



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
División de Estudios de Posgrado e Investigación



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE ARREGLOS DE COBERTURA EN LA CREACIÓN DE
DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA LA SÍNTESIS DE NANOMATERIALES POR
REDUCCIÓN QUÍMICA**

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta
Ing. Ana María González López
G13070676

Director de Tesis
Dr. Nelson Rangel Valdez

Co- director de Tesis
Dra. Ana Lidia Martínez Salazar

Cd. Madero, Tamaulipas Noviembre 2021



Cd. Madero, Tam. **29 de octubre de 2021**

OFICIO No. : U.127/21
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE
IMPRESIÓN DE TESIS

C. ANA MARÍA GONZÁLEZ LÓPEZ
No. DE CONTROL G13070676
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“ANÁLISIS DEL IMPACTO DE ARREGLOS DE COBERTURA EN LA CREACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA LA SÍNTESIS DE NANOMATERIALES POR REDUCCIÓN QUÍMICA”

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DR.	NELSON RANGEL VALDEZ
SECRETARIA:	DRA.	ANA LIDIA MARTÍNEZ SALAZAR
VOCAL:	DR.	ULISES PÁRAMO GARCÍA
SUPLENTE:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
DIRECTOR DE TESIS:	DR.	NELSON RANGEL VALDEZ
CO-DIRECTOR:	DRA.	ANA LIDIA MARTÍNEZ SALAZAR

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Por mi patria y por mi bien"®

MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo
MACG 'mdcoa'



**DECLARACIONES DE ORIGINALIDAD, PROPIEDAD
INTELECTUAL, CESION DE DERECHOS Y/O
CONFIDENCIALIDAD**

Yo, Ana María González López con número de control G13070676; declaró que el proyecto de grado denominado “ANÁLISIS DEL IMPACTO DE ARREGLOS DE COBERTURA EN LA CREACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA LA SÍNTESIS DE NANOMATERIALES POR REDUCCIÓN QUÍMICA”, se ha desarrollado de manera íntegra, respetando derechos intelectuales de las personas que han desarrollado conceptos mediante las citas en las cuales indican la autoría, y cuyos datos se detallan de manera más completa en la bibliografía; así como también la confidencialidad de los métodos, resultados o conocimiento que se hayan generado en el trabajo de investigación realizado. En virtud de esta declaración, me responsabilizó del contenido, autenticidad y alcance del presente proyecto. Cd. Madero, Tamaulipas a noviembre 2021.



Ing. Ana María González López

DEDICATORIA

A mi familia; a mi padre por sus palabras de aliento, su apoyo, pero sobre todo por las palabras de perseverancia que cada día me inspiraba a continuar, a mi madre que sin ella no hubiera logrado terminar, por su aliento dado en cada día, noche y madrugada de desvelo y por sus pequeños detalles de amor durante todo el desarrollo de este proyecto. A mi hermana Angito, por la inspiración dada desde pequeñas, siempre has sido mi modelo a seguir y te admiro profundamente, gracias por tus mensajes, tus consejos, pero puntualmente por siempre estar para mí cuando flaqueaba; a mi hermano Klenn por que pese a la distancia siempre has estado presente y sin lugar a dudas sin tu presión esto no lo hubiera conseguido pero especialmente por esas veces en las que me abrazabas y me llenabas de fuerza y me dabas esas palabras de aliento que mi mente y mi corazón necesitaban. Y especialmente a Sergio, mi compañero de aventuras por siempre estar al pendiente de cada paso de mi vida, por siempre tener un momento para mí, gracias por todas las lecciones de vida que me has dado, no veo mi vida si no es a tu lado. Sin lugar a dudas ustedes son las personas más importantes de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quisiera agradecer a Dios, por haberme permitido llegar hasta a este grado en esta etapa profesional con salud, fortaleza y paz para seguir en el camino de la educación. A mis amigos por todos los momentos que pase con ustedes y por estar a mi lado en cada paso de esta travesía.

A mi director de tesis el Dr, Nelson Rangel Valdez primeramente por la oportunidad y la confianza de trabajar con usted, segundo por compartirme de su tiempo y sus conocimientos para culminar esta tesis y por último por sus regaños, paciencia, motivación, orientación y supervisión durante mi estancia en el posgrado.

A mi co – directora la Dra. Ana Lidia Martínez Salazar, por su asistencia y colaboración en este proyecto. Al Dr. Ulises Paramo, por su guía, su apoyo, su tiempo brindado, pero especialmente por las ocasiones en las que estuvo para apoyarme. Al Dr. Pedro Martín García Vite le agradezco mucho que haya creído en mí, que me ayudará a conseguir esa confianza que había perdido en algún momento del proceso, por sus palabras de aliento, su supervisión y por ser un soporte durante toda esta montaña rusa llamada maestría. Al Dr. Luciano Aguilera por sus aportaciones, comentarios, observaciones, sugerencias y mejoras de este trabajo.

Al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (ITCM), por formarme profesionalmente, pero especialmente al Centro de Investigación en Petroquímica (campus 3), por proporcionarme los recursos y las instalaciones necesarias para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para el logro este grado académico.

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE COVERING ARRAYS EN LA CREACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA LA SÍNTESIS DE NANOMATERIALES POR REDUCCIÓN QUÍMICA

Ana María González López

Resumen

El presente trabajo de investigación conceptualiza la aplicación de covering arrays (CAs) como un diseño experimental que permita realizar una serie de pruebas en la que se pueda inducir cambios intencionados para señalar los factores que influyan sobre la variable de respuesta, y determine la influencia de uno o varios factores sobre el producto o proceso analizado; buscando la reducción en el número de casos de prueba en la aplicación de un diseño factorial completo y un covering array. El CA es una matriz combinatoria que posee las propiedades necesarias para definir de forma óptima una serie de experimentos permitiendo generar el menor número de casos de prueba para cubrir un cierto nivel de interacción entre los parámetros, reduciendo el número de casos de prueba en comparación con otros diseños experimentales. Mediante el análisis de casos químicos sobre el tema de síntesis de nanomateriales por reducción química se validó el impacto que brindan, ya que, mediante el desarrollo de dos nuevas metodologías, *scratch* y *extend*, que al aplicarse logran minimizar el número de pruebas; por ejemplo, aplicando *scratch* en el Caso 1 se redujo en un 11.76%, en el caso 2 56.12% y para el caso 3 en un 27.08%, sin embargo, no se encontraron las dos combinaciones requeridas. Aplicando *extend* para el Caso 1 se redujo en un 11.76%, en el caso 2 un 56.12% y para el caso 3 en un 53.64%. En general, el porcentaje de reducción en el número de casos fue frente al diseño factorial completo por lo que además de la reducción en el número de casos se establecieron las condiciones de uso para las dos metodologías de construcción desarrolladas (*scratch* y *extend*).

