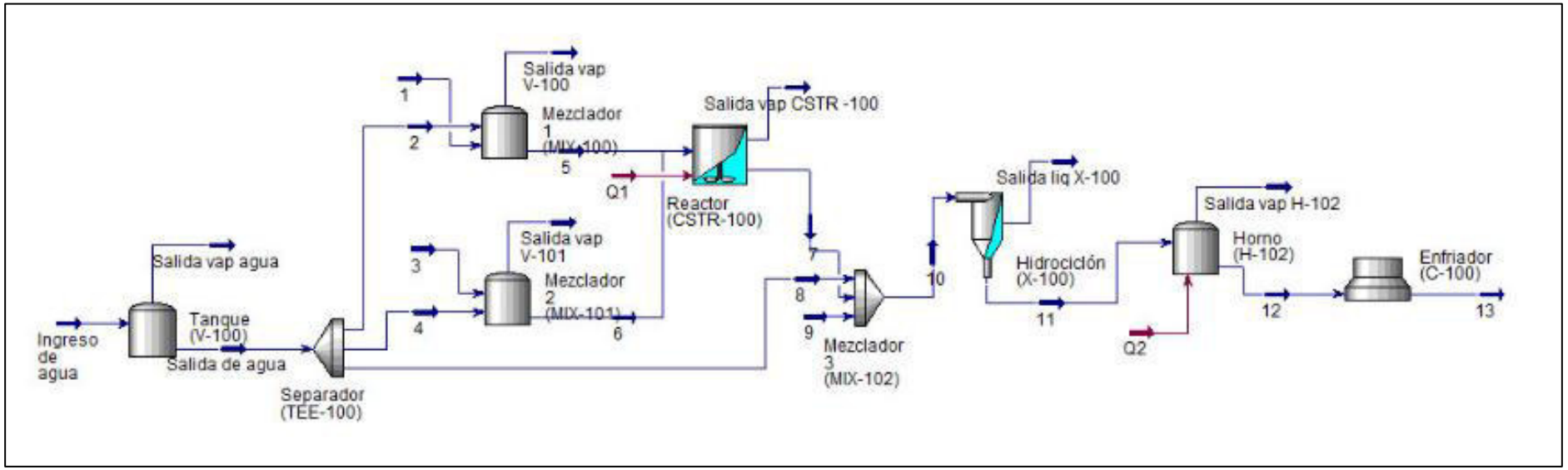
Tabla 24 Condiciones de operación y número de equipos

Operación	Método químico	Método verde
Extracción del compuesto biológico	-	1. Mezclador 1 T=50°C, t=2h 2. Mezclador 2 3. Centrífuga
Síntesis de NPsZnO	1. Mezclador 1 T=22°C, t=2h 2. Mezclador 2 3. Reactor (CSTR-100) 4. Mezclador 3 5. Hidrociclón 6. Horno de mufla 7. Enfriador	4. Reactor 5. Secador 1 6. Secador 2 7. Horno de mufla 8. Enfriador

Actividad 3.1: Simulación de proceso de obtención de NPsZnO por método químico

La Figura 46 muestra los equipos empleados, mientras que la tabla 25 brinda información sobre las líneas correspondientes para la obtención de NPsZnO mediante el método químico.

Figura 46 Diagrama de flujo de proceso de la obtención de NPsZnO por el método químico



Para el desarrollo del diagrama de flujo de proceso (PFD), se emplearon distintos equipos que permiten replicar las condiciones experimentales realizadas a nivel de laboratorio. Se emplearon dos mezcladores (MIX-100 y MIX-101) que se utilizaron para asegurar una mezcla homogénea de los reactivos antes del ingreso al reactor principal.

El reactor empleado es un CSTR y según Aspen HYSYS se expresa como CSTR-100, al cual no se le suministra calor e inicia operación a temperatura ambiente de 22°C, así mismo, este nos permitirá realizar actividades a condiciones de temperatura y agitación controlada, siendo adecuado para la síntesis.

Posteriormente se emplea un mezclador (MIX-102) para realizar el lavado de los productos resultantes del reactor.

La etapa de separación se dará gracias al uso de un hidrociclón (X-100) y sirve como reemplazo del equipo de centrífuga empleado a nivel de laboratorio. Finalmente, el uso de un horno (H-102) permite eliminar humedad y permite la obtención de las nanopartículas de ZnO

Tabla 25 Corrientes del diagrama de flujo de proceso para el método químico

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
$(Zn(NO_3)_2.6H_2O)$	25.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
(ZnO)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.84	0.00	0.00	6.84	6.50
(KOH)	0.00	0.00	10.93	0.00	0.00	10.93	1.50	0.00	0.00	1.50	0.03
(KNO_3)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.99	0.00	0.00	16.99	0.34
(H_2O)	0.00	409.29	0.00	409.29	409.29	409.29	829.17	1.50	0.00	830.67	276.61
(Etanol)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	397.99	397.99	132.53
Total flujo másico	25	409.286	10.93	409.286	434.286	420.216	854.51	1.50041	397.991	1254	416.011
	12	**13**	**Vap V-100**	**Vap V-101**	**Vap CSTR-100**	**Liq X-100**	**Vap H-102**	**Ingreso de agua**	**Salida de agua**	**Salida vap agua**	**-**
$(Zn(NO_3)_2.6H_2O)$	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
(ZnO)	6.50	6.50	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
(KOH)	0.03	0.03	1.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
(KNO_3)	0.34	0.34	16.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
(H_2O)	0.00	0.00	554.06	0.00	0.00	0.00	276.61	819.8	819.8	0.00	-
(Etanol)	0.00	0.00	265.46	0.00	0.00	0.00	132.53	0.00	0.00	0.00	-

Total flujo másico	6.86584	6.86584	837.991	0.00	0.00	0.00	409.145	819.8	819.8	0.00	-

En el modelamiento preliminar se considera la siguiente cinética de reacción siendo el reactivo limitante el $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ con un tiempo de reacción de 2h, 22°C y un grado de conversión del 95%.

Se tiene que la ley de velocidad de primer orden es la siguiente:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A$$

Luego de integrar, se tiene que:

$$\ln\left(\frac{C_A}{C_{AO}}\right) = kt$$

Se sabe que la conversión se define como:

$$X = \frac{C_{AO} - C_A}{C_{AO}}$$

Reemplazando, y según *(Sultana et al., 2020)* se propone el siguiente modelo cinético dado que la conversión del precursor durante la síntesis de las nanopartículas de ZnO responden a una cinética de primer orden:

$$\ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = kt$$

$$\ln\left(\frac{1}{1-0.95}\right) = 120.k$$

$$k = \frac{\ln(20.41)}{120}$$

$$k = 0.0252\ min^{-1}$$

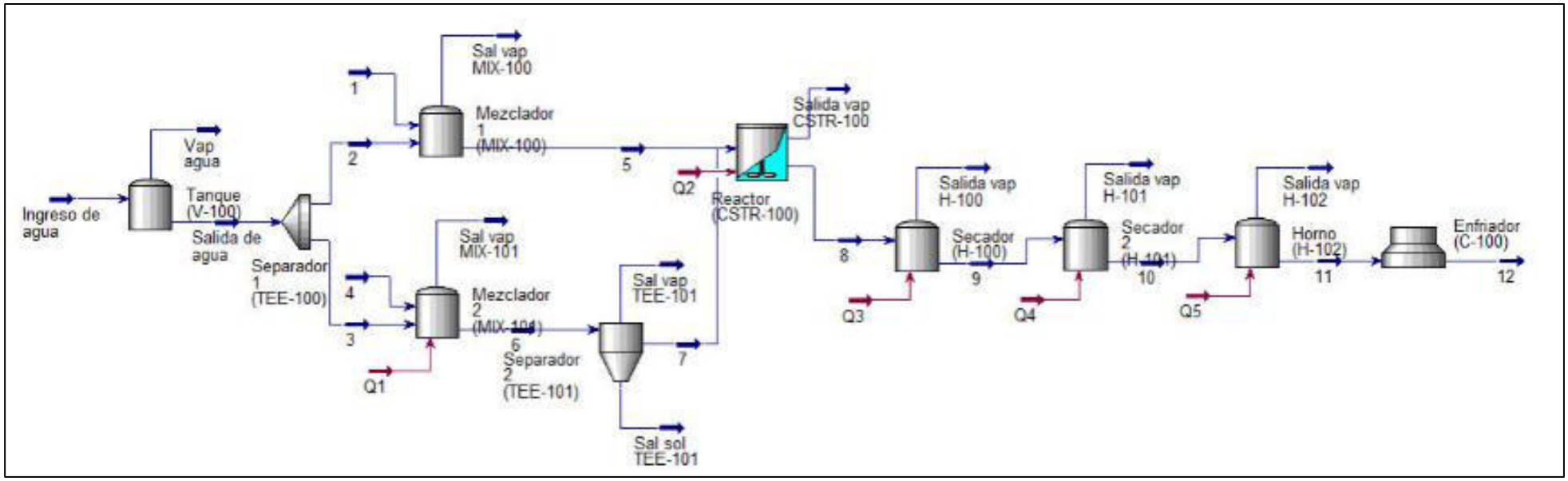
La ecuación cinética de primer orden es la siguiente:

$$\ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = 0.0252.t$$

Actividad 3.2: Simulación de proceso de obtención de NPsZnO por método verde

La Figura 47 muestra los equipos empleados, mientras que la tabla 26 brinda información sobre las líneas correspondientes para la obtención de NPsZnO mediante el método verde.

Figura 47 Diagrama de flujo de proceso de la obtención de NPsZnO por el método verde



Para el desarrollo del diagrama de flujo de proceso (PFD), se emplearon distintos equipos que permiten replicar las condiciones experimentales realizadas a nivel de laboratorio. Se emplearon dos mezcladores (MIX-100 y MIX-101) para obtener una mezcla homogénea de los reactivos.

Un separador (TEE-101) fue utilizado para poder trabajar con el extracto respectivo de la hoja de *Moringa Oleifera* previo ingreso al reactor principal. Se empleó un reactor CSTR que según Aspen HYSYS se expresa como CSTR-100, este permite trabajar a condiciones isotérmicas con

agitación controlada. El producto del reactor pasa a procesos de tratamiento térmico (H-100 y H-101) y posteriormente por un horno (H-102) para la eliminación de humedad y compuestos residuales.

Tabla 26 Corrientes del diagrama de flujo de proceso para el método verde

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$(Zn(NO_3)_2.6H_2O)$	25	0.0	0.0	0.0	25.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.50	0.50	0.50
(ZnO)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.52	7.52	6.70	6.70	6.70
(HNO_3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.19	10.19	0.0	0.0	0.0
$(C_7H_6O_5)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(Hoja de Moringa Oleifera)	0.0	0.0	0.0	100.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(H_2O)	0.0	828.55	3324.20	0.00	828.55	3324.20	3324.20	4160.32	4160.32	0.0	0.0	0.0
Total flujo másico	25	828.55	3324.20	100.00	853.55	3324.20	3324.20	4177.75	4177.75	7.2	7.2	7.2
	Vap MIX-100	**Vap MIX-101**	**Vap TEE-101**	**Sol TEE-101**	**Vap CSTR-100**	**Vap H-100**	**Vap H-101**	**Vap H-102**	**Ingreso de agua**	**Salida de agua**	**Salida Vap agua**	**-**
$(Zn(NO_3)_2.6H_2O)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
(ZnO)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
(HNO_3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.59	0.0	0.0	0.0	0.0	-
$(C_7H_6O_5)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
(Hoja de Moringa Oleifera)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
(H_2O)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4160.32	0.0	4152.75	4152.75	0.0	-
Total flujo másico	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4170.91	0.0	4152.75	4152.75	0.0	-

En el modelamiento preliminar se considera la siguiente cinética de reacción siendo el reactivo limitante el $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ con un tiempo de reacción de 2h, 70°C y un grado de conversión del 98%.

Se tiene que la ley de velocidad de primer orden es la siguiente:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A$$

Luego de integrar, se tiene que:

$$\ln\left(\frac{C_A}{C_{AO}}\right) = kt$$

Se sabe que la conversión se define como:

$$X = \frac{C_{AO} - C_A}{C_{AO}}$$

Reemplazando, y según *(Sultana et al., 2020)* se propone el siguiente modelo cinético dado que la conversión del precursor durante la síntesis de las nanopartículas de ZnO responden a una cinética de primer orden:

$$\ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = kt$$

La ecuación cinética, para las condiciones mencionadas anteriormente, es la siguiente:

$$\ln\left(\frac{1}{1-0.98}\right) = 120.k$$

$$k = \frac{\ln(50)}{120}$$

$$k = 0.0327\ min^{-1}$$

La ecuación cinética de primer orden es la siguiente:

$$\ln\left(\frac{1}{1-X}\right) = 0.0327.t$$

Según el diagrama de flujo de proceso (PFD) se tiene que la producción de NPsZnO mediante el método químico es de 6.50 kg/h mientras que la producción por el método verde es de 6.70 kg/h. Al realizar la comparación de ambos métodos, el método verde presenta una producción que es un 3.1% mayor respecto al método químico.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que las nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas por el método químico y verde presentan tamaños en el rango de 26 - 62 nm y 16 - 36 nm, respectivamente y forma esférica, los cuales confirman que son útiles para su aplicación como nanofertilizante.

También, se determinaron las variables óptimas para ambos métodos. Para el caso de la síntesis química, la temperatura de calcinación de 400 °C y tiempo de calcinación de 2 h, fueron los valores óptimos para obtener un tamaño promedio de NPsZnO de 25.65 nm. Y para el método verde los parámetros óptimos fueron, *ratio* de extracto de *Moringa Oleifera*/Precursor, de 4, temperatura de calcinación de 400 °C y tiempo de calcinación de 2 h, resultando en un tamaño de NPsZnO de 18.25 nm. Las características obtenidas luego de la determinación de las variables óptimas indican que ambos métodos producen NPsZnO con tamaño y forma adecuados para su uso en la agricultura como nanofertilizante.

Mediante el análisis estadístico se verificó la influencia de los factores de temperatura de calcinación, tiempo de calcinación y *ratio* en los métodos químico y verde. Así mismo mediante la gráfica de superficie de respuesta se logra describir el comportamiento del tamaño de nanopartícula en función de los factores mencionados determinando que en ambos métodos a una temperatura de calcinación de 400°C por 2h se obtienen nanopartículas con un tamaño menor a 30nm, indicando que son aptas para su uso como nanofertilizantes.

Los resultados de la simulación presentados en el diagrama de flujo de proceso (PFD) empleando el software *Aspen HYSYS V10* indican que hay 6.50 kg/h de producción de NPsZnO por el método químico, mientras que por el método verde se tiene 6.70 kg/h. Esta diferencia evidencia preliminarmente que el método verde permite producir en mayor cantidad las NPsZnO que el método químico, representando esta diferencia un incremento de 3.1% para el método verde. Además de presentar una mayor capacidad de producción, el

método verde es más sostenible desde el punto de vista ambiental al generar la menor cantidad de residuos.

Comparativamente, los resultados de tamaño, forma y capacidad de producción obtenidos demuestran que el método verde, para la síntesis de nanopartículas de ZnO, representa una ruta favorable para reemplazar al método químico.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuros trabajos evaluar distintos factores como el pH, tiempo y temperatura de reacción para tener un mayor conocimiento sobre su efecto en la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc mediante el método químico y verde.
- Se recomienda realizar la deshidratación de la hoja de *Moringa Oleifera* previo a su uso en la obtención del extracto, esto debido a que el porcentaje de agua presente en la hoja reduce la concentración de compuestos bioactivos.
- A la temperatura en la cual se realiza el pretratamiento térmico ocurre una reacción similar a una pequeña explosión en el crisol. Se recomienda envolver este con papel aluminio para minimizar las pérdidas al momento de realizar esta etapa de la experimentación.
- Al realizar las medidas de tamaño de partículas empleando el método de dispersión de luz dinámica (DLS), se recomienda preparar de manera adecuada las muestras, esto implica someterlas a tratamiento por ultrasonido para una mejor dispersión de estas y evitando concentración excesiva de estas partículas en la celda de medición.