ANALYSIS OF THE IMPACT OF COVERING ARRAYS ON THE CREATION OF EXPERIMENTAL DESIGNS FOR THE SYNTHESIS OF NANOMATERIALS BY CHEMICAL REDUCTION

Ana María González López

Abstract

The present research work conceptualizes the application of covering arrays (CAs) as an experimental design that allows performing a series of tests in which intentional changes can be induced to point out the factors that influence the response variable, and determine the influence of one or several factors on the product or process analyzed; looking for the reduction in the number of test cases in the application of a full factorial design and a covering array. The CA is a combinatorial matrix that has the necessary properties to optimally define a series of experiments allowing to generate the least number of test cases to cover a certain level of interaction between parameters, reducing the number of test cases compared to other experimental designs. Through the analysis of a case of study, on the chemical area inside the topic of synthesis of nanomaterials by chemical reduction, a reduction on the number of test cases was observed. Through the development of the two new methodologies, *scratch* and *extend*, the application of any of them minimizes the number of tests. For example, applying *scratch* in case 1 was reduced by 11.76%, in case 2 by 56.12% and for case 3 by 27.08%, however, the no all the required combinations were not found. Applying *extend* for case 1 was reduced by 11.76%, for case 2 by 56.12% and for case 3 by 53.64%, the percentage of reduction in the number of cases was compared to the full factorial design, therefore, in addition to the reduction in the number of cases, the conditions of use were established for the two construction methodologies developed (*scratch* and *extend*).

Índice General

Resumen	VII
Abstract.....	VIII
Índice Tablas.....	XII
Índice de Figuras	XIV
Nomenclatura.....	XVII
Nomenclatura.....	XVIII
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo General.....	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 Justificación del estudio	9
1.4 Organización de la tesis	10
2 Antecedentes/Marco Teórico	11
2.1 Diseños Experimentales.....	11
2.2 Diseño Factorial	12
2.3 Covering Array	14
2.3.1 Construcción de un Covering Array.....	17

2.4	Estrategia IPOG	19
2.5	Covering Arrays en procesos industriales.....	24
2.6	La Industria Química	26
2.6.1	Diseño Factorial en la industria química	29
3	Metodología.....	30
3.1	ACTS como herramienta de construcción de CAs	30
3.2	Metodología basada en Diseño Factorial.....	31
3.3	Metodología basada en Covering Arrays.....	32
3.4	Indicador de desempeño	34
4	Análisis y Resultados.....	35
4.1	Primer Caso.....	36
4.1.1	Diseño Factorial.....	39
4.1.2	Covering Array	41
4.1.3	Análisis de los Resultados del Caso 1	42
4.2	Segundo Caso	44
4.2.1	Diseño Factorial.....	48
4.2.2	Covering Array	52
4.2.3	Análisis de los Resultados del Caso 2	57
4.3	Tercer Caso	59
4.3.1	Diseño Factorial.....	60
4.3.2	Covering Array	63
4.3.3	Análisis de los Resultados del Caso 3	75
4.4	Análisis General de Resultados	78

5 Conclusiones y Recomendaciones	80
Bibliografía.....	84
Anexos	91

Índice Tablas

Tabla 1 Criterios con finalidad de orden económico [26].	7
Tabla 2 Diseño factorial completo 2^k , donde $k=3$, y los niveles son los símbolos $\{-, +\}$.	13
Tabla 3 Sistema con cuatro componentes, cada uno con dos valores.	15
Tabla 4 Conjunto de pruebas que cubre los pares de componentes de la tabla 3.	16
Tabla 5 Interpretación del conjunto de pruebas de la tabla 4.	16
Tabla 6 Áreas evaluadas por Covering Arrays	17
Tabla 7 Descripción de los métodos	18
Tabla 8 Áreas de aplicación de Covering Arrays	24
Tabla 9 Diseño factorial en procesos químicos.	29
Tabla 10 Combinación de Parámetros de CA	31
Tabla 11 Análisis de ventajas y desventajas de los métodos Scratch y Extend.	33
Tabla 12 Listado de casos detallados para su análisis	35
Tabla 13 Parámetros considerados para cada serie de experimentos del Caso 1	36
Tabla 14 Conjunto de Pruebas realizadas aplicando DF completo para el Caso 1.	39
Tabla 15 Parámetros de Construcción del CA para el Caso 1.	40
Tabla 16 CA(15; 3, 4, 2) e interpretación del mismo para el Caso 1 mediante <i>scratch</i> .	41
Tabla 17 CA (15; 3, 4, 2) e interpretación del mismo para el Caso 1 mediante <i>extend</i> .	42
Tabla 18 Recursos utilizados durante la experimentación para el Caso 1.	43
Tabla 19 Parámetros para la experimentación en el Caso 2.	45
Tabla 20 Resultados obtenidos en la primera serie de experimentos del Caso 2.	48
Tabla 21 Pruebas realizadas al aplicar un DF completo para el experimento 1 del Caso 2.	48
Tabla 22 Datos considerados para la tercera serie de experimentos del Caso 2.	49
Tabla 23 Datos considerados para la cuarta y quinta serie de experimentos del Caso 2.	49
Tabla 24 Pruebas realizadas al aplicar un DF completo en la tercera serie de experimentos	50
Tabla 25 Datos considerados para la construcción de CA para el Caso 2.	51
Tabla 26 Combinación ganadora por Agente Reductor para el Caso 2.	54
Tabla 27 Recursos utilizados durante la experimentación para el Caso 1.	57
Tabla 28 Parámetros y niveles para el Caso 3.	59