REFERENCIAS

Aalami, Z., Hoseinzadeh, M., Hosseini Manesh, P., Aalami, A. H., Es'haghi, Z., Darroudi, M., Sahebkar, A., & Hosseini, H. A. (2024). Synthesis, characterization, and photocatalytic activities of green sol-gel ZnO nanoparticles using Abelmoschus esculentus and Salvia officinalis: A comparative study versus co-precipitation-synthesized nanoparticles. *Heliyon*, *10*(2), e24212. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24212

Abdelbaky, A. S., Abd El-Mageed, T. A., Babalghith, A. O., Selim, S., & Mohamed, A. M. H. A. (2022). Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using Pelargonium odoratissimum (L.) Aqueous Leaf Extract and Their Antioxidant, Antibacterial and Anti-inflammatory Activities. *Antioxidants*, *11*(8). https://doi.org/10.3390/antiox11081444

Abel, S., Tesfaye, J. L., Nagaprasad, N., Shanmugam, R., Dwarampudi, L. P., & Krishnaraj, R. (2021a). Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Moringa Leaf Extract. *Journal of Nanomaterials*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/4525770

Abel, S., Tesfaye, J. L., Nagaprasad, N., Shanmugam, R., Dwarampudi, L. P., & Krishnaraj, R. (2021b). Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Moringa Leaf Extract. *Journal of Nanomaterials*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/4525770

Abel, S., Tesfaye, J. L., Nagaprasad, N., Shanmugam, R., Dwarampudi, L. P., & Krishnaraj, R. (2021c). Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Moringa Leaf Extract. *Journal of Nanomaterials*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/4525770

Adeyemi, J. O., Onwudiwe, D. C., & Oyedeji, A. O. (2022). Biogenic Synthesis of CuO, ZnO, and CuO–ZnO Nanoparticles Using Leaf Extracts of Dovyalis caffra and Their Biological Properties. *Molecules*, *27*(10). https://doi.org/10.3390/molecules27103206

Agraria. (2021, noviembre 12). *Capeagro trae lo último en nanotecnología y bionanotecnología para la agricultura con su linea "Green Power"*.

https://agraria.pe/noticias/capeagro-trae-lo-ultimo-en-nanotecnologia-y-bionanotecnologi-26043

Al Jabri, H., Saleem, M. H., Rizwan, M., Hussain, I., Usman, K., & Alsafran, M. (2022). Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biosynthesis: Overview. *Life (Basel, Switzerland)*, *12*(4). https://doi.org/10.3390/LIFE12040594

Al Rahbi, A. S., Al Mawali, A. H., Al Rawahi, S. S., Al Dighishi, R. K., Al Abri, F. A., Ahmed, A., & Rahman, S. (2024). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from Salvadora persica leaf extract: Characterization and studying methyl orange removal by adsorption. *Water Practice and Technology*, *19*(4), 1219–1231. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.042

Alarcón Hernández, C. de J. (2022). *Análisis de la síntesis química y verde de nanopartículas de óxidos metálicos: ventajas y desventajas.* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. En *Frontiers in Microbiology* (Vol. 14). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622

Andrea, K., Landeros, C., Andrea, ;, Jacobo, T. J., Leslie, ;, Rivas, P., Villanueva, I. T., Ximena, ;, Delgadillo Castañon, Y., Corona-Arroyo, M., & Salazar Hernández, M. (2021). *Characterization of Surface of Adsorbent (MS-Nx-Fe) by Zeta Potencial*.

Aquino, P., Osorio, A. M., Ninán, E., & Torres, F. (2018a). Caracterización de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método de precipitación y su evaluación en la incorporación en pinturas esmalte. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *84*(1), 5–17. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2018000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Aquino, P., Osorio, A. M., Ninán, E., & Torres, F. (2018b). Caracterización de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método de precipitación y su evaluación en la incorporación en pinturas esmalte. En *Rev Soc Quím Perú* (Vol. 84, Número 1).

Arya, S., Mahajan, P., Mahajan, S., Khosla, A., Datt, R., Gupta, V., Young, S.-J., & Oruganti, S. K. (2021). Review—Influence of Processing Parameters to Control Morphology and Optical Properties of Sol-Gel Synthesized ZnO Nanoparticles. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, *10*(2), 023002. https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe095

Asafa, T. B., Adedokun, O., & Dele-Afolabi, T. T. (2021). *Characterization Techniques in Nanotechnology: The State of the Art* (pp. 21–73). https://doi.org/10.1007/978-981-33-4777-9_2

Babu, S., Singh, R., Yadav, D., Rathore, S. S., Raj, R., Avasthe, R., Yadav, S. K., Das, A., Yadav, V., Yadav, B., Shekhawat, K., Upadhyay, P. K., Yadav, D. K., & Singh, V. K. (2022). Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability. *Chemosphere*, *292*, 133451. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133451

Baer, A., Wawra, S. E., Bielmeier, K., Uttinger, M. J., Smith, D. M., Peukert, W., Walter, J., & Smith, A. S. (2024). The Stokes–Einstein–Sutherland Equation at the Nanoscale Revisited. *Small*, *20*(6). https://doi.org/10.1002/smll.202304670

Baharudin, K. B., Abdullah, N., & Derawi, D. (2018). Effect of calcination temperature on the physicochemical properties of zinc oxide nanoparticles synthesized by coprecipitation. *Materials Research Express*, *5*(12), 125018. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae243

Bala, R., Kalia, A., & Dhaliwal, S. S. (2019). Evaluation of Efficacy of ZnO Nanoparticles as Remedial Zinc Nanofertilizer for Rice. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *19*(2), 379–389. https://doi.org/10.1007/S42729-019-00040-Z

Banco Central de Reserva del Perú. (2022). *Precio de los fertilizantes en dólares*.

Bandeira, M., Giovanela, M., Roesch-Ely, M., Devine, D. M., & da Silva Crespo, J. (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodology and mechanism of formation. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *15*. https://doi.org/10.1016/J.SCP.2020.100223

Begum, S. J. P., Pratibha, S., Rawat, J. M., Venugopal, D., Sahu, P., Gowda, A., Qureshi, K. A., & Jaremko, M. (2022). Recent Advances in Green Synthesis, Characterization, and Applications of Bioactive Metallic Nanoparticles. En *Pharmaceuticals* (Vol. 15, Número 4). MDPI. https://doi.org/10.3390/ph15040455

Benyamin, C. A., & Manurung, P. (2023). *Influence Variation Concentration Zn(NO3)2·6H2O Against Group Function, Size Particles, and Morphology Particle Nanoparticles ZnO with Method Green Synthesis Using Extract Leaf Moringa*. https://jemit.fmipa.unila.ac.id/

Bhalla, N., Ingle, N., Jayaprakash, A., Patel, H., Patri, S. V., & Haranath, D. (2023). Green approach to synthesize nano zinc oxide via Moringa oleifera leaves for enhanced anti-oxidant, anti-acne and anti-bacterial properties for health & wellness applications. *Arabian Journal of Chemistry*, *16*(3), 104506. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2022.104506

Britto Hurtado, R., Cortez-Valadez, M., & Flores- Acosta, M. (2022). Aplicaciónes tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria. *EPISTEMUS*, *16*(33). https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.223

Chaithanatkun, N., Onlaor, K., & Tunhoo, B. (2017). The influence of annealing temperature on structural properties of zinc oxide nanoparticles synthesized by precipitation method. *Key Engineering Materials*, *728*, 215–220. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.728.215

Chen, Z. (2024). *Application of UV-vis spectroscopy in the detection and analysis of substances*.

Coviello, V., Forrer, D., & Amendola, V. (2022). Recent Developments in Plasmonic Alloy Nanoparticles: Synthesis, Modelling, Properties and Applications. En *ChemPhysChem* (Vol. 23, Número 21). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/cphc.202200136

Dhoke, S. K. (2023). Synthesis of nano-ZnO by chemical method and its characterization. *Results in Chemistry*, *5*. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100771

Diallo, A., Ngom, B. D., Park, E., & Maaza, M. (2015). Green synthesis of ZnO nanoparticles by Aspalathus linearis: Structural & optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, *646*, 425–430. https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2015.05.242

Doan Thi, T. U., Nguyen, T. T., Thi, Y. D., Ta Thi, K. H., Phan, B. T., & Pham, K. N. (2020). Green synthesis of ZnO nanoparticles using orange fruit peel extract for antibacterial activities. *RSC Advances*, *10*(40), 23899–23907. https://doi.org/10.1039/d0ra04926c

Droepenu, E. K., Wee, B. S., Chin, S. F., Kok, K. Y., & Maligan, M. F. (2022). Zinc oxide nanoparticles synthesis methods and its effect on morphology: A review. En *Biointerface Research in Applied Chemistry* (Vol. 12, Número 3, pp. 4261–4292). AMG Transcend Association. https://doi.org/10.33263/BRIAC123.42614292

Elumalai, K., Velmurugan, S., Ravi, S., Kathiravan, V., & Ashokkumar, S. (2015). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Moringa oleifera leaf extract and evaluation of its antimicrobial activity. En *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* (Vol. 143, pp. 158–164). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.02.011

Escárcega-González, C. E., Garza-Cervantes, J. A., Vázquez-Rodríguez, A., Montelongo-Peralta, L. Z., Treviño-González, M. T., Díaz Barriga Castro, E., Saucedo-Salazar, E. M., Chávez Morales, R. M., Regalado Soto, D. I., Treviño González, F. M., Carrazco

Rosales, J. L., Villalobos Cruz, R., & Morones-Ramírez, J. R. (2018). In vivo antimicrobial activity of silver nanoparticles produced via a green chemistry synthesis using Acacia rigidula as a reducing and capping agent. *International journal of nanomedicine*, *13*, 2349–2363. https://doi.org/10.2147/IJN.S160605

Espenti, C. S., Rama Krishna, A. G., & Rami Reddy, Y. V. (2020). Green biosynthesis of ZnO nanomaterials and their anti-bacterial activity by using Moringa Oleifera root aqueous extract. *SN Applied Sciences*, *2*(8). https://doi.org/10.1007/s42452-020-2945-3

Fortis-Hernández, M., Pivaral-Chávez, A. G., Galindo-Guzmán, A. P., Preciado-Rangel, P., Ruiz-Ortega, F. J., & Trejo-Valencia, R. (2024). Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *11*(1). https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3939

Frod, B., & Joy, D. (2024, diciembre 2). *Transmission electron microscope*.

Galindo-Guzmán, A. P., Fortis-Hernández, M., De La Rosa-Reta, C. V., Zermeño-González, H., & Galindo-Guzmán, M. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de Lactuca sativa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *28*, 299–308. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284

Ghorbani, H. R., Mehr, F. P., Pazoki, H., & Rahmani, B. M. (2015). Synthesis of ZnO nanoparticles by precipitation method. *Oriental Journal of Chemistry*, *31*(2), 1219–1221. https://doi.org/10.13005/OJC/310281

Giorgio, D. (2024). *Estandarización del método ALSL para la síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de hierro*.

Globe Newswire. (2022, mayo 16). *Global Nanotechnology Market to Reach $70.7 Billion by 2026*.

González-Fernández, J. V., Pinzón-Moreno, D. D., Neciosup-Puican, A. A., & Carranza-Oropeza, M. V. (2022a). Green method, optical and structural characterization of zno

nanoparticles synthesized using leaves extract of m. Oleifera. *Journal of Renewable Materials*, *10*(3), 833–847. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017377

González-Fernández, J. V., Pinzón-Moreno, D. D., Neciosup-Puican, A. A., & Carranza-Oropeza, M. V. (2022b). Green method, optical and structural characterization of zno nanoparticles synthesized using leaves extract of m. Oleifera. *Journal of Renewable Materials*, *10*(3), 833–847. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017377

Handford, C. E., Dean, M., Henchion, M., Spence, M., Elliott, C. T., & Campbell, K. (2014). Implications of nanotechnology for the agri-food industry: Opportunities, benefits and risks. *Trends in Food Science & Technology*, *40*(2), 226–241. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2014.09.007

Havlin, J. (2020). *Landscape and Land Capacity* (Y. Wang, Ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429445552

He, X., & Hwang, H. M. (2016). Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment. *Journal of Food and Drug Analysis*, *24*(4), 671–681. https://doi.org/10.1016/J.JFDA.2016.06.001

Henderson, T. (2023, abril 21). *Electron Microscopy: SEM and TEM Analysis*.

Herrera Robalino, D. (2021). Caracterización de suspensiones de nanopartículas de oro en presencia del copolímero poli (N-isopropilacrilamida)-co-poli (3-acrilamidopropil trimetilamonio): Influencia de la fuerza iónica y la temperatura. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, *13*(2), 18. https://doi.org/10.18272/aci.v13i2.2338

Hugo, R., Saldivar, L., Argüello, B. M., Reyes, I. V., De Los, G., & Villarreal, S. (1999). Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Rev. FCA UNCUYO*, *50*(2), 395–411.

Hussain, S. B., Amin, H., Naqqash, T., Zubair, M., & Noor, S. (2021). Moringa oleifera Mediated Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles and their Characterization and Evaluation of Biological Activities. *Asian Journal of Biochemistry, Genetics and MolecularBiology*, *9*(3), 34–44. https://journalajbgmb.com/index.php/AJBGMB/article/view/179/359

Islam, F., Shohag, S., Uddin, M. J., Islam, M. R., Nafady, M. H., Akter, A., Mitra, S., Roy, A., Bin Emran, T., & Cavalu, S. (2022). Exploring the Journey of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) toward Biomedical Applications. En *Materials* (Vol. 15, Número 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/ma15062160

Jahan Tamanna, N., Sahadat Hossain, M., Mohammed Bahadur, N., & Ahmed, S. (2024). Green synthesis of Ag2O & facile synthesis of ZnO and characterization using FTIR, bandgap energy & XRD (Scherrer equation, Williamson-Hall, size-train plot, Monshi-Scherrer model). *Results in Chemistry*, *7*. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101313

Jessica, P. (2023). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de ZnO mediante extracto de Ruta L. (ruda) y su aplicación fotocatalítica en la degradación de azul de metileno*.

Jiang, Z., Liu, B., Yu, L., Tong, Y., Yan, M., Zhang, R., Han, W., Hao, Y., Shangguan, L., Zhang, S., & Li, W. (2023). Research progresses in preparation methods and applications of zinc oxide nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, *956*, 170316. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170316

Kaningini, A. G., Azizi, S., Sintwa, N., Mokalane, K., Mohale, K. C., Mudau, F. N., & Maaza, M. (2022a). Effect of Optimized Precursor Concentration, Temperature, and Doping on Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized via a Green Route Using Bush Tea (Athrixia phylicoides DC.) Leaf Extracts. *ACS Omega*, *7*(36), 31658–31666. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00530

Kaningini, A. G., Azizi, S., Sintwa, N., Mokalane, K., Mohale, K. C., Mudau, F. N., & Maaza, M. (2022b). Effect of Optimized Precursor Concentration, Temperature, and Doping on Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized via a Green Route Using Bush Tea (Athrixia phylicoides DC.) Leaf Extracts. *ACS Omega*, *7*(36), 31658–31666. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00530

Katiyar, A., Kumar, N., Shukla, R. K., & Srivastava, A. (2019). Influence of alkali hydroxides on synthesis, physico-chemical and photoluminescence properties of zinc oxide nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, *29*, 885–889. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.112

Katiyar, A., Kumar, N., Shukla, R. K., & Srivastava, A. (2020). Substrate free ultrasonic-assisted hydrothermal growth of ZnO nanoflowers at low temperature. *SN Applied Sciences*, *2*(8), 1–7. https://doi.org/10.1007/S42452-020-3186-1/FIGURES/5

Kayalvizhi P, & Jayanthi G. (2020). *Synthesis of zinc oxide nanoparticles from leaf extract by green synthesis method*. https://doi.org/10.24327/ijrsr.2019.1003.3206

Keller, A. A., & Lazareva, A. (2013). Predicted Releases of Engineered Nanomaterials: From Global to Regional to Local. *Environmental Science and Technology Letters*, *1*(1), 65–70. https://doi.org/10.1021/ez400106t

Khalid, K., Ishak, R., & Chowdhury, Z. Z. (2024). UV–Vis spectroscopy in non-destructive testing. En *Non-Destructive Material Characterization Methods* (pp. 391–416). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91150-4.00021-5

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(7), 908–931. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2017.05.011

Khan, Y., Sadia, H., Ali Shah, S. Z., Khan, M. N., Shah, A. A., Ullah, N., Ullah, M. F., Bibi, H., Bafakeeh, O. T., Ben Khedher, N., Eldin, S. M., Fadhl, B. M., & Khan, M. I. (2022).