Tabla 29 Parámetros considerados en la construcción de CA para el Caso 3	63
Tabla 30 Recursos utilizados para llevar a cabo la experimentación para el Caso 3	76
Tabla 31 Tabla resumen de los resultados obtenidos del análisis de los tres casos.	78

Índice de Figuras

Figura 1 Clasificación de los diseños experimentales.....	11
Figura 2 Algoritmo IPOG [40].....	20
Figura 3 Primeros pasos CA (9; 5,3,2) – IPOG.....	21
Figura 4 Paso - CA (9; 5,3,2) – IPOG.....	22
Figura 5 Paso 7 CA (9; 5,3,2) – IPOG.....	22
Figura 6 Crecimiento Horizontal CA con $\tau = 1$ (9; 5,3,2) – IPOG.....	22
Figura 7 Combinación faltante CA (9; 5,3,2) – IPOG.....	23
Figura 8 Crecimiento Vertical de un CA (9; 5,3,2) – IPOG.....	24
Figura 9 Esquema de tres técnicas de construcción de nanomateriales.	28
Figura 10 Interacción entre factores.....	31
Figura 11 Proceso desarrollado para el primer experimento del Caso 1.....	37
Figura 12 Proceso desarrollado para el segundo experimento del Caso 1.....	37
Figura 13 Proceso desarrollado para el tercer experimento del Caso 1.....	38
Figura 14 Metodología de evaluación para cada experimento del Caso 1.....	38
Figura 15 Proceso base para cada experimento en el Caso 2 [57].....	44
Figura 16 Secuencia de experimentos para la primera serie de experimentos [57].....	45
Figura 17 Secuencia de experimentos para la segunda serie de experimentos del Caso 2.....	46
Figura 18 Secuencia de experimentos para la tercera serie de experimentos del Caso 2.....	46
Figura 19 Secuencia de experimentos para la cuarta serie de experimentos del Caso 2.....	47
Figura 20 Secuencia de experimentos para la quinta serie de experimentos del Caso 2.....	47
Figura 21 Construcción de un CA (43; 7, 7, 2) para el Caso 2 mediante <i>scratch</i>	52
Figura 22 Matriz resultante del CA (43; 7, 7,2) con <i>extender</i> en el Caso 2.....	55
Figura 23 Matriz resultante CA (230; 7,7,3) aplicando <i>extend</i> para el Caso 2.....	56
Figura 24 Diseño Factorial completo 2^7 del metal Pb para el Caso 3.....	60
Figura 26 DF completo con Pb y Zn a la vez para el Caso 3.....	61
Figura 25 Diseño Factorial completo 2^7 del metal Zn para el Caso 3.....	62
Figura 27 CA (60; 7, 2, 5) correspondiente <i>Pb</i> construido con <i>scratch</i> para el Caso 3.....	64
Figura 28 CA (60; 7, 2, 5) correspondiente <i>Zn</i> construido con <i>scratch</i> para el Caso 3.....	65

Figura 29 CA (100; 8, 3, 5) mediante <i>scratch</i> correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> para el Caso 3..	66
Figura 30 CA(180; 8, 3, 6) correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> construido con <i>scratch</i> para el Caso 3	67
Figura 31 CA (60; 7, 3, 5) correspondiente a <i>Pb</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	68
Figura 32 CA (95; 7, 3, 6) correspondiente a <i>Zn</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3.....	69
Figura 33 CA (95; 7, 3, 6) correspondiente a <i>Pb</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	69
Figura 34 Parte 1 - CA (100; 8, 3, 5) correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	71
Figura 35 Parte 2 - CA (100; 8, 3, 5) correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	72
Figura 36 Parte 1 -CA (178; 8, 3, 6) correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	72
Figura 37 Parte 2 -CA (178; 8, 3, 6) correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	73
Figura 38 Parte 3 -CA (178; 8, 3, 6) correspondiente a <i>Pb</i> y <i>Zn</i> construido con <i>extend</i> para el Caso 3	74
Figura 39 Metodologías para la construcción de covering arrays a través de ACTS.....	80
Figura 40 Parte 1. Flujograma del Diseño Experimental	92
Figura 41 Parte 2. Flujograma de la construcción y aplicación del CA dentro de un DoE	93
Figura 42 Parte 2. Flujograma del proceso de validación y evaluación de fuerzas del CA.	94
Figura 43 Parte 3. Flujograma del proceso de evaluación de desempeño del CA y el DF .	95
Figura 44 Resultados del Caso 1 según Corzo [56].	96
Figura 45 Construcción CA(15; 3, 5, 2) <i>scratch</i> mediante ACTS	97
Figura 46 Construcción CA(45; 3, 5, 3) <i>scratch</i> mediante ACTS	97
Figura 47 Construcción CA(15; 3, 5, 2) <i>extend</i> mediante ACTS.....	98
Figura 48 Construcción CA(45; 3, 5, 3) <i>extend</i> mediante ACTS.....	98
Figura 49 Construcción CA(43; 7,7,2) <i>scratch</i> mediante ACTS	100
Figura 50 Construcción CA(262; 7,7,3) <i>scratch</i> mediante ACTS	100
Figura 51 Construcción CA(43; 7, 7, 2) <i>extend</i> mediante ACTS.....	101
Figura 52 Construcción CA(265; 7, 7, 3) <i>extend</i> mediante ACTS.....	101
Figura 53 Construcción CA(60; 7,2,5) <i>scratch</i> mediante ACTS para <i>Pb</i> y <i>Zn</i>	102

Figura 54 Construcción CA(64; 7,2,6) <i>scratch</i> mediante ACTS para Pb y Zn.....	102
Figura 55 Construcción CA(60; 7,2,5) <i>extend</i> mediante ACTS para Pb y Zn	103
Figura 56 Construcción CA(95; 7,2,6) <i>extend</i> mediante ACTS para Pb y Zn	103
Figura 57 Construcción CA(100; 8,3,5) <i>scratch</i> mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto	104
Figura 58 Construcción CA(180; 8,3,6) <i>scratch</i> mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto	104
Figura 59 Construcción CA(100; 8,3,5) <i>extend</i> mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto	105
Figura 60 Construcción CA(178; 8,3,6) <i>extend</i> mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto	105

Nomenclatura

Símbolo	Unidad	Definición
CA		Covering Array
CAs		Covering Arrays
DoE		Diseño Experimental
DF		Diseño Factorial
N		Número de experimentos
k		Número de factores
v		Alfabeto
t		Fuerza
<i>MCA</i>		Mixed Covering Arrays
<i>CASA</i>		Computacional Auditory Scene Analysis
<i>ACTS</i>		Advanced Combinatorial Testing System
<i>PICT</i>		Paiwise Independent Combinational
<i>TCA</i>		Tower of Covering Array
<i>IPO</i>		In-Parameter-Order
<i>IPOG</i>		In-Parameter-Order-General
<i>AETG</i>		Automatic Efficient Testcase
<i>AR</i>		Agente Reductor
<i>P.C.</i>	mM	Parámetros de Concentración
<i>T</i>	°C	Temperatura
<i>P.M.F.</i>		Proporciones molares finales
<i>T.A</i>		Tiempo de agitación
<i>T. A. P.</i>	min	Tiempos de agitación prolongados
<i>C.M. R</i>		Concentración en la mezcla de reacción
<i>AE</i>		Agente estabilizador
<i>TP</i>	mm	Tamaño de partícula

Nomenclatura

Símbolo	Unidad	Definición
<i>PMFA</i>		Proporciones molares finales del AR a AgNO ₃
<i>C.Mt</i>	ppm	Concentración del metal
<i>C.C.N.</i>	g	Cantidad de cáscaras de naranja
<i>T.C.</i>	h	Tiempo de contacto
<i>TT</i>		Tratamiento
<i>Mt</i>		Metal

1 Introducción

La operación de una industria depende principalmente del correcto funcionamiento y ejecución de los procesos, tanto para la creación de productos nuevos, así como también para la transformación de la materia. Es por esto por lo que analizar los recursos que intervienen en los procesos es crucial para lograr la eficiencia; estos recursos pueden ser tanto material, recurso humano, económicos, conocimiento, etc.

De la necesidad de analizar con detenimiento todos los factores que intervienen en los procesos se emplearon diseños experimentales. Los cuales aplican técnicas estadísticas que permiten identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. Hay una gran variedad de diseños experimentales para su aplicación en muchas áreas, algunos de ellos son los axiales, con restricciones, simplex, por bloques, con arreglos internos y externos, de cuadros latinos y grecolatinos, factoriales, etc.

Hay una gran variedad de diseños experimentales los cuales presentan diferentes enfoques para cada área, sin embargo, en el área de programación los CAs [1], [2](por el inglés Covering Arrays) han sido empleados usualmente como evaluadores de los componentes de hardware [3], [4] y software [5]–[8] los cuales a través de una matriz combinatoria muestran todas las posibles pruebas de interacciones entre los factores.

Pese a su efectividad en el área de Ingeniería de Software, los CAs han sido poco utilizados en procesos químicos. Debido a lo anterior, se evaluó esta herramienta en el proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química, y se compara con el uso de un diseño experimental factorial. Con este análisis se evalúa la diferencia en el nivel de optimización existente entre el uso de diseños factoriales y la aplicación de los CAs en el área química.

El diseño de experimentos, surge como concepto a mediados del siglo XX en Inglaterra, donde Ronald A. Fisher [9] a través de su trabajo en la Estación Experimental de Rothamsted llevó a cabo la experimentación en el área agrícola donde logró establecer tres principios básicos del diseño de experimentos los cuales son aleatoriedad, realización de réplicas y formación de bloques, por lo que en 1935 redactó su libro titulado “The Design of Experiments”, contribuyendo a la estadística con principios como confusión, cuadrados latinos, arreglos factoriales, etc. [10]. Gracias a sus aportaciones se le conoce como el fundador de la estadística moderna y marcó el inicio de la 1ra era del diseño experimental.

En la segunda era, George E. P. Box fue el encargado de darle seguimiento al diseño experimental en 1930 pero esta vez en la industria química en Inglaterra, ya que él fue estadístico por 8 años en la industria química en Inglaterra, en donde desarrolló la metodología de superficie de respuestas (MSR) la cual incluye nuevas familias de diseños y una estrategia de experimentación secuencial [11].

Entre los años de 1950 y 1980 el diseño experimental se convierte en una herramienta frecuente en temas de investigación y desarrollo y es en este punto donde se marca la tercera etapa. Pero, en 1970 se da un giro al diseño experimental como se había manejado hasta ese momento y se enfoca en el mejoramiento de la calidad donde Genishi Tagushi desarrolló el diseño factorial y el diseño paramétrico robusto (RPD); este último estaba orientado al diseño del producto de manera uniforme así fuera fabricado en condiciones favorables [12].

El éxito de los diseños experimentales en el área de calidad dentro de la industria japonesa fue encabezado por Deming e Ishikawa, personajes que promovieron el uso de la estadística, para resolver problemas y diseñar de una mejor manera los productos y procesos [9]. A raíz del éxito que se obtuvo en Japón, se comenzó a entrenar ingenieros en los temas de diseños experimentales con la finalidad de conocer el tema y sus aplicaciones en la industria.

Debido a la expansión del Seis sigma y la gran oferta de software estadístico, en la cuarta etapa, los diseños experimentales fueron aplicados en todos los sectores industriales, estos cambios permitieron que la técnica en los diseños de experimentos (o DoE, del inglés *Design of Experiments*) fuera mejorando. Además, la atomización de los cálculos y gráficas mediante un software ayudó a simplificar la técnica para ser usada por científicos e ingenieros. Sin embargo, el concepto más sobresaliente en la cuarta etapa fue la optimalidad, que provocó que la utilización del diseño experimental comenzará a ser óptimo [13].

Con base en lo anterior se propone una clasificación general de los diseños experimentales, la cual se enlista a continuación [9]:

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos.
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la (s) respuesta (s).
3. Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
4. Diseños para la optimización de una mezcla.
5. Diseños para hacer el producto o proceso insensible a factores no controlables.