Classification, Synthetic, and Characterization Approaches to Nanoparticles, and Their Applications in Various Fields of Nanotechnology: A Review. En *Catalysts* (Vol. 12, Número 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/catal12111386

Kharissova, O. V., Dias, H. V. R., Kharisov, B. I., Pérez, B. O., & Pérez, V. M. J. (2013). The greener synthesis of nanoparticles. *Trends in Biotechnology*, *31*(4), 240–248. https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2013.01.003

Khatami, M., Alijani, H. Q., Heli, H., & Sharifi, I. (2018). Rectangular shaped zinc oxide nanoparticles: Green synthesis by Stevia and its biomedical efficiency. *Ceramics International*, *44*(13), 15596–15602. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2018.05.224

Kolodziejczak-Radzimska, A., & Jesionowski, T. (2014a). Zinc oxide-from synthesis to application: A review. En *Materials* (Vol. 7, Número 4, pp. 2833–2881). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ma7042833

Kolodziejczak-Radzimska, A., & Jesionowski, T. (2014b). Zinc oxide-from synthesis to application: A review. *Materials*, *7*(4), 2833–2881. https://doi.org/10.3390/MA7042833

Kundu, S., Haydar, S., & Mandal, P. (2021). *Zinc Oxide Nanoparticles: Different synthesis approaches and applications*. https://www.researchgate.net/publication/361579243

León Moreno Karina. (2017). *Aplicación foliar de nanopartículas de zinc, cobre y hierro como estimuladores en el desarrollo de plántulas de tomate* [Universidad Autónoma Agraría Antonio Narro]. http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42925/Moreno%20Le%C3%B3n%20Karina.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Letsholathebe, D., Thema, F. T., Mphale, K., Maabong, K., & Maria Magdalane, C. (2019a). Green synthesis of ZnO doped Moringa oleifera leaf extract using Titon yellow dye for

photocatalytic applications. *Materials Today: Proceedings*, *36*, 475–479. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.119

Letsholathebe, D., Thema, F. T., Mphale, K., Maabong, K., & Maria Magdalane, C. (2019b). Green synthesis of ZnO doped Moringa oleifera leaf extract using Titon yellow dye for photocatalytic applications. *Materials Today: Proceedings*, *36*, 475–479. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.119

Loza, K., Epple, M., & Maskos, M. (2019). Stability of nanoparticle dispersions and particle agglomeration. En *NanoScience and Technology* (pp. 85–100). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12461-8_4

Mahlaule-Glory, L. M., Mbita, Z., Ntsendwana, B., Mathipa, M. M., Mketo, N., & Hintsho-Mbita, N. C. (2019). ZnO nanoparticles via Sutherlandia frutescens plant extract: Physical and biological properties. *Materials Research Express*, *6*(8). https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1afa

Mandal, A. K., Katuwal, S., Tettey, F., Gupta, A., Bhattarai, S., Jaisi, S., Bhandari, D. P., Shah, A. K., Bhattarai, N., & Parajuli, N. (2022). Current Research on Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications. *Nanomaterials 2022, Vol. 12, Page 3066*, *12*(17), 3066. https://doi.org/10.3390/NANO12173066

Marsalek, R. (2014). Particle Size and Zeta Potential of ZnO. *APCBEE Procedia*, *9*, 13–17. https://doi.org/10.1016/J.APCBEE.2014.01.003

Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., & Maaza, M. (2017). ZnO nanoparticles via Moringa oleifera green synthesis: Physical properties & mechanism of formation. *Applied Surface Science*, *406*, 339–347. https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2017.01.219

Medina, M. E., Galván, L. E., & Reyes, R. E. (2015). *Las nanopartículas y el medio ambiente*.

Mohamed, S., Emad, S., Maha, A. S., Eman, A. M., Shaza, A., & Ayman, A. (2020). In Vitro Evaluation of Antibacterial Properties of Zinc Oxide Nanoparticles alone and in Combination with Antibiotics against Avian Pathogenic E. coli. *Journal of World's Poultry Research*, *10*(SpecialIssue 2), 278–284. https://doi.org/10.36380/JWPR.2020.33

Muhammad, S. A., Muhammad, Y. K., Zeeshan, A., Waseem, A., Ahsan, M., Shahid, B., Faizan, U., Muhammad, F. A., & Zeeshan, A. (2021). Proposed industrial scale setup for production of ZnO nanoparticles using wet chemical synthesis method. *Key Engineering Materials*, *875 KEM*, 146–152. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.875.146

Mutukwa, D., Taziwa, R., & Khotseng, L. E. (2022). A Review of the Green Synthesis of ZnO Nanoparticles Utilising Southern African Indigenous Medicinal Plants. En *Nanomaterials* (Vol. 12, Número 19). MDPI. https://doi.org/10.3390/nano12193456

Naiel, B., Fawzy, M., Halmy, M. W. A., & Mahmoud, A. E. D. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Sea Lavender (Limonium pruinosum L. Chaz.) extract: characterization, evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. *Scientific Reports*, *12*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-24805-2

Nava, O. J., Luque, P. A., Gómez-Gutiérrez, C. M., Vilchis-Nestor, A. R., Castro-Beltrán, A., Mota-González, M. L., & Olivas, A. (2017). Influence of Camellia sinensis extract on Zinc Oxide nanoparticle green synthesis. *Journal of Molecular Structure*, *1134*, 121–125. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.12.069

Ngoepe, N. M., Mbita, Z., Mathipa, M., Mketo, N., Ntsendwana, B., & Hintsho-Mbita, N. C. (2018). Biogenic synthesis of ZnO nanoparticles using Monsonia burkeana for use in photocatalytic, antibacterial and anticancer applications. *Ceramics International*, *44*(14), 16999–17006. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2018.06.142

Ngom, I., Ngom, B. D., Sackey, J., & Khamlich, S. (2021a). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using extracts of Moringa Oleifera: Structural & optical properties.

Materials Today: Proceedings, *36*, 526–533. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.323

Ngom, I., Ngom, B. D., Sackey, J., & Khamlich, S. (2021b). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using extracts of Moringa Oleifera: Structural & optical properties. *Materials Today: Proceedings*, *36*, 526–533. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.323

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023, julio 6). *Informe OCDE-FAO Perspectivas agrícolas 2023-2032 describe las principales tendencias en la producción, el consumo y el comercio*.

Paarakh, P. M., & Muthukumar, A. (2023). *Understanding Nanoparticles: A Comprehensive Overview of Classification, Types, Characterization, Properties, and Applications*. http://ymerdigital.com

Pal, S., Mondal, S., Maity, J., & Mukherjee, R. (2018). Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles using Moringa Oleifera Leaf Extract: Investigation of Photocatalytic and Antibacterial Activity. *Int. J. Nanosci. Nanotechnol*, *14*(2), 111–119.

Prasad, G. (2022). *Structural, Morphological, And Gas Sensing Studies of Co-Doped ZnO Prepared by Simple Chemical Route*.

PUCP. (2022, julio 15). *Alternativas a la crisis de los fertilizantes*.

Rad, S. S., Sani, A. M., & Mohseni, S. (2019). Biosynthesis, characterization and antimicrobial activities of zinc oxide nanoparticles from leaf extract of Mentha pulegium (L.). *Microbial Pathogenesis*, *131*, 239–245. https://doi.org/10.1016/J.MICPATH.2019.04.022

Raha, S., & Ahmaruzzaman, M. (2022). ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. En *Nanoscale Advances* (Vol. 4, Número 8, pp. 1868–1925). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d1na00880c

Raliya, R., & Tarafdar, J. C. (2013). ZnO Nanoparticle Biosynthesis and Its Effect on Phosphorous-Mobilizing Enzyme Secretion and Gum Contents in Clusterbean (Cyamopsis tetragonoloba L.). *Agricultural Research*, *2*(1), 48–57. https://doi.org/10.1007/s40003-012-0049-z

Rather, G. A., Hamid, S., Riyaz, M., Hassan, M., Sofi, M. A., Manzoor, I., & Nanda, A. (2022). The Role of Green Synthesised Zinc Oxide Nanoparticles in Agriculture. *Sustainable Agriculture*, 119–142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83066-3_7

Regni, L., Del Buono, D., Micheli, M., Facchin, S. L., Tolisano, C., & Proietti, P. (2022). Effects of Biogenic ZnO Nanoparticles on Growth, Physiological, Biochemical Traits and Antioxidants on Olive Tree In Vitro. *Horticulturae*, *8*(2). https://doi.org/10.3390/horticulturae8020161

Rodríguez, E. M. (2005). *Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal*.

Rodriguez-Loya, J., Lerma, M., & Gardea-Torresdey, J. L. (2024). Dynamic Light Scattering and Its Application to Control Nanoparticle Aggregation in Colloidal Systems: A Review. En *Micromachines* (Vol. 15, Número 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/mi15010024

Salahuddin, N. A., El-Kemary, M., & Ibrahim, E. M. (2015). Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles via Precipitation Method: Effect of Annealing Temperature on Particle Size. *Nanoscience and Nanotechnology*, *5*(4), 82–88. https://doi.org/10.5923/j.nn.20150504.02

Salvatierra Paco, K. S., & Condori Ramos, M. R. (2021). *Evaluación del tiempo y la temperatura de calcinación del óxido de zinc en la obtención de nanopartículas de óxido de zinc*.

Sangeetha, G., Rajeshwari, S., & Venckatesh, R. (2011). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by aloe barbadensis miller leaf extract: Structure and optical properties. *Materials Research Bulletin*, *46*(12), 2560–2566. https://doi.org/10.1016/J.MATERRESBULL.2011.07.046

Sharma, K. (2023, abril 22). *Transmission Electron Microscope (TEM): Principle, Instrumentation, Uses*.

Singh, A. K., Pal, P., Gupta, V., Yadav, T. P., Gupta, V., & Singh, S. P. (2018). Green synthesis, characterization and antimicrobial activity of zinc oxide quantum dots using Eclipta alba. *Materials Chemistry and Physics*, *203*, 40–48. https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2017.09.049

Singh, K., Singh, J., & Rawat, M. (2019). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Punica Granatum leaf extract and its application towards photocatalytic degradation of Coomassie brilliant blue R-250 dye. *SN Applied Sciences*, *1*(6), 1–8. https://doi.org/10.1007/S42452-019-0610-5/FIGURES/12

Subbaiah, L. V., Prasad, T. N. V. K. V., Krishna, T. G., Sudhakar, P., Reddy, B. R., & Pradeep, T. (2016). Novel Effects of Nanoparticulate Delivery of Zinc on Growth, Productivity, and Zinc Biofortification in Maize (Zea mays L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *64*(19), 3778–3788. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838

Sultana, K. A., Islam, T., Silva, J., Turley, R., Hernandez-Viezcas, J., Gardea-Torresdey, J., & Noveron, J. (2020). *Sustainable synthesis of zinc oxide nanoparticles for photocatalytic degradation of organic pollutant and generation of hydroxyl radical*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732219368084

Sumaya, M. U., Maria, K. H., Toma, F. T. Z., Zubair, M. A., & Chowdhury, M. T. (2023). Effect of stabilizer content in different solvents on the synthesis of ZnO nanoparticles

using the chemical precipitation method. *Heliyon*, *9*(10). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20871

Suparno, S., & Nur Aziz, K. (2024). *In Depth Review on Light Scattering Techniques for Characterization of Protein, Polymer, Macromolecule, and Nanoparticle*. https://doi.org/10.17756/nwj.2024-132

Taka, G., & Das, T. D. (2022). Synthesis of ZnO nanoparticles through a simple wet chemical precipitation method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1042*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1042/1/012017

Tarafdar, J. C., Raliya, R., Mahawar, H., & Rathore, I. (2014). Development of Zinc Nanofertilizer to Enhance Crop Production in Pearl Millet (Pennisetum americanum). *Agricultural Research*, *3*(3), 257–262. https://doi.org/10.1007/S40003-014-0113-Y

Thema, F. T., Manikandan, E., Dhlamini, M. S., & Maaza, M. (2015). Green synthesis of ZnO nanoparticles via Agathosma betulina natural extract. *Materials Letters*, *161*, 124–127. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2015.08.052

Thirunavukkarasu, C., Archana, R., Sharmila, S., Janarthanan, B., & Chandrasekaran, J. (2016). Preparation and characterization of ZnO nanoparticles using Moringa Oleifera extract by green synthesis method. En *Asian Journal of Phytomedicine and Clinical Research* (Vol. 4, Número 3). www.uptodateresearchpublication.com

Tomlinson, I. (2013). Doubling food production to feed the 9 billion: A critical perspective on a key discourse of food security in the UK. *Journal of Rural Studies*, *29*, 81–90. https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2011.09.001

Vázquez-Núñez, E. (2022a). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, *16*(30), 1e–25e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704

Vázquez-Núñez, E. (2022b). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, *16*(30), 1e–25e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704

Vera Nuñez, L. del C., & Tamo Cornejo, J. O. (2018). *Biosíntesis y caracterización de nanopartículas de plata (AgNPs) con Thelypteris glandulosolanosa (Raqui-Raqui) y evaluación de su efecto anticancerígeno en linea celular de cáncer de mama MCF-7* [Universidad Nacional de San Agustin]. http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5963/QUvenuldc.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vergara, E. G. C., Hernández, A. R. L., Rivas, N. V. G., García, U. P., & Martínez, A. M. M. (2022). Efecto de la conductividad y el Potencial Z sobre sistemas suelo-tensoactivo. *South Florida Journal of Development*, *3*(4), 5319–5326. https://doi.org/10.46932/sfjdv3n4-098

Wagman, D. D., Evans, W. H., Parker, V. B., Schumm, R. H., Halow, I., Bailey, S. M., Churney, K. L., & Nuttall, R. L. (1982). The NBS tables of chemical thermodynamic properties. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, *11*. https://srd.nist.gov/JPCRD/jpcrdS2Vol11.pdf

Wajiha Shabbir, S. (2024). International journal of pharmaceutical sciences. *Int. J. of Pharm. Sci*, *2*, 1232–1245. https://doi.org/10.5281/zenodo.12570882

Wang, Y., Zhang, C., Bi, S., & Luo, G. (2010). Preparation of ZnO nanoparticles using the direct precipitation method in a membrane dispersion micro-structured reactor. *Powder Technology*, *202*(1–3), 130–136. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.04.027

Wang, Z., Wang, S., Ma, T., Liang, Y., Huo, Z., & Yang, F. (2023). Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Applications in Enhancing Plant Stress Resistance: A Review.

En *Agronomy* (Vol. 13, Número 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/agronomy13123060

Wang, Z., Wu, A., Colombi Ciacchi, L., & Wei, G. (2018). *Recent Advances in Nanoporous Membranes for Water Purification*. https://doi.org/10.3390/nano8020065

Yang, Z., Chen, J., Dou, R., Gao, X., Mao, C., & Wang, L. (2015). Assessment of the phytotoxicity of metal oxide nanoparticles on two crop plants, maize (Zea mays L.) and rice (Oryza sativa L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *12*(12), 15100–15109. https://doi.org/10.3390/ijerph121214963

Zahra, Z., Habib, Z., Chung, S., & Badshah, M. A. (2020). Exposure route of TiO2 nps from industrial applications to wastewater treatment and their impacts on the agro-environment. En *Nanomaterials* (Vol. 10, Número 8, pp. 1–22). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/nano10081469

Zhang, R., Zhang, H., Tu, C., Hu, X., Li, L., Luo, Y., & Christie, P. (2015). Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn(II) ion to corn (Zea mays L.) and cucumber (Cucumis sativus L.) during germination. *Environmental science and pollution research international*, *22*(14), 11109–11117. https://doi.org/10.1007/S11356-015-4325-X

Zhou, X. Q., Hayat, Z., Zhang, D. D., Li, M. Y., Hu, S., Wu, Q., Cao, Y. F., & Yuan, Y. (2023). Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Modification, and Applications in Food and Agriculture. En *Processes* (Vol. 11, Número 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/pr11041193

APÉNDICE

Apéndice 1 Ejemplo de cálculo de compuestos fenólicos según método *Folin Ciocalteou*

Construcción de curva de calibración

Se prepara una solución patrón de 0.1 g/L de ácido gálico. A partir de la solución madre se van a realizar 7 disoluciones, a concentraciones de 1, 2, 3, 5, 7, 8 y 10 mg/L, de modo que se obtengan 7 puntos para la curva.

Así para el primer punto de 1 mg/L se toma 1 mL de la solución patrón y se completa con agua ultrapura hasta 10 mL de solución, siendo la concentración resultante de ácido gálico:

$$0.1\frac{g}{L} \times \frac{1\ mL}{10\ mL} = 0.01\frac{g}{L}$$

De esta solución se tomarán 0.5 mL de solución madre y se le añadirá 2.5 mL de reactivo Folin-Ciocalteu y 2 mL de Na_2CO_3, teniéndose un volumen total 5 mL.

$$0.01\frac{g}{L} \times \frac{0.5\ mL}{5\ mL} = 0.001\frac{g}{L} = 1\frac{mg}{L}$$

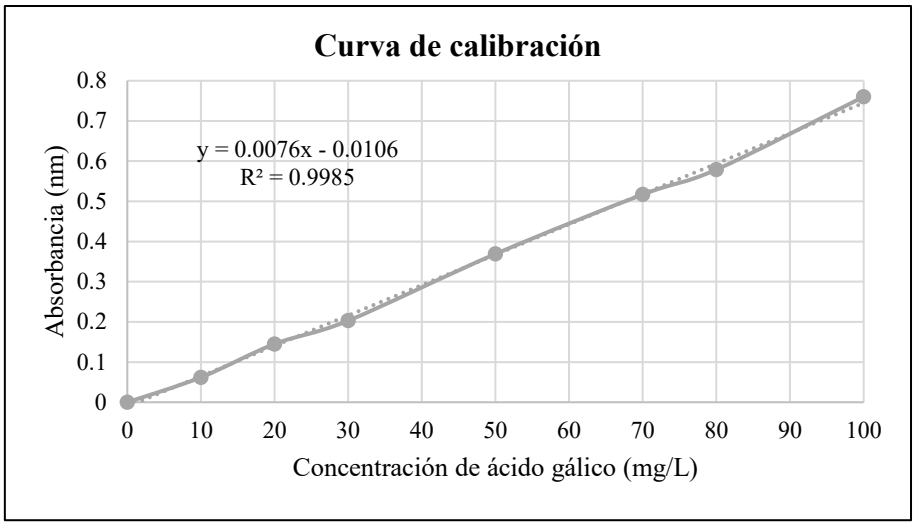
Lo mismo para los otros puntos se toma 2 mL, 3 mL, 5 mL, 7 mL, 8 mL y 10 mL se diluye en agua ultrapura hasta tener 10 mL de solución. El último punto de la curva no se diluye, directamente se añaden los reactivos. Los resultados de absorbancia para cada punto se muestran en la Tabla 25.

Tabla 27 Curva de calibración de ácido gálico del método Folin-Ciocalteou

Concentración de ácido gálico (mg/L)	Absorbancia (nm)
0	0
10	0.062
20	0.145
30	0.203
50	0.369
70	0.517
80	0.579
100	0.760

Luego, se construye la curva en Excel de modo que se obtenga la ecuación de la curva de calibración.

Figura 48 Relación entre absorbancia y concentración de ácido gálico



Así, la ecuación de la curva queda definida como:

$$\text{Absorbancia} = 0.0076\,[\text{Ácido gálico}] - 0.0106$$

Despejando la concentración de ácido gálico se tiene:

$$[\text{Ácido gálico}] = \frac{\text{Absorbancia} + 0.0106}{0.0076}$$

Cálculo de la cantidad de compuesto fenólicos en términos de ácido gálico

Se prepara la muestra del extracto de hoja de *Moringa oleífera* y se mide su absorbancia. Para ello se toman 20 mL de extracto de hoja de *Moringa Oleifera* que tiene una concentración de 30 g/L, luego se sigue el procedimiento que se realizó para cada punto y se mide la absorbancia. La absorbancia resulta 0.317 nm, de forma que su concentración de ácido gálico se calcula como:

$$[\text{Ácido gálico}] = \frac{0.317 + 0.0106}{0.0076}$$

$$[\text{Ácido gálico}] = 295\ \text{mg/L}$$

Posteriormente, integrando los factores de dilución, la cantidad de compuestos fenólicos en términos de ácido gálico para el extracto de *Moringa Oleifera* se tiene:

$$[\text{Ácido gálico}] = 295\frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1\text{ L}}{30\text{ g}} \times \left(\frac{200\text{ mL extracto de hoja } Moringa\ oleifera}{20\text{ mL extracto de hoja } Moringa\ oleifera}\right)$$

$$[\text{Ácido gálico}] = \frac{983.77\text{ mg Ácido gálico}}{100\text{ g hoja } Moringa\ oleifera}$$

Apéndice 2 Análisis estadístico

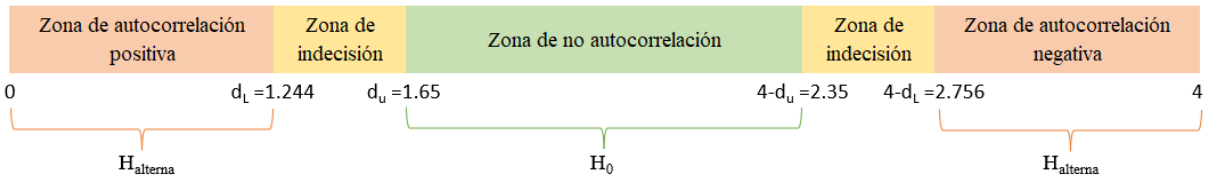
Supuesto del ANOVA de los factores. Tamaño de nanopartícula

Prueba de independencia de Durbin-Watson para el tamaño de nanopartícula de Óxido de Zinc sintetizada por el método verde.

Considerando que el nivel de significancia (α) es de 0.05, se tiene la siguiente ecuación de Durbin-Watson

$$d = \frac{\sum_{i=2}^{n}((e_i - e_{i-1})^2)}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

Así mismo, se tiene la siguiente escala de autocorrelación para poder determinar si existe o no auto correlación en el modelo.



Donde:

H_0= No existe autocorrelación

$H_{alterna}$= Sí existe autocorrelación

Tabla 28 Prueba de independencia de los factores para el tamaño de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método verde

			Y_i					
Ratio	Temperatura	Tiempo	Tamaño	Y_I	e_i	$e_i-(e_{i-1})$	$(e_i-(e_{i-1})^2)$	e_i^2
4	400	2	16.2	18.18	-1.98			3.9204
4	400	3	24	22.4	1.6	3.58	12.8164	2.56
4	500	2	29.5	32.4	-2.9	-4.5	20.25	8.41
4	500	3	29.7	32.37	-2.67	0.23	0.0529	7.1289
8	400	2	21.4	21.06	0.34	3.01	9.0601	0.1156

8	400	3	26.7	27.2	-0.5	-0.84	0.7056	0.25
8	500	2	32.6	30.6	2	2.5	6.25	4
8	500	3	39.4	36.09	3.31	1.31	1.7161	10.9561
4	400	2	21.8	18.18	3.62	0.31	0.0961	13.1044
4	400	3	22.7	22.4	0.3	-3.32	11.0224	0.09
4	500	2	32.6	32.4	0.2	-0.1	0.01	0.04
4	500	3	34.8	32.37	2.43	2.23	4.9729	5.9049
8	400	2	21.4	21.06	0.34	-2.09	4.3681	0.1156
8	400	3	27.5	27.2	0.3	-0.04	0.0016	0.09
8	500	2	30.8	30.6	0.2	-0.1	0.01	0.04
8	500	3	34.2	36.09	-1.89	-2.09	4.3681	3.5721
4	400	2	13.5	18.18	-4.68	-2.79	7.7841	21.9024
4	400	3	21.5	22.4	-0.9	3.78	14.2884	0.81
4	500	2	34.8	32.4	2.4	3.3	10.89	5.76
4	500	3	32.5	32.37	0.13	-2.27	5.1529	0.0169
8	400	2	21.1	21.06	0.04	-0.09	0.0081	0.0016
8	400	3	25.5	27.2	-1.7	-1.74	3.0276	2.89
8	500	2	32.5	30.6	1.9	3.6	12.96	3.61
8	500	3	34.9	36.09	-1.19	-3.09	9.5481	1.4161
4	400	2	21.5	18.18	3.32	4.51	20.3401	11.0224
4	400	3	21.6	22.4	-0.8	-4.12	16.9744	0.64
4	500	2	33.1	32.4	0.7	1.5	2.25	0.49
4	500	3	32.8	32.37	0.43	-0.27	0.0729	0.1849
8	400	2	20.8	21.06	-0.26	-0.69	0.4761	0.0676
8	400	3	29.5	27.2	2.3	2.56	6.5536	5.29
8	500	2	27.1	30.6	-3.5	-5.8	33.64	12.25
8	500	3	36.4	36.09	0.31	3.81	14.5161	0.0961
						Suma	234.1827	126.746

Reemplazando los valores calculados en la ecuación de Durbin-Watson, se tiene que:

$$d = \frac{234.1827}{126.746}$$

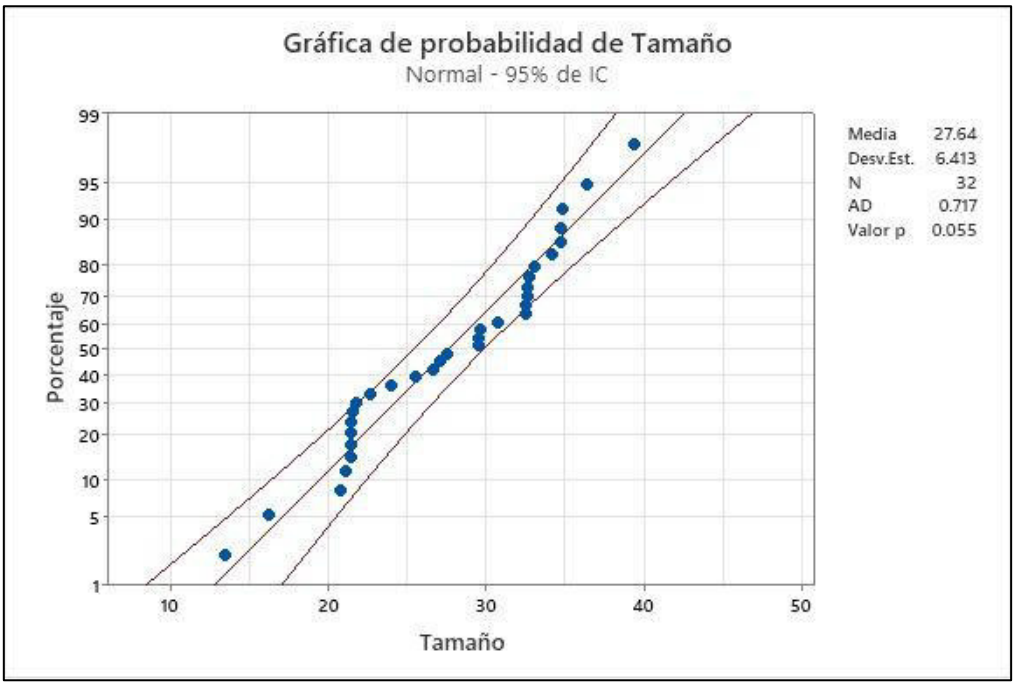
$$d = 1.847$$

Este valor se encuentra dentro del rango correspondiente a la zona donde no existe autocorrelación, por lo que se acepta la hipótesis nula de no autocorrelación. En consecuencia, se concluye que el modelo no presenta evidencia de autocorrelación.

Prueba de normalidad de Anderson-Darling para el tamaño de nanopartícula de Óxido de Zinc sintetizada por el método verde.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05. Si se cumple que el valor generado de p es mayor a 0.05, entonces los datos empleados se ajustan a una distribución normal.

Figura 49 Gráfica de probabilidad del tamaño hidrodinámico de la nanopartícula de ZnO sintetizada por el método verde

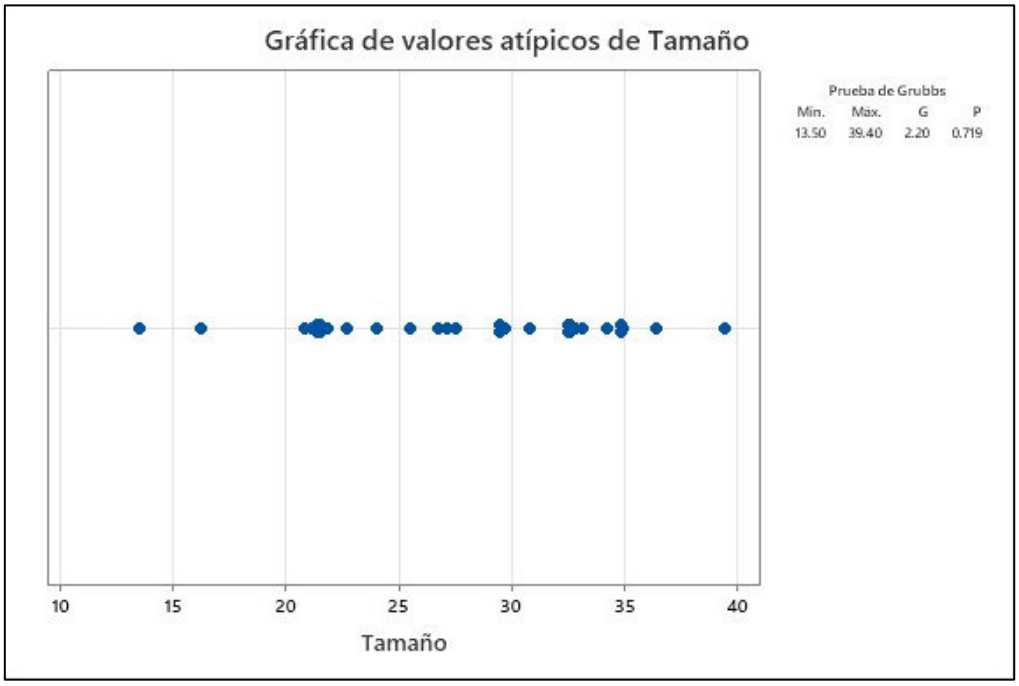


El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab 21 es de 0.055, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que los datos de tamaño de nanopartícula sintetizadas por el método verde se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Grubbs para valores atípicos para el tamaño de nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método verde.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05 y nos permite detectar un solo valor atípico. En caso se indique la presencia de valores atípicos, se recomienda utilizar la prueba de Dixon para detectar uno o más valores atípicos.

Figura 50 Gráfica de valores atípicos de tamaño hidrodinámico de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde



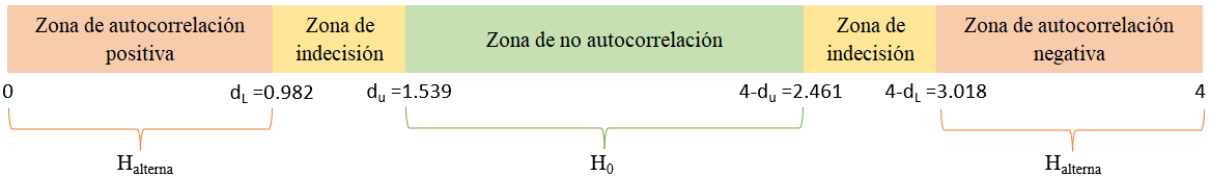
El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab 21 es de 0.719, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que en los datos obtenidos experimentalmente de tamaño de nanopartícula sintetizadas por el método verde no existen valores atípicos.

Prueba de independencia de Durbin-Watson para el tamaño de nanopartícula de Óxido de Zinc sintetizada por el método químico.

Considerando que el nivel de significancia (α) es de 0.05, se tiene la siguiente ecuación de Durbin-Watson

$$d = \frac{\sum_{i=2}^{n}((e_i - e_{i-1})^2)}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

Así mismo, se tiene la siguiente escala de autocorrelación para poder determinar si existe o no auto correlación en el modelo.