De igual forma existen diseños experimentales orientados a un tema en especial, ejemplo de ello es el caso del área de programación y el diseño de experimentos en softwares. En la actualidad el desarrollo tecnológico ha tenido un avance muy grande comparado con el siglo XIX, ya que en los últimos años la creación de softwares ha ido en aumento impactando sobre todo a los sectores de la educación y del entretenimiento.

A fin de poder lanzar estos softwares, las organizaciones encargadas de su desarrollo, dentro de su planeación dividen sus actividades en dos: actividades para construcción del software del producto y actividades que comprueben la calidad del software [14].

Al respecto, el proceso de la calidad es la parte más importante del ciclo de vida del desarrollo del software, debido que en cada etapa del desarrollo pueden aparecer errores que es mejor corregir en el momento que se detectan y así evitar la propagación del error en todo el software y que esto al término del desarrollo tenga un costo elevado en la verificación; es por esto que, los ingenieros realizan pruebas en los diferentes nivel del ciclo, para evitar errores más grandes y comprobar la calidad del proceso [15].

Sin embargo, el hacer pruebas no resulta una buena idea cuando los componentes del software son demasiados, ya que el riesgo aumenta al llevar a cabo las pruebas. Para reducir este riesgo y garantizar la calidad del software, la industria necesita hacer pruebas entre las interacciones de sus componentes, por ejemplo: un software de sistema complejo con componentes P , cada componente tiene dos valores, la fabricación necesita casos de prueba $2P$ para probar meticulosamente el software; a pesar de ello, en la práctica no se considera factible debido a todos los factores que intervienen (tiempo, costo y limitaciones de recursos) [16].

Ahora bien, una vez que fue detectado que no es factible realizar pruebas a todos los factores que intervienen en el desarrollo, se busca tener un subconjunto que agrupa todas las posibles interacciones de prueba para tener un potencial alto para descubrir fallas. Derivado de esta necesidad surgieron los covering arrays, los cuales se mostraban como una alternativa a las exhaustivas pruebas representando todas las interacciones de los componentes mediante una matriz minimizada que puede utilizarse como un conjunto de pruebas [17].

Las primeras aplicaciones de este diseño se presentaron en 1992 cuando S. Yu. Borodai y I. S. Grunskii [3] redactaron un artículo donde sus aplicaciones se dirigieron a la evaluación de hardware, posteriormente en 2001 se aplicó un diseño combinatorio para definir un conjunto

de experimentos para explorar los efectos de todas las combinaciones posibles de diferentes entradas; este diseño fue aplicado en la biología (los genes) [18].

En 2002, J.N. Cawse [19] redactó un reporte técnico de la empresa GE Global, en el cual detallaba algunas áreas de aplicación, las cuales fueron: diseño de parcelas divididas, mapeo combinatorio de la fase de mezclas de polímeros, enfoques sintéticos de alto rendimiento para la investigación del espacio de fase inorgánica y redes neuronales artificiales en el desarrollo de catalizadores.

Durante los años siguientes hasta la actualidad sus aplicaciones han sido variadas en el sistema de comunicación [20], con el uso de diferentes algoritmos como los algoritmos metaheurísticos [1], usando una representación de lógica booleana (o SAT, del inglés *Satisfiability*) [21], pruebas de interacción [22], etc., y su variabilidad se logra gracias a la adaptabilidad que tienen ante cualquier proceso/problema a solucionar.

Como ha mencionado los covering arrays se han aplicado en diferentes áreas, pruebas de hardware [3], [4], software [5]–[8], biología [18], procesos de manufactura y medicina [23], diseño y pruebas de materiales [19], sin embargo para el área química no se ha aplicado. Es por ello que este trabajo de investigación marcará la pauta para la experimentación aplicando covering arrays, por lo que de ser exitosa su aplicación, la ventaja de emplear CAs dentro de una experimentación química será beneficiosa al poder minimizar en primera instancia los tiempos de ejecución y los recursos empleados para la misma.

1.1 Planteamiento del problema

El Fondo Monetario Internacional (FMI) estableció que el crecimiento en México se ha desacelerado proyectándose a 0.4% durante 2019, convirtiéndose en la doceava economía a nivel Latinoamérica. La contribución económica de algunos sectores estratégicos al producto interno bruto (PIB) en México se establecen de la siguiente manera, siendo el sector más representativo el de servicios que aporta el 61%, seguido de la industria con 35% y la

agricultura con 4%. El sector industrial es el segundo más importante, donde sobresalen las manufacturas al contribuir en 18% al PIB, la minería y la construcción que aportan el 7.5% y la producción con 7.4% [24].

En ese sentido, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) determina la industria manufacturera como el sector que comprende unidades económicas principalmente a la transformación mecánica, física o química de materiales o sustancias con el fin de obtener productos nuevos. Asimismo, en esta clasificación se incluyen la mezcla de productos para obtener otros diferentes, como lubricantes, resinas plásticas, aceites y fertilizantes [25].

La industria manufacturera se divide en 10 tipos de acuerdo a su actividad, las cuales son: productos alimenticios, bebidas y tabaco, maquinaria y equipo, derivados del petróleo y del carbón, industrias químicas del plástico y del hule, industrial metálicas, productos a base de minerales no metálicos, industriales textiles, prendas de vestir e industrias del cuero, papel, impresión e industrias relacionadas, otras industrias manufactureras, industria de la madera y finalmente la fabricación de muebles y productos relacionados.

Aunque existe diversidad dentro del sector, el factor común son los procesos llevados a cabo en todas las actividades, los cuales son definidos como el conjunto de acciones relacionadas y ordenadas que requieren: planear, integrar, organizar, dirigir y controlar para conseguir un objetivo determinado [26].

En el sector industrial los procesos son de suma importancia debido a la derivación de los mismos hacia los bienes ofertados dentro de la economía, es por tal motivo que seleccionar el proceso a ejecutar o bien cambiar el proceso actual, requiere de una adecuada toma de decisiones respecto a los materiales, equipo, tecnología, recursos humanos, etc., o bien cuando se requieren modificaciones sustanciales dentro del proceso; cuando se presentan problemas de calidad; cuando la competencia está abarcando mayor nicho de mercado debido

al uso de nuevos procesos o tecnologías; cuando se dan cambios importantes en los insumos o su disponibilidad ha variado de manera importante, entre otros. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los cambios de proceso que se puedan llevar a cabo generan costos que impactan los márgenes de rentabilidad de forma positiva o negativa [27].

Dentro de una evaluación económica de procesos se deben tomar en cuenta 3 factores productivos claves para poder garantizar la rentabilidad del proceso, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Criterios con finalidad de orden económico [26].

Factor	Características
<i>Costos</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aceptables • Competitivos
<i>Rentabilidad</i>	Ganancias superiores a las que proporciona el banco.
<i>Calidad</i>	Sólo la necesaria.

Como se había mencionado, los costos son los factores más importantes y son definidos como “la suma de esfuerzos y recursos que se han invertido para producir algo útil, mientras que la importancia de tenerlos en la industria son el poder tener una planeación (costos que incurrirá a la empresa), el control (para verificar el cumplimiento de lo planificado) y para la toma de decisiones (ayuda a saber si se continua con determinado costo o bien si se elimina) [28].

En efecto, el sistema de costos dentro de la industria presenta ventajas y desventajas; algunas de las ventajas son: el establecimiento del costo unitario de un producto o servicio, obtención de información precisa para determinar, implementar y controlar un presupuesto al igual que el mejoramiento de operaciones y el fomento de mejora continua, reconociendo las eficiencias y recompensando a los que lo provocaron [29].

Sin embargo, pese a las ventajas que se muestran, la aplicación de un sistema de costos también presenta desventajas, algunas de ellas son: el método es caro pues su aplicación es compleja y requiere de personal especializado, se presenta una dificultad para obtener el valor actual de los activos [16]. De manera que es necesario implementar estrategias que ayuden en la recolección de la información los cuales se nombran diseños experimentales. Ciertamente, es el diseño estadístico de experimentos la forma más eficaz de hacer pruebas, la cual consiste en determinar cuáles pruebas se debe realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras [9].

En un panorama general, el diseño experimental sirve como una herramienta para mejorar el desempeño de un proceso, ya sea para el desarrollo de productos nuevos o para el mejoramiento de los existentes. Algunas de sus aplicaciones pueden ser [10]:

1. La evaluación y comparación de configuraciones de diseños básicos.
2. La evaluación de materiales alternativos.
3. La selección de los parámetros del diseño para que el producto tenga un buen funcionamiento en una amplia variedad de condiciones de campo, es decir, para que el producto sea robusto.
4. La determinación de los parámetros clave del diseño del producto que afectan el desempeño del mismo.

Derivado de todo lo anterior se plantea la creación de una nueva metodología para la definición de un diseño experimental (mediante covering arrays), ya que se considera que es posible mejorar la relación costo beneficio frente a estrategias que ya han sido utilizadas en la administración y optimización de los recursos y costos del proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química (como es el caso del uso de diseños factoriales).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar el desempeño del arreglo de cobertura en comparación con el diseño factorial, con el fin de determinar los niveles de optimización en el proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Analizar y estudiar cómo se ha implementado el diseño factorial en el proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química;
2. Analizar el modelo de covering array en procesos industriales;
3. Diseñar el modelo de covering array para el proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química;
4. Implementar el modelo de covering array en el proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química;
5. Definir la arquitectura que integre las variables controlables con el fin de minimizar los efectos de las variables incontrolables; y
6. Comparar el modelo de covering arrays y el diseño factorial.

1.3 Justificación del estudio

Derivado de la revisión bibliografía llevada a cabo, se ha observado la importancia de realizar pruebas tanto en la etapa de desarrollo como en la etapa final de un producto/servicio terminado. Por tal motivo, en las industrias se establecen diseños experimentales que permiten analizar los costos de cada una de las variables que intervienen dentro del proceso. Ahora bien, los costos además de tener una importancia relevante en la industria sirven para determinar si el producto obtenido cumple con la relación de recursos utilizados y los recursos planeados a utilizar. Como se mencionó anteriormente el diseño experimental ha

tenido diferentes aplicaciones en áreas como la agricultura, manufactura, mercadotecnia, medicina, ecología o ciencias de la conducta, dando resultados positivos en la aplicación de cada una de las áreas.

Por otro lado, el diseño experimental en el área de programación ha sido una revelación, ya que se han obtenido un abanico de aplicaciones variadas, que permiten seleccionar temas diversos en varias áreas, ejemplo de ello son los covering arrays, los cuales son un tipo de matriz combinatoria que resulta útil en la planificación y automatización de todas las posibles pruebas de interacciones en t [30].

Así mismo, como una aportación al sector químico se determinó si los CAs pueden ser utilizados en el proceso de síntesis de nanomateriales por reducción química, que se llevan a cabo en el sector y a su vez se validó que los resultados obtenidos en este arreglo, son semejantes a los arrojados por el diseño factorial, y de este modo se puede evaluar el grado de optimización que se obtuvo y comprobar el uso de los covering arrays en el área química es posible y se puede reducir el número de experimentos y con ello costos o recursos empleados.

1.4 Organización de la tesis

La tesis está estructurada de la siguiente manera, en el capítulo 1 se detalla el planteamiento del problema, los objetivos, tanto el general como los específicos, y la justificación del estudio. El capítulo 2 contiene los fundamentos teóricos, conceptos y antecedentes para llevar a cabo el trabajo de investigación. El capítulo 3 describe la metodología implementada, los diseños aplicados (diseño factorial y un covering array) para cada caso de estudio y la manera en la cual se medirá el desempeño de cada diseño. El capítulo 4 expone un análisis detallado de la aplicación de cada metodología sobre ambos diseños y los resultados obtenidos para cada caso de estudio. Y Finalmente el capítulo 5 presenta las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados.