Donde:

H_0= No existe autocorrelación

$H_{alterna}$= Sí existe autocorrelación

Tabla 29 Prueba de independencia de los factores para el tamaño de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método químico

		Y_i					
Temperatura	Tiempo	Tamaño	Y_1	e_i	$e_i-(e_{i-1})$	$(e_i-(e_{i-1})^2)$	e_i^2
500	2	43.1	42	1.1			1.21
500	3	62.4	57.35	5.05	3.95	15.6025	25.5025
500	2	37.9	42	-4.1	-9.15	83.7225	16.81
500	3	54.9	57.35	-2.45	1.65	2.7225	6.0025
500	2	43.5	42	1.5	3.95	15.6025	2.25
500	3	59.9	57.35	2.55	1.05	1.1025	6.5025
500	2	43.5	42	1.5	-1.05	1.1025	2.25
500	3	52.1	57.35	-5.25	-6.75	45.5625	27.5625
400	2	26.3	25.66	0.64	5.89	34.6921	0.4096
400	3	32.5	33.84	-1.34	-1.98	3.9204	1.7956
400	2	25.5	25.66	-0.16	1.18	1.3924	0.0256
400	3	32.4	33.84	-1.44	-1.28	1.6384	2.0736
400	2	21.6	25.66	-4.06	-2.62	6.8644	16.4836
400	3	32.5	33.84	-1.34	2.72	7.3984	1.7956
400	2	29.2	25.66	3.54	4.88	23.8144	12.5316
400	3	37.8	33.84	3.96	0.42	0.1764	15.6816
					Suma	245.3144	138.8868

Reemplazando los valores calculados en la ecuación de Durbin-Watson, se tiene que:

$$d = \frac{245.3144}{138.8868}$$

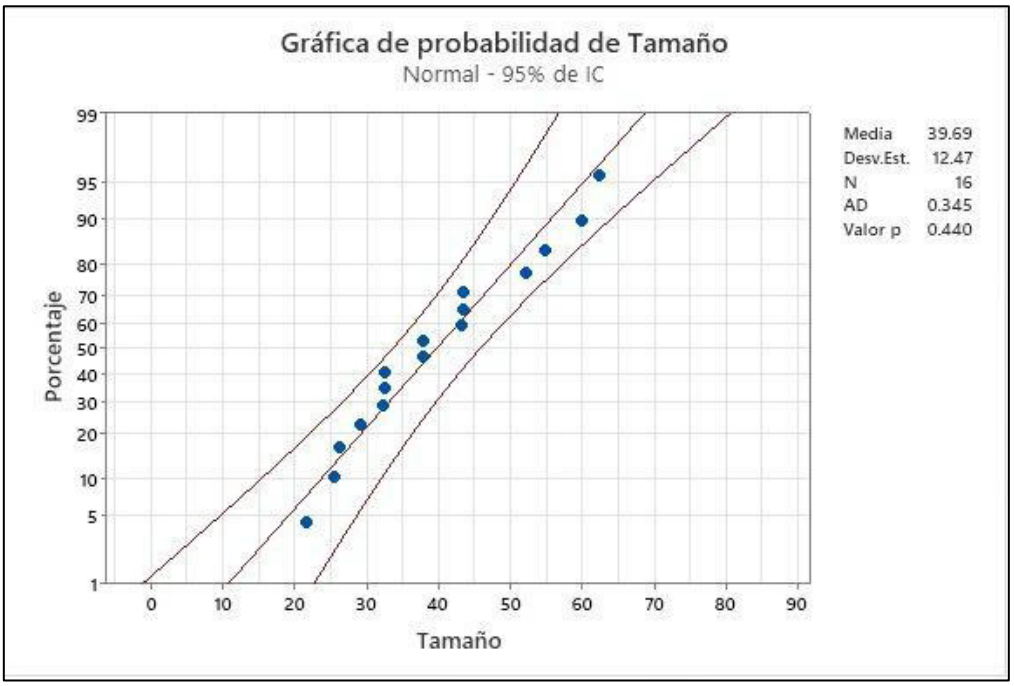
$$d = 1.766$$

Este valor se encuentra dentro del rango correspondiente a la zona donde no existe autocorrelación, por lo que se acepta la hipótesis nula de no autocorrelación. En consecuencia, se concluye que el modelo no presenta evidencia de autocorrelación.

Prueba de normalidad de Anderson-Darling para el tamaño de nanopartícula de Óxido de Zinc sintetizada por el método químico.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05. Si se cumple que el valor generado de p es mayor a 0.05, entonces los datos empleados se ajustan a una distribución normal.

Figura 51 Gráfica de probabilidad del tamaño hidrodinámico de nanopartículas de ZnO sintetizada por el método químico

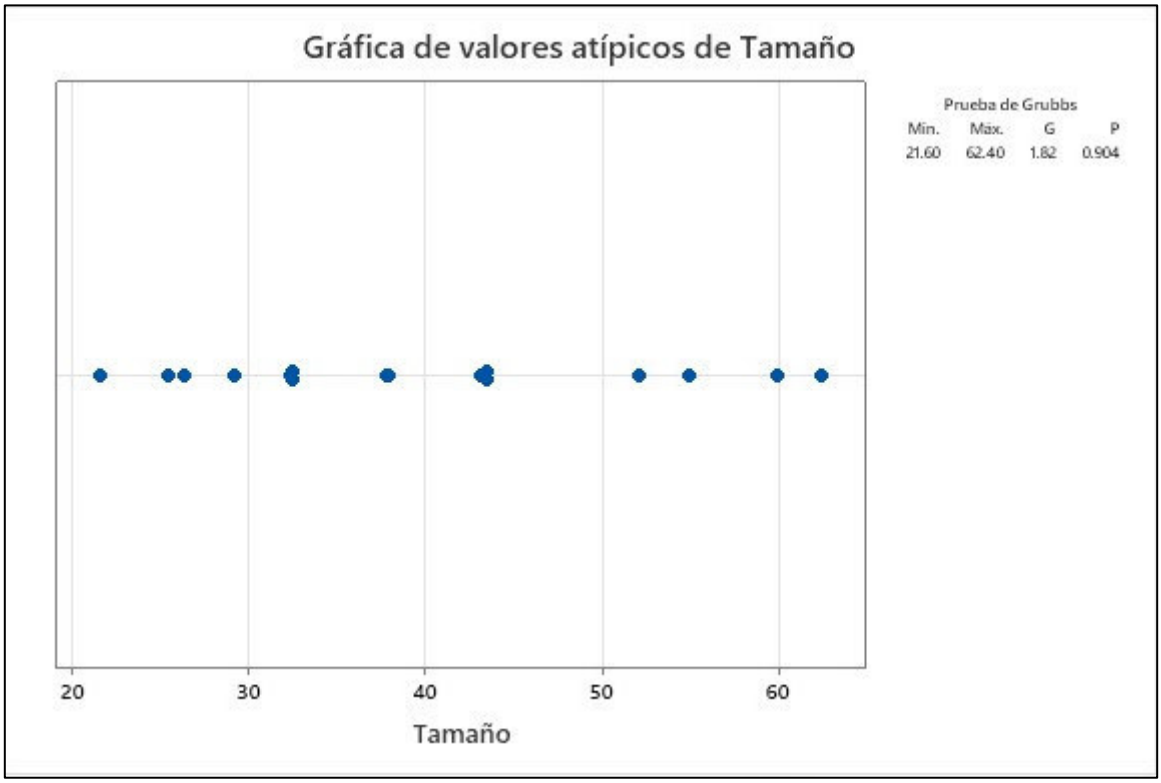


El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab 21 es de 0.44, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que los datos de tamaño de nanopartícula sintetizadas por el método químico se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Grubbs para valores atípicos para el tamaño de nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método químico.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05 y nos permite detectar un solo valor atípico. En caso se indique la presencia de valores atípicos, se recomienda utilizar la prueba de Dixon para detectar uno o más valores atípicos.

Figura 52 Gráfica de valores atípicos de tamaño hidrodinámico de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método químico



El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab 21 es de 0.904, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que en los datos obtenidos experimentalmente de tamaño de nanopartícula sintetizadas por el método verde no existen valores atípicos.

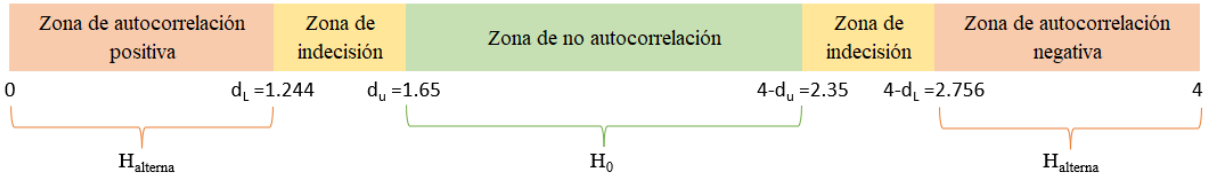
Apéndice 3 Supuesto del ANOVA de los factores. Potencial Z

Prueba de independencia de Durbin-Watson para el potencial Z de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método verde.

Considerando que el nivel de significancia (α) es de 0.05, se tiene la siguiente ecuación de Durbin-Watson

$$d = \frac{\sum_{i=2}^{n}((e_i - e_{i-1})^2)}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

Así mismo, se tiene la siguiente escala de autocorrelación para poder determinar si existe o no auto correlación en el modelo.



Donde:

H_0= No existe autocorrelación

$H_{alterna}$= Sí existe autocorrelación

Tabla 30 Prueba de independencia de los factores para el potencial Z de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método verde

			Y_i					
Ratio	Temperatura	Tiempo	Pot. Z	Y_1	e_i	e_i-(e_{i-1})	(e_i-(e_{i-1}))^2	e_i^2
8	500	2	20.62	18.17	2.45			6.0025
8	500	3	19.51	18.87	0.64	-1.81	3.2761	0.4096
8	500	2	19.16	18.17	0.99	0.35	0.1225	0.9801
8	500	3	18.97	18.87	0.1	-0.89	0.7921	0.01
8	500	2	18.82	18.17	0.65	0.55	0.3025	0.4225
8	500	3	18.82	18.87	-0.05	-0.7	0.49	0.0025
8	500	2	18.37	18.17	0.2	0.25	0.0625	0.04
8	500	3	17.86	18.87	-1.01	-1.21	1.4641	1.0201
8	400	2	17.7	16.476	1.224	2.234	4.990756	1.498176
8	400	3	17.66	17.988	-0.328	-1.552	2.408704	0.107584
8	400	2	17.33	16.476	0.854	1.182	1.397124	0.729316
8	400	3	17	17.988	-0.988	-1.842	3.392964	0.976144
8	400	2	16.8	16.476	0.324	1.312	1.721344	0.104976
8	400	3	16.8	17.988	-1.188	-1.512	2.286144	1.411344
8	400	2	16.42	16.476	-0.056	1.132	1.281424	0.003136
8	400	3	16.3	17.988	-1.688	-1.632	2.663424	2.849344
4	500	2	16.12	14.06	2.06	3.748	14.047504	4.2436
4	500	3	16	15.81	0.19	-1.87	3.4969	0.0361
4	500	2	15.46	14.06	1.4	1.21	1.4641	1.96
4	500	3	15.32	15.81	-0.49	-1.89	3.5721	0.2401
4	500	2	15.2	14.06	1.14	1.63	2.6569	1.2996
4	500	3	14.84	15.81	-0.97	-2.11	4.4521	0.9409
4	500	2	14.81	14.06	0.75	1.72	2.9584	0.5625
4	500	3	14.81	15.81	-1	-1.75	3.0625	1
4	400	2	14.79	12.288	2.502	3.502	12.264004	6.260004
4	400	3	14.76	13.284	1.476	-1.026	1.052676	2.178576
4	400	2	14.74	12.288	2.452	0.976	0.952576	6.012304
4	400	3	14.39	13.284	1.106	-1.346	1.811716	1.223236
4	400	2	14.25	12.288	1.962	0.856	0.732736	3.849444

4	400	3	14.09	13.284	0.806	-1.156	1.336336	0.649636
4	400	2	14.03	12.288	1.742	0.936	0.876096	3.034564
4	400	3	13.25	13.284	-0.034	-1.776	3.154176	0.001156
						Suma	**84.542504**	**50.05904**

Reemplazando los valores calculados en la ecuación de Durbin-Watson, se tiene que:

$$d = \frac{84.542}{50.059}$$

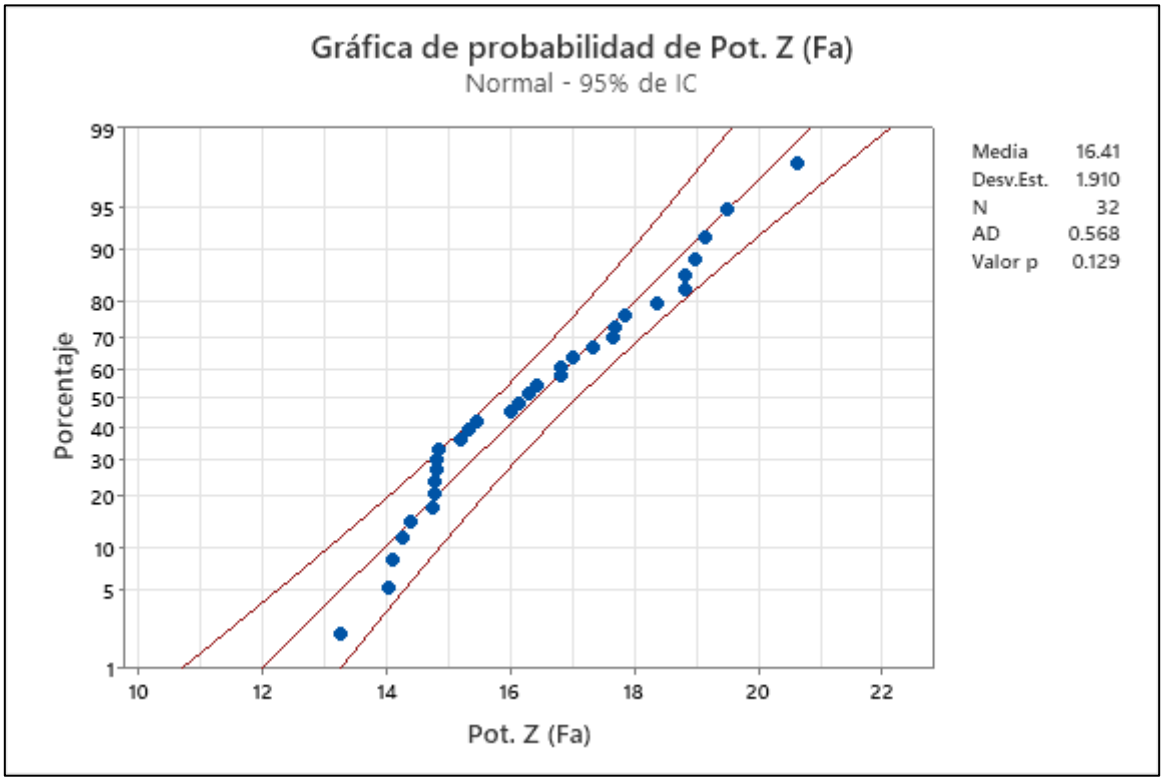
$$d = 1.688$$

Este valor se encuentra dentro del rango correspondiente a la zona donde no existe autocorrelación, por lo que se acepta la hipótesis nula de no autocorrelación. En consecuencia, se concluye que el modelo no presenta evidencia de autocorrelación.

Prueba de normalidad de Anderson-Darling para el Potencial Z de nanopartícula de Óxido de Zinc sintetizada por el método verde.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05. Si se cumple que el valor generado de p es mayor a 0.05, entonces los datos empleados se ajustan a una distribución normal.