2 Antecedentes/Marco Teórico

2.1 Diseños Experimentales

Un diseño de experimentos (o DoE, del inglés *Design of Experiments*) [31], o también conocido como diseño experimental, se define como una metodología basada en útiles matemáticos y estadísticos cuyo objetivo es ayudar al experimentador a:



Figura 1 Clasificación de los diseños experimentales

1. Seleccionar la estrategia experimental óptima que permita obtener la información buscada con el mínimo coste.
2. Evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan.

Los diseños experimentales [9] se clasifican de manera general como se enlista a continuación;

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos.
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la (s) respuesta (s).
3. Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
4. Diseños para la optimización de una mezcla.
5. Diseños para hacer el producto o proceso insensible a factores no controlables.

Sin embargo, cada rama se clasifica de acuerdo al número de factores, al tipo de efectos que se pretende estudiar y las restricciones existentes. Como se puede observar en la figura 1 los diseños factoriales completos y fraccionados ocupan más de un lugar, ya que estos diseños son eficaces en diversas situaciones prácticas.

2.2 Diseño Factorial

El diseño factorial [9] es un diseño experimental que sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Uno de los objetivos particulares más importantes del diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor.

Para este diseño los factores que se pueden utilizar son de tipo cualitativo (tipos de material, operador, máquinas, lotes, marcas, etc.) o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, presión, velocidad, etc.). Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos.

Tabla 2 Diseño factorial completo 2^k , donde $k=3$, y los niveles son los símbolos $\{-, +\}$.

<i>Combinación</i>	X_1	X_2	X_3
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

La matriz de diseño o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores [9]. Es por eso que los diseños factoriales presentan ventajas significativas como son:

1. Permiten estudiar el efecto individual y de interacción de los distintos factores.
2. Son diseños que se pueden aumentar para formar diseños compuestos en caso de que se requiera una exploración más completa. Por ejemplo, es útil aumentar el diseño si el comportamiento de la respuesta no es lineal en los factores controlados.
3. Se pueden correr fracciones de diseños factoriales, las cuales son de gran utilidad en las primeras etapas de una investigación que involucra a muchos factores, cuando interesa descartar de manera económica los que no son importantes, antes de hacer un estudio más detallado con los factores que sí son importantes
4. Pueden utilizarse en combinación con diseños de bloques en situaciones en las que no puede correrse todo el diseño factorial bajo las mismas condiciones. Por ejemplo, cuando cada lote de material sólo alcanza para correr la mitad del experimento, éste se puede realizar en dos bloques (dos lotes), lo cual implica repartir las pruebas en los dos lotes de la manera más conveniente posible.
5. La interpretación y el cálculo de los efectos en los experimentos factoriales se puede hacer con aritmética elemental, en particular cuando cada factor se prueba en dos niveles.

Los diseños factoriales 2^k son diseños en los que se trabaja con k factores, todos ellos con dos niveles (se suelen denotar + y -). Estos diseños son útiles para realizar estudios preliminares con muchos factores para identificar los más importantes y sus interacciones, en la tabla 2 se muestra un ejemplo de este tipo [32].

Sin embargo, si k es grande, el número de observaciones que necesita el diseño factorial 2^k es muy grande ($n = 2^k$), una alternativa es utilizar fracciones factoriales. Debido a la simplicidad de su aplicación y su eficiencia en los resultados, este tipo de diseño experimental fue seleccionado para comparar sus resultados con los obtenidos de covering arrays.

2.3 Covering Array

Un arreglo es una colección finita (tiene un tamaño límite, es decir, se define el número máximo de elementos que puede almacenar), ordenada (permite hacer referencia desde el primero hasta el enésimo elemento que forme el arreglo) y homogénea de datos (todos los componentes del arreglo son del mismo tipo de datos) [33].

Los CAs [34] son objetos combinatorios que han sido aplicados para realizar pruebas funcionales en diversas áreas, entre ellas, las pruebas de componentes de software. El uso del covering array permite probar todas las interacciones, de un determinado tamaño, entre los parámetros de entrada, utilizando el menor número de casos de prueba posible.

Para representar estos objetos combinatorios se usa la siguiente notación:

$$CA(N; k; v; t)$$

N Es el número de experimentos o pruebas.

k Es el número de factores.

v Es el número de símbolos por cada factor, denominado como alfabeto

t Es el grado de interacción entre los factores, denominado como fuerza

Un CA($N; t; k; v$), de fuerza t y orden v , es un arreglo de tamaño $N \times k$ sobre v símbolos en el cual cada subarreglo formado por t columnas distintas cubre al menos una vez todas las posibles t -tuplas que se pueden crear sobre los v símbolos [35]. Sean N, k, v, t enteros positivos con $t \leq k$. Un CA, de índice λ , alfabeto v , fuerza t , es un arreglo C de tamaño $N \times k$, donde cada elemento $a_{i,j}$ toma como valor un símbolo del conjunto $S = \{1, 2, \dots, v\}$, tal que cada $N \times t$ subarreglo contiene todas las posibles combinaciones de los v^t símbolos al menos λ veces [32]. Los CAs manejados en este trabajo tienen un valor $\lambda=1$.

Dentro de la literatura de los CA, se registran el límite inferior y el límite superior para un covering array. El límite inferior es el tamaño mínimo teórico para un determinado CA, mientras que el límite superior es el tamaño mínimo para el cual existe un arreglo conocido. El límite inferior para los CA de alfabeto uniforme es determinado por v^t . Para alfabetos mixtos el límite inferior es determinado por $\prod_i^t v_i$, donde $v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_k$.

Tabla 3 Sistema con cuatro componentes, cada uno con dos valores.

	HARDWARE	SISTEMA OPERATIVO	CONEXIÓN DE RED	MEMORIA (MB)
0	PC	Windows	Dial-up	128
1	Laptop	Linux	Cable	256

Un ejemplo de covering arrays [32] en el área de software es el que se muestran en la tabla 3. Hay dos piezas de hardware, dos sistemas operativos, dos conexiones de red y dos configuraciones de memoria. En caso de existir una interacción entre pares de componentes, entonces los valores para la construcción de un conjunto de pruebas son: $k=4, v=2$ y $t=2$.