Figura 53 Gráfica de probabilidad del Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde

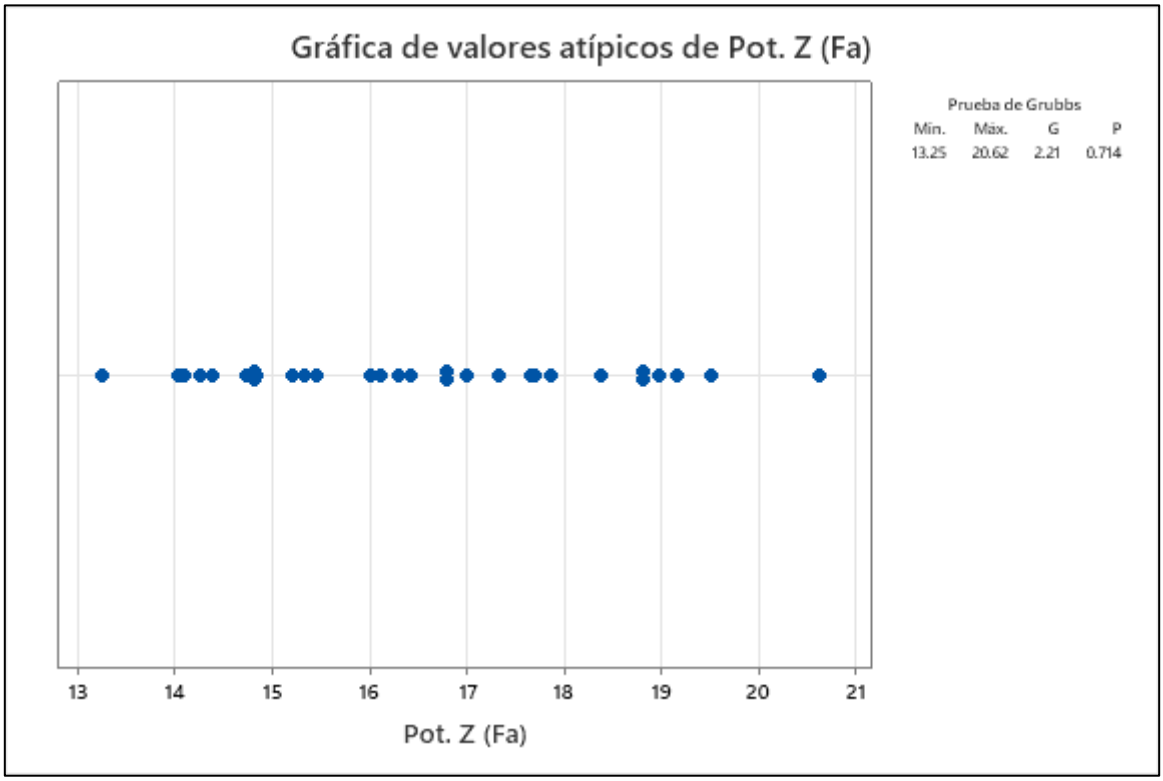


El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab21 es de 0.129, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que los datos de potencial Z de las nanopartículas sintetizadas por el método verde se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Grubbs para valores atípicos para el Potencial Z de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método verde.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05 y nos permite detectar un solo valor atípico. En caso se indique la presencia de valores atípicos, se recomienda utilizar la prueba de Dixon para detectar uno o más valores atípicos.

Figura 54 Gráfica de valores atípicos de Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método verde



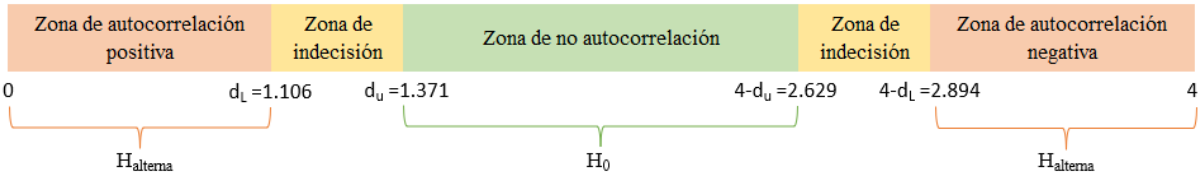
El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab 21 es de 0.714, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que en los datos obtenidos experimentalmente del potencial Z de las nanopartículas sintetizadas por el método verde no existen valores atípicos.

Prueba de independencia de Durbin-Watson para el potencial Z de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método químico.

Considerando que el nivel de significancia (α) es de 0.05, se tiene la siguiente ecuación de Durbin-Watson

$$d = \frac{\sum_{i=2}^{n}((e_i - e_{i-1})^2)}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

Así mismo, se tiene la siguiente escala de autocorrelación para poder determinar si existe o no auto correlación en el modelo.



Donde:

H_0= No existe autocorrelación

$H_{alterna}$= Sí existe autocorrelación

Tabla 31 Prueba de independencia de los factores para el potencial Z de nanopartícula de ZnO sintetizada por el método químico

		Y_i					
Temperatura	Tiempo	Pot. Z	Y_1	e_i	$e_i-(e_{i-1})$	$(e_i-(e_{i-1})^2)$	e_i^2
500	2	24.88	26.12	-1.24			1.5376
500	3	29.18	26.68	2.5	3.74	13.9876	6.25
500	2	23.59	26.12	-2.53	-5.03	25.3009	6.4009
500	3	26.92	26.68	0.24	2.77	7.6729	0.0576
500	2	20.95	26.12	-5.17	-5.41	29.2681	26.7289
500	3	26.8	26.68	0.12	5.29	27.9841	0.0144
500	2	20.38	26.12	-5.74	-5.86	34.3396	32.9476
500	3	25.49	26.68	-1.19	4.55	20.7025	1.4161
400	2	16.06	16.86	-0.8	0.39	0.1521	0.64
400	3	19.05	19.36	-0.31	0.49	0.2401	0.0961
400	2	14.06	16.86	-2.8	-2.49	6.2001	7.84
400	3	18.56	19.36	-0.8	2	4	0.64
400	2	16.05	16.86	-0.81	-0.01	0.0001	0.6561
400	3	18.03	19.36	-1.33	-0.52	0.2704	1.7689
400	2	14.96	16.86	-1.9	-0.57	0.3249	3.61
400	3	18.01	19.36	-1.35	0.55	0.3025	1.8225
					Suma	**170.7459**	**92.4267**

Reemplazando los valores calculados en la ecuación de Durbin-Watson, se tiene que:

$$d = \frac{170.745}{92.426}$$

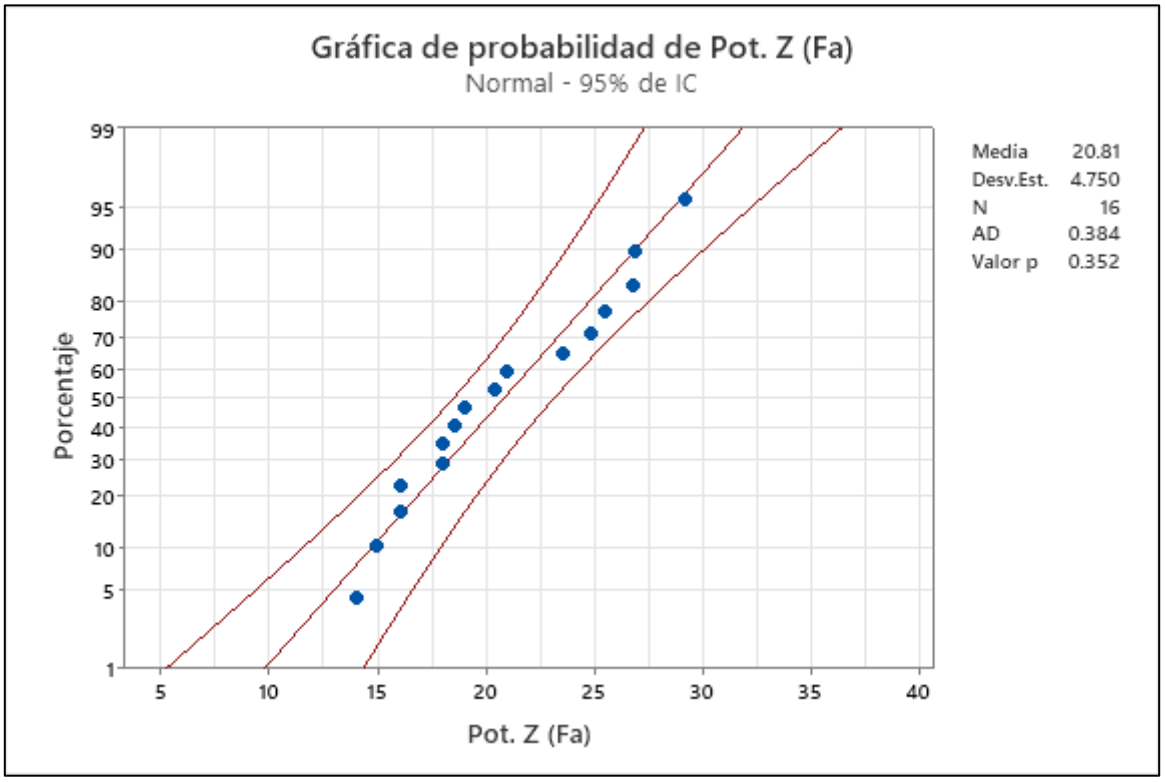
$$d = 1.847$$

Este valor se encuentra dentro del rango correspondiente a la zona donde no existe autocorrelación, por lo que se acepta la hipótesis nula de no autocorrelación. En consecuencia, se concluye que el modelo no presenta evidencia de autocorrelación.

Prueba de normalidad de Anderson-Darling para el Potencial Z de nanopartícula de Óxido de Zinc sintetizada por el método químico.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05. Si se cumple que el valor generado de p es mayor a 0.05, entonces los datos empleados se ajustan a una distribución normal.

Figura 55 Gráfica de probabilidad del Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico

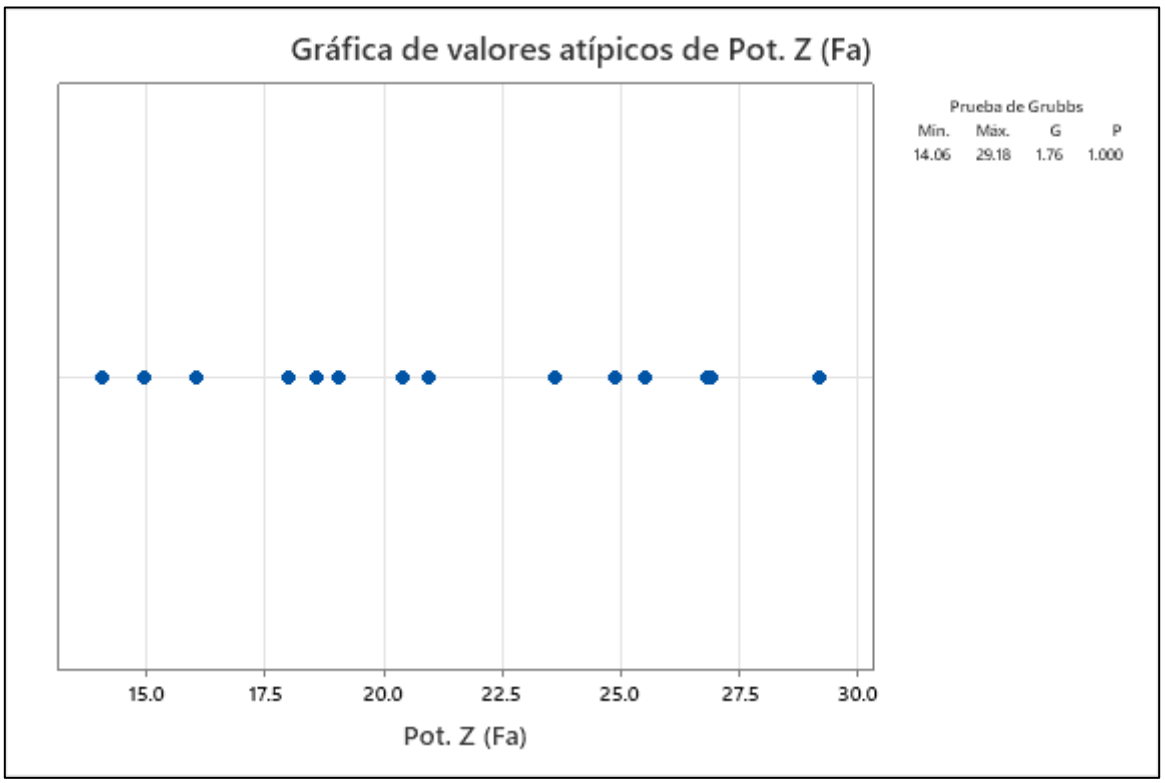


El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab21 es de 0.352, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que los datos de potencial Z de las nanopartículas sintetizadas por el método químico se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Grubbs para valores atípicos para el Potencial Z de las nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas por el método químico.

Esta prueba se realizó utilizando el software Minitab 21 con un nivel de significancia (α) de 0.05 y nos permite detectar un solo valor atípico. En caso se indique la presencia de valores atípicos, se recomienda utilizar la prueba de Dixon para detectar uno o más valores atípicos.

Figura 56 Gráfica de valores atípicos de Potencial Z de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método químico



El valor p que se obtuvo mediante el software Minitab 21 es de 1.000, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, se concluye que en los datos obtenidos experimentalmente del potencial Z de las nanopartículas sintetizadas por el método químico no existen valores atípicos.

Apéndice 4 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO por DLS

Figura 57 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO Q1

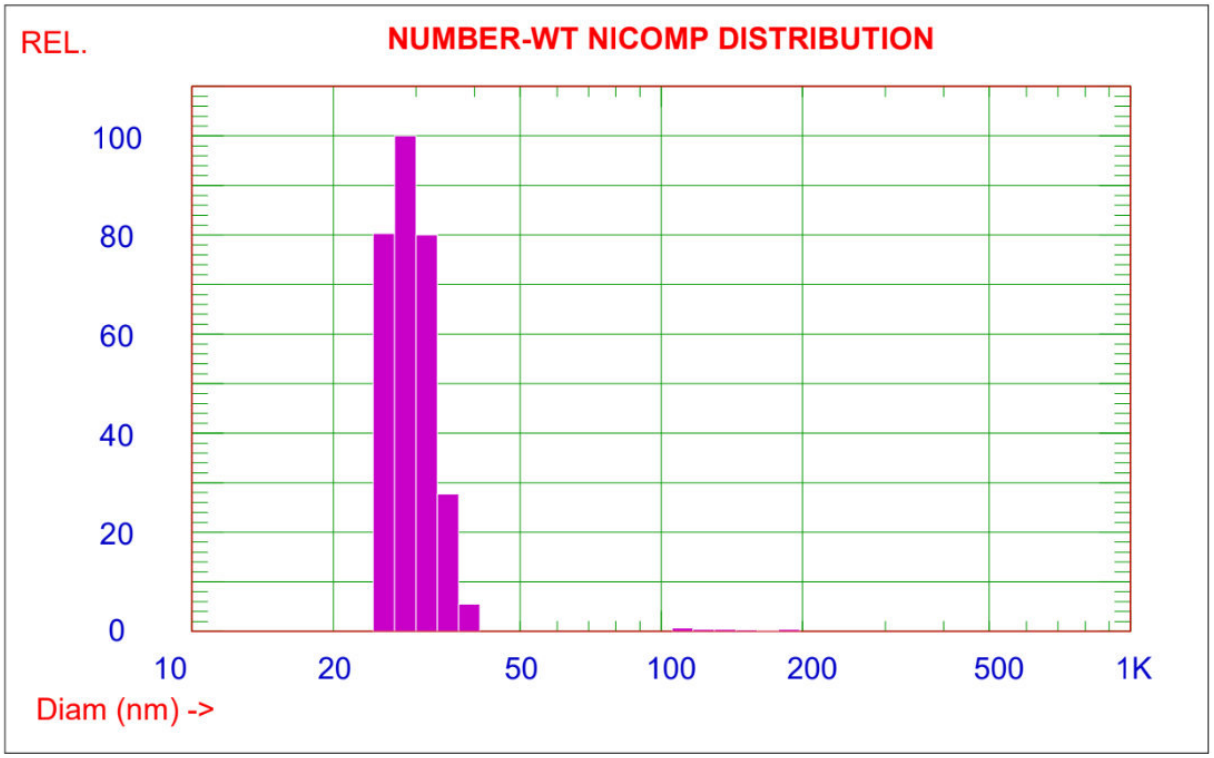


Figura 58 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO Q4

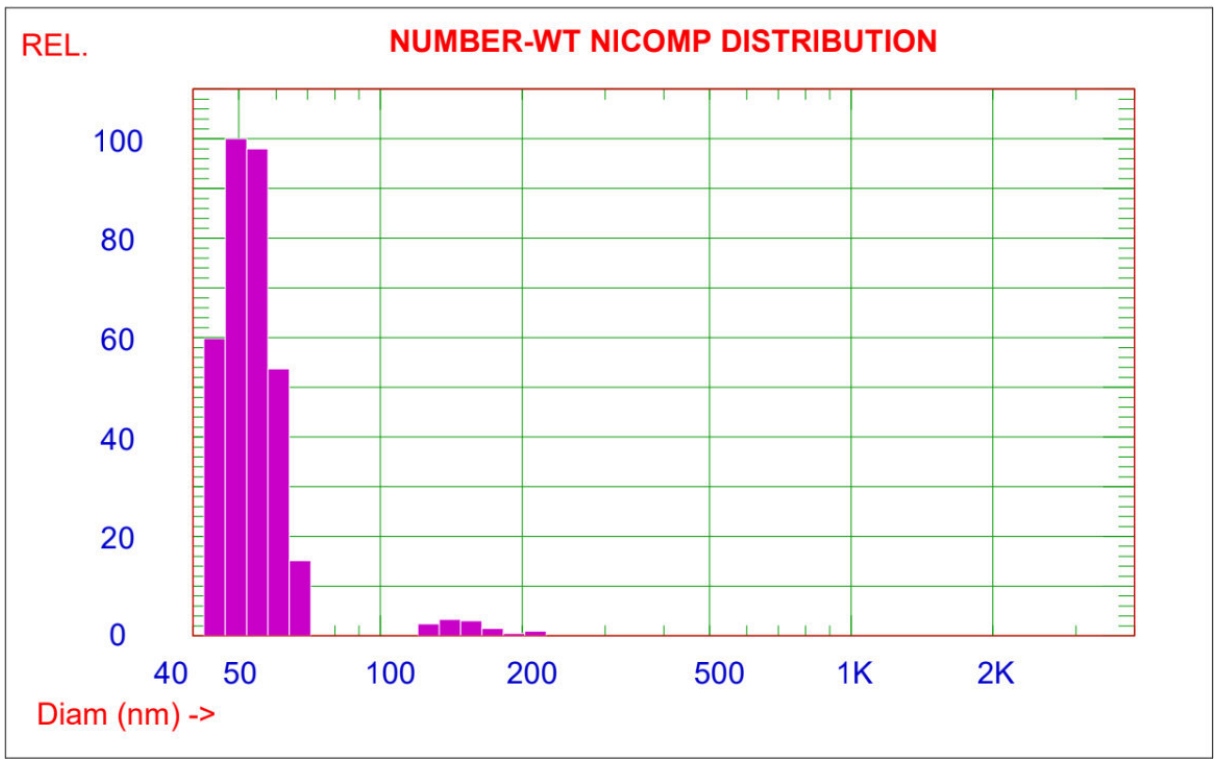


Figura 59 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V1

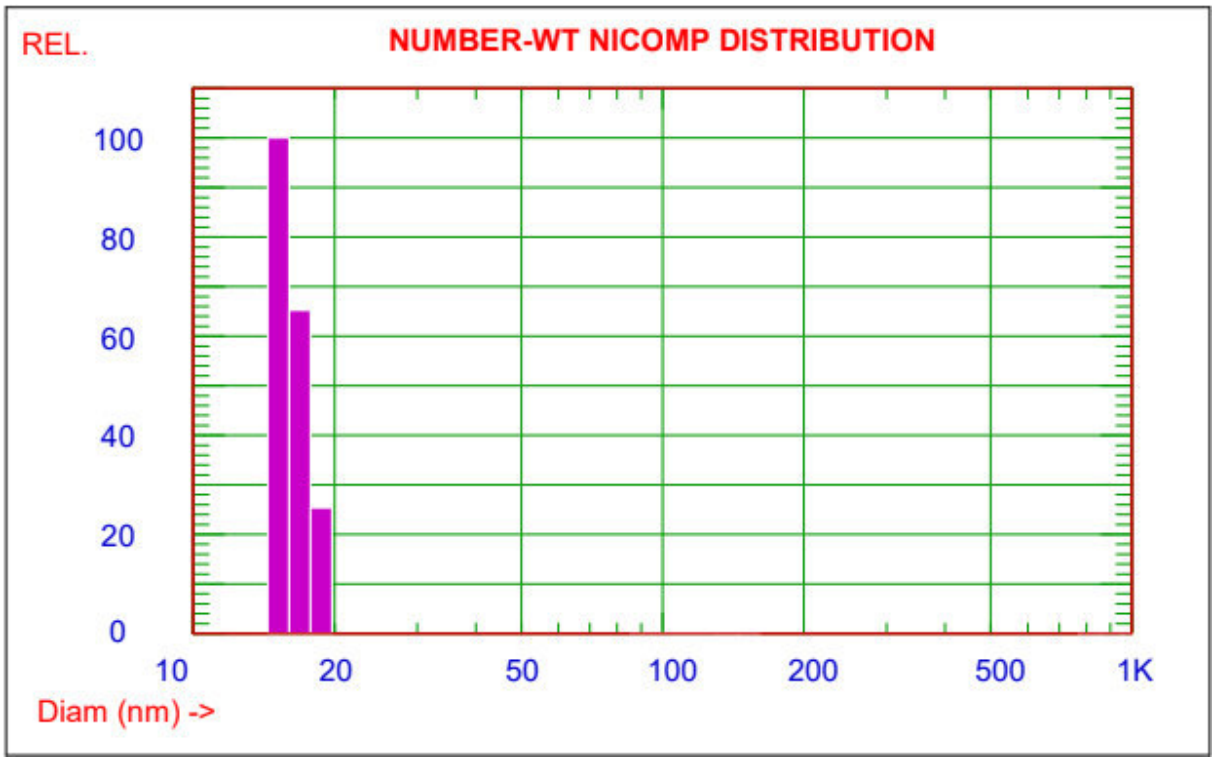


Figura 60 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V4

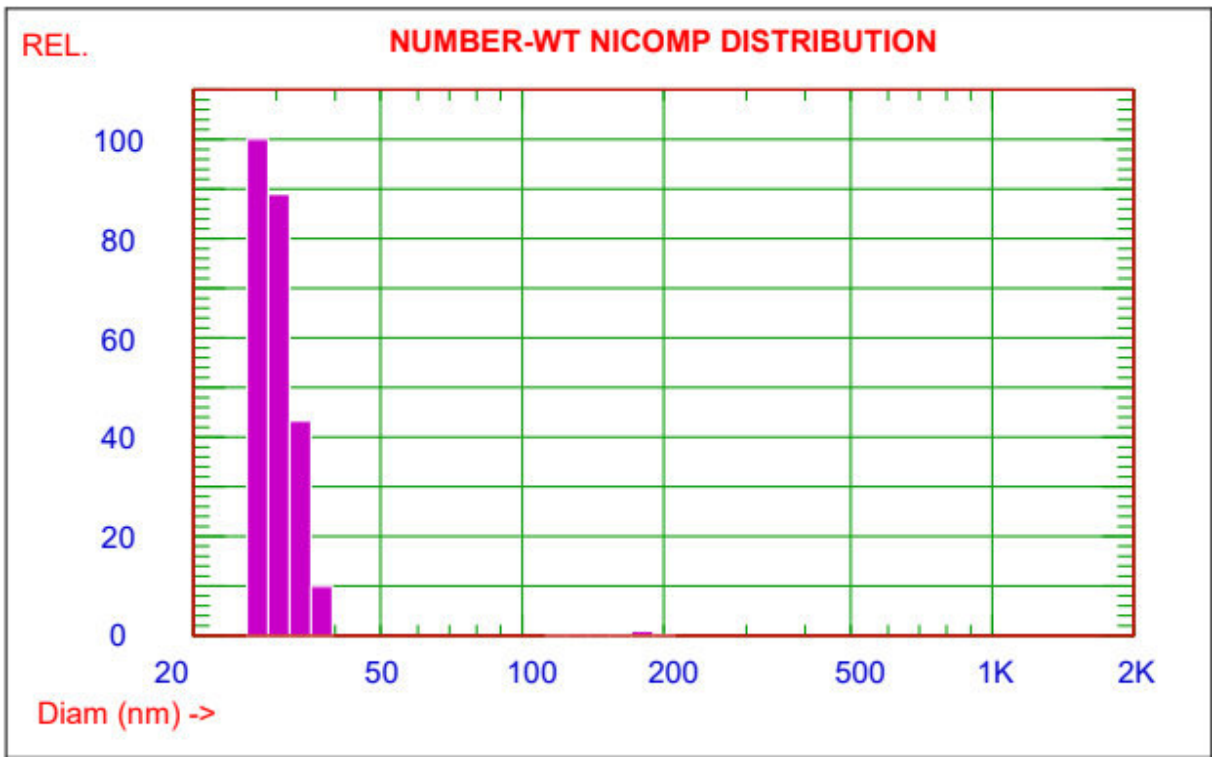


Figura 61 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V5

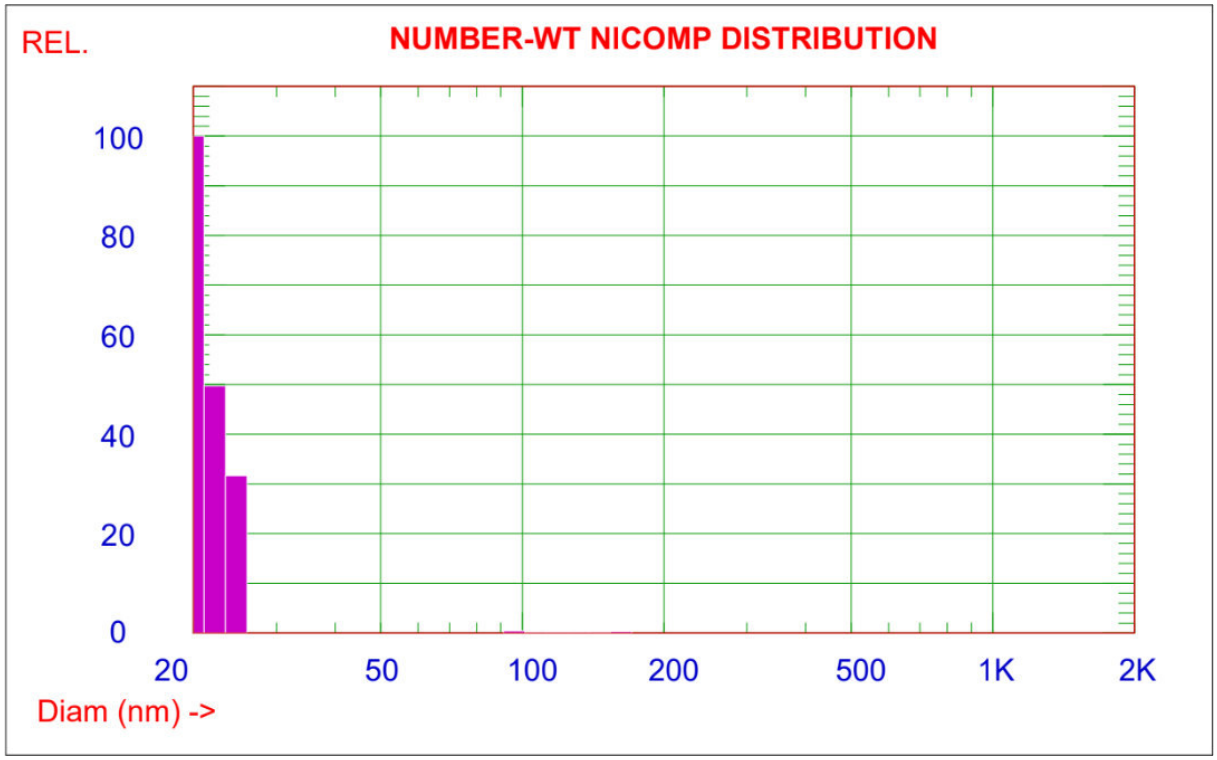
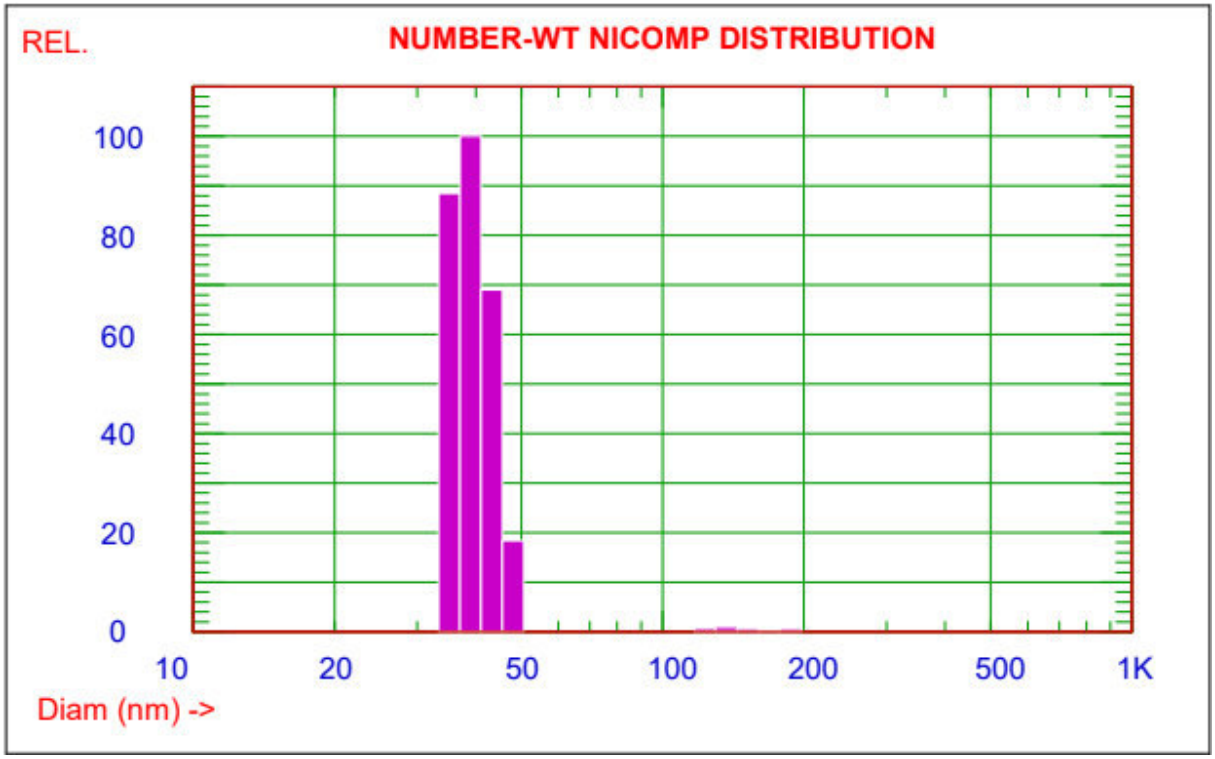


Figura 62 Tamaño de partícula hidrodinámico de NPsZnO V8



Apéndice 5 Potencial Z por la técnica de fase de las NPsZnO caracterizadas por DLS

Figura 63 Potencial Z de NPsZnO Q1

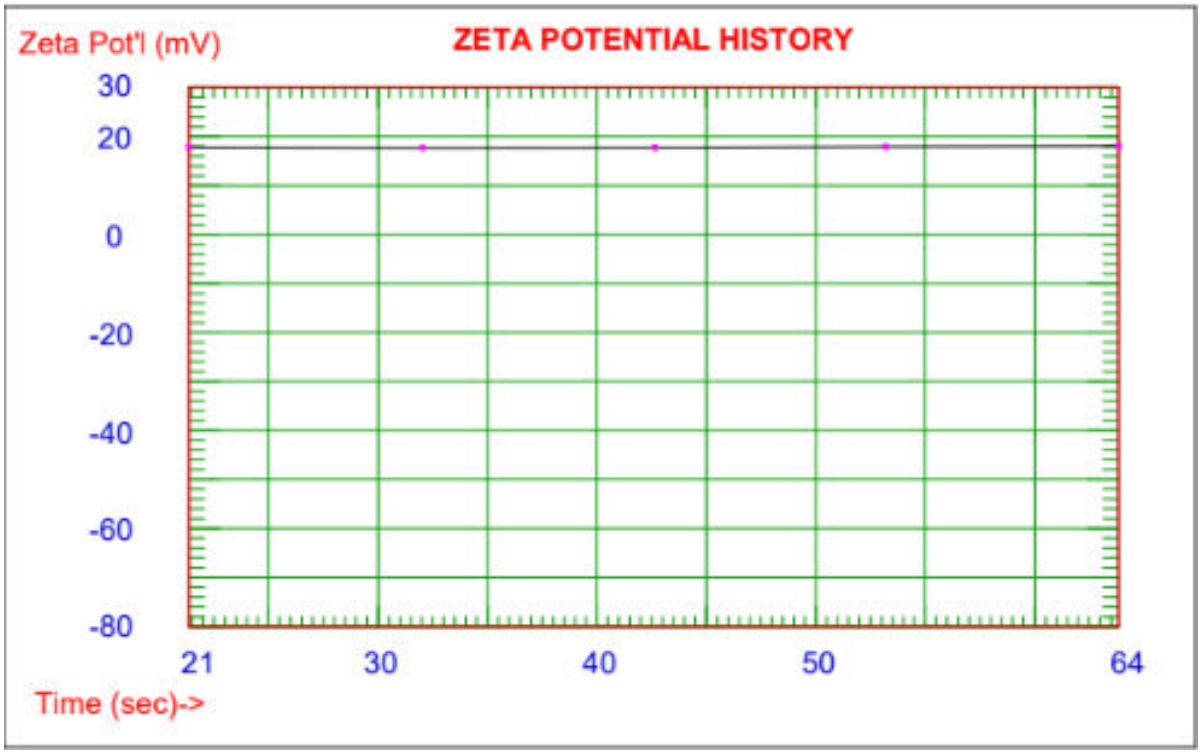


Figura 64 Potencial Z de NPsZnO Q4

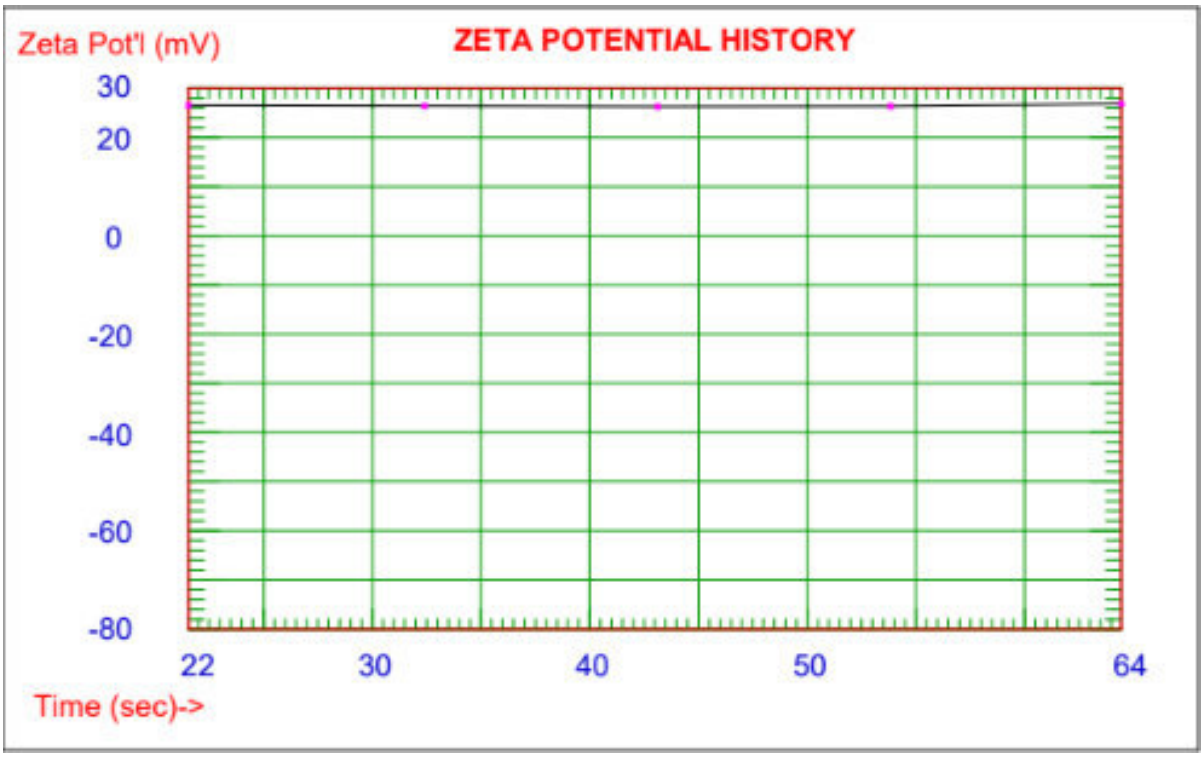


Figura 65 Potencial Z de NPsZnO V1

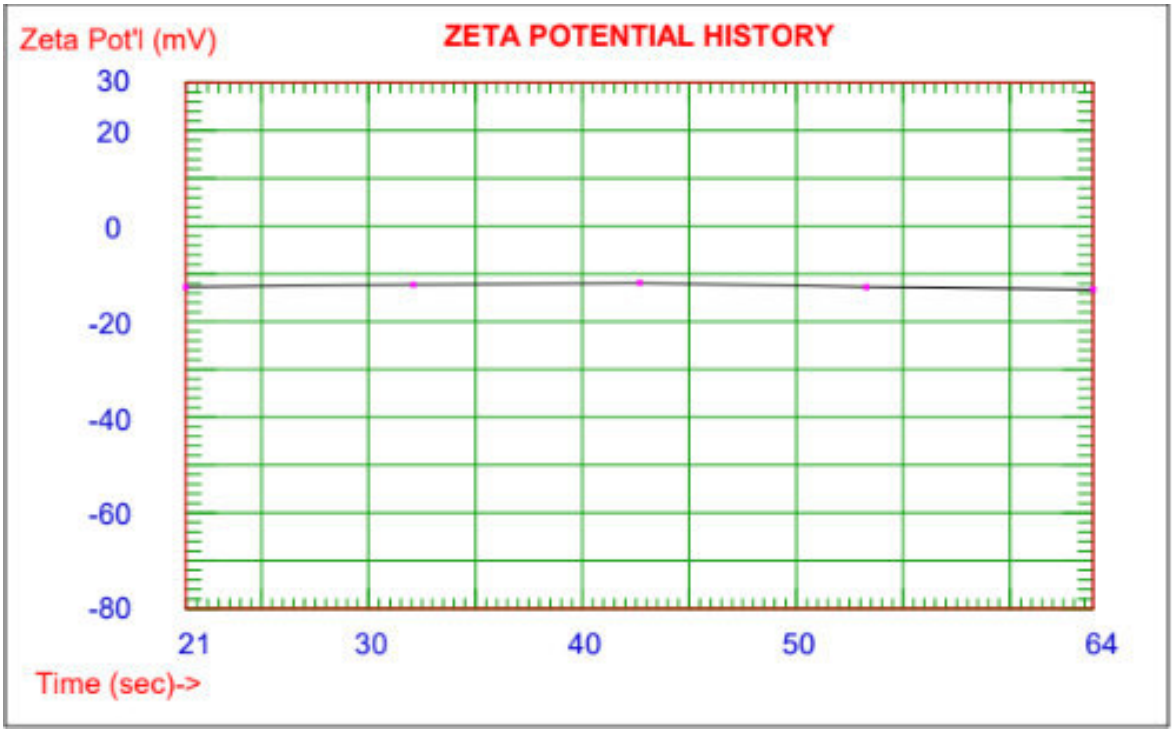


Figura 66 Potencial Z de NPsZnO V4

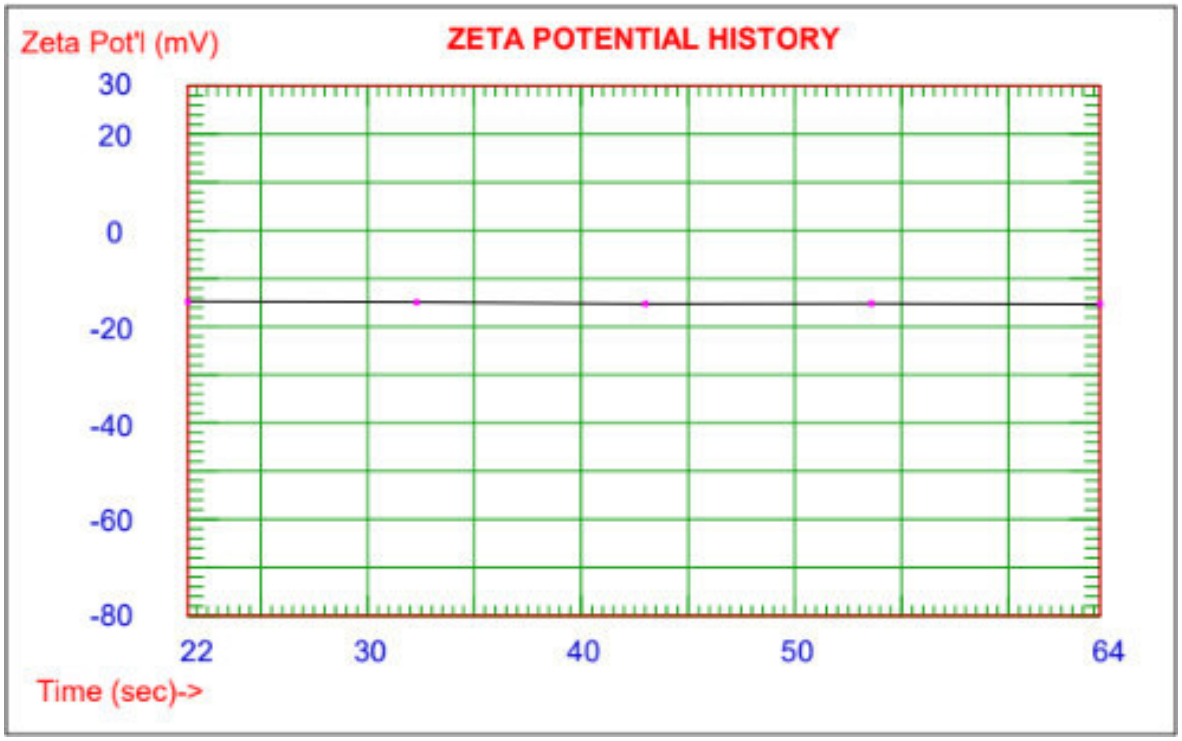


Figura 67 Potencial Z de NPsZnO V5

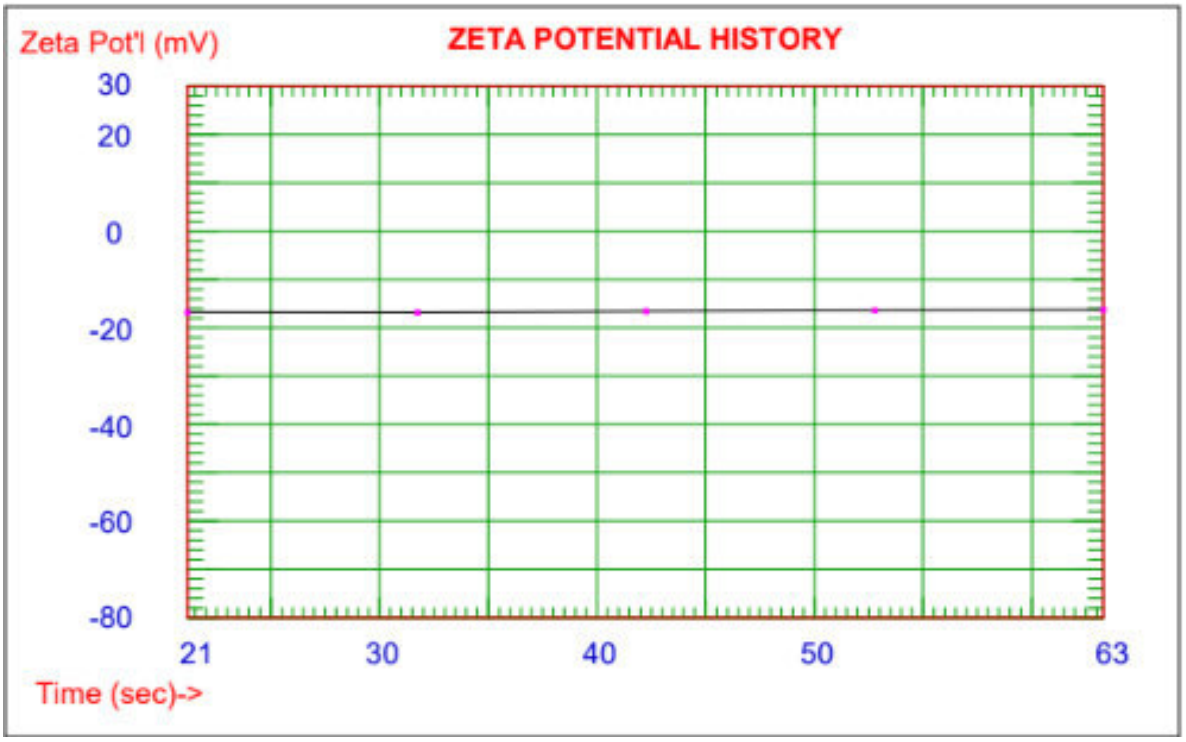
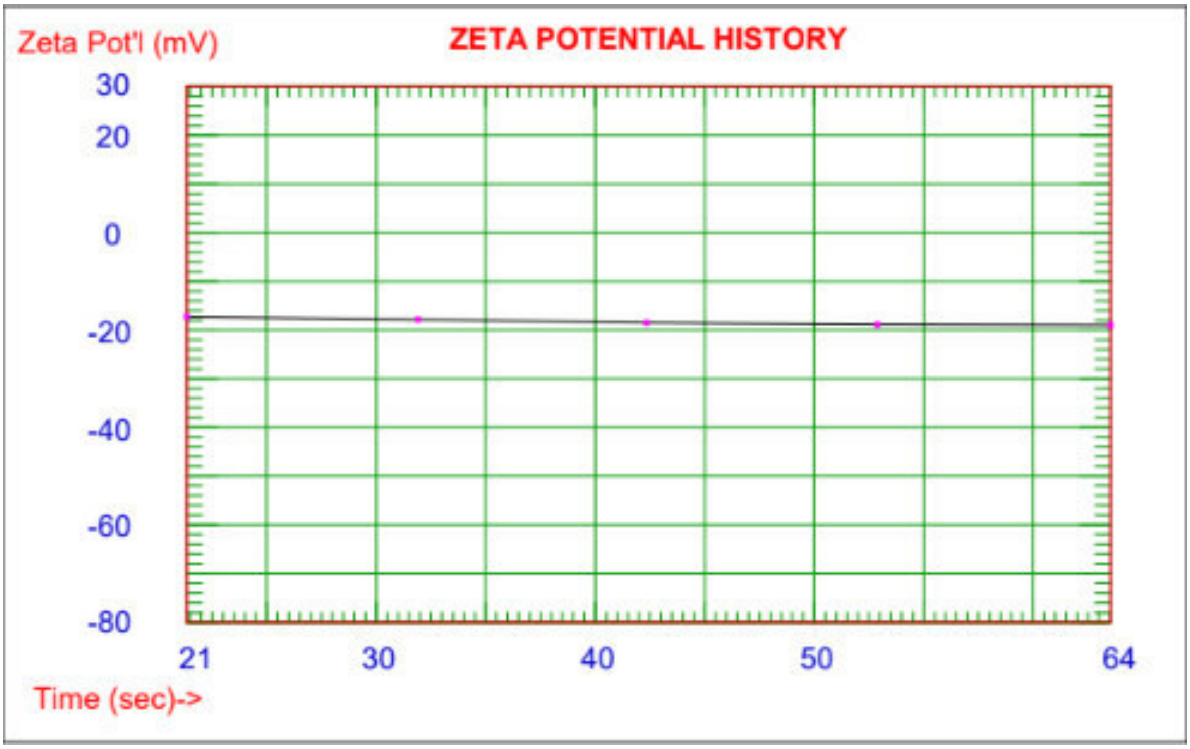


Figura 68 Potencial Z de NPsZnO V8



Apéndice 7 Clasificación taxonómica de la hoja de *Moringa oleifera*

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
MUSEO DE HISTORIA NATURAL

"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

C O N S T A N C I A Nº 011-2022-USM-MHN

LA JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (hojas) recibida **Daniel Armando LEON JIMENEZ,** de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; ha sido estudiada y clasificada como: ***Moringa oleifera*** Lam.; y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de APG IV (2016):

ORDEN: CAPPARALES

FAMILIA: MORINGACEAE

GENERO: *Moringa*

ESPECIE: *Moringa oleifera* Lam

Nombre vulgar: "Moringa"
Determinado por: Blgo. Severo Baldeón Malpartida

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para los fines que estime conveniente.

Lima, 18 de febrero de 2022

DRA. JOAQUINA ALBAN CASTILLO
JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

JAC/ddb