Si se etiquetan con símbolos del conjunto $\{0,1\}$ los posibles valores que pueden tomar los componentes, entonces un conjunto de pruebas que cubre todas las combinaciones entre pares de componentes se puede ver en la tabla 4. Este es un CA $(5; 4, 2, 2)$, ya que se puede ver que en cada par de columnas aparecen, al menos una vez, las combinaciones $\{0,0\}, \{0,1\}, \{1,0\}$ y $\{1,1\}$ que se pueden formar del conjunto de símbolos $\{0, 1\}$.

Al sustituir los números por la configuración correspondiente de cada componente, el conjunto de pruebas quedaría como se indica en la tabla 5.

Tabla 4 Conjunto de pruebas que cubre los pares de componentes de la tabla 3.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Tabla 5 Interpretación del conjunto de pruebas de la tabla 4.

PRUEBA	HARDWARE	SISTEMA OPERATIVO	CONEXIÓN DE RED	MEMORIA (MB)
1	Laptop	Linux	Cable	128
2	PC	Windows	Dial-up	128
3	PC	Linux	Dial-up	256
4	Laptop	Windows	Dial-up	256
5	PC	Windows	Cable	256

Los CAs son fundamentales en el diseño de experimentos y pruebas cuando todos los factores tienen el mismo número de niveles (alfabeto uniforme). Sin embargo, los sistemas no están compuestos por componentes (factores) que tengan exactamente el mismo número de parámetros (niveles). Para eliminar esta limitación de los CAs, se puede hacer uso de los MCAs (del inglés *Mixed Covering Arrays*).

Tabla 6 Áreas evaluadas por Covering Arrays

<i>Diseño Experimental</i> <i>Áreas de aplicación</i>	<i>Factorial</i>	<i>Covering Arrays</i>
Pruebas de hardware	✓	✓
Biología	✓	✓
Procesos de manufactura	✓	✓
Diseño de materiales	✓	✓
Agricultura	✓	✓
Medicina	✓	✓
Pruebas de software	✓	✓
Industria química	✓	✗

La Tabla 6 muestra las áreas de aplicación de los CAs y de los diseños factoriales. Éstas han sido pruebas de hardware, biología, procesos de manufactura, diseño de materiales, agricultura, medicina, pruebas de software, entre otras. Haciendo un pequeño análisis en la información provista, se puede observar la viabilidad de aplicar CAs en el área química, para observar los resultados en los procesos que compete a esta nueva área. Estas acciones son las que dirigieron el rumbo de la investigación presentada en esta tesis.

2.3.1 Construcción de un Covering Array

Los Covering Arrays son objetos matemáticos que han sido aplicados en el diseño de experimentos en un amplio rango de aplicación, ya que a partir de aplicar pruebas combinatorias pueden reducir los costos aumentando significativamente la efectividad de las pruebas[1]. Uno de los objetivos de los CAs es generar el menor número de conjuntos o casos de prueba, que logren cubrir todos los conjuntos de iteraciones de parámetros de entrada de cada experimento [2].

Derivada de la amplia gama de aplicación se han diseñado, métodos, estrategias y algoritmos para la construcción de CAs, ya que cada uno de ellos tiene un escenario especial que se adecua al problema a resolver de cada experimento, así como también cada uno tiene sus ventajas y desventajas [36]. La Tabla 7 muestra un resumen de estos.

Tabla 7 Descripción de los métodos

Método	Ventaja	Desventaja
EXACTOS	Permite construir CAs óptimos, que solo son prácticos para construir aquellos donde su extensión sea pequeña.	Dada la complejidad del CA aumenta en alfabeto y/o fuerza y disminuye en el rendimiento
Algebraicos	Son aplicados para casos muy específicos y son eficientes en la construcción en términos de tiempo.	Es difícil generar datos precisos como resultados cuando se tiene una amplia gama de valores de entrada.
Avaro	Son considerados los más eficientes y más rápidos en términos de tiempo de ejecución.	Puede generar grandes covering arrays en comparación con otros métodos.
Metaheurísticos	Son intensivos computacionalmente, precisos y representan resultados competitivos.	Generan covering arrays muy pequeños teniendo un costo significativo en tiempo de ejecución.

De acuerdo a los parámetros establecidos para el desarrollo de esta investigación, los cuales se centraron en (1) la fuerza de cobertura, (2) el número de opciones de configuración, (3) el número y la longitud de restricciones criterio de optimización, (4) la minimización en el tiempo de construcción y el tamaño de la matriz; se consideraron cinco constructores potenciales para la generación de los covering arrays, los cuales son CASA, ACTS, Jenny, PICT y TCA [37].

- **CASA** (del inglés *Computational Auditory Scene Analysis*): Usa recocido simulado para crear CAs, basándose en una búsqueda metaheurística eligiendo un nuevo tamaño en cada iteración lo cual alimenta al algoritmo [38].

- ACTS (*Automated Combinatorial Testing for Software*): Utiliza el algoritmo IPOG, en el cual, mediante una serie de variaciones y crecimientos horizontal y vertical en un bucle se constituya una matriz t [39].
- Jenny: Utiliza un enfoque avaro, donde en cada iteración, se genera automáticamente un conjunto de configuraciones, dichas configuraciones se afinan en una heurística avara que reducirá un número de las tuplas faltantes.
- PICT (*Pairwise Independent Combinational*): Es un constructor determinista, en donde una configuración se genera en cada iteración. Al igual que utiliza tres decisiones de diseño principales: crear un CA rápidamente, factibilidad de uso y extensibilidad [37].
- TCA (*Tower of Covering Array*): Opera dentro de dos modos, avaro y aleatorio. Mediante los cuales adapta un método heurístico aleatorio en un intento por explorar mejor el espacio de búsqueda.

Al analizar estos métodos se concluyó que todos presentan características similares entre ellas como:

1. Todos están disponibles públicamente para su uso.
2. Usan un espectro de diferentes enfoques para construir CA.
3. Emiten espacios de configuración con restricciones de interoperabilidad y un número variable de configuraciones para las opciones de configuración.

Una vez que fueron evaluaron todos los métodos y constructores para implementar covering arrays, se decidió que acorde con los alcances del problema de estudio la mejor opción es utilizar un método avaro con un constructor de tipo ACTS, utilizando el algoritmo IPOG.

2.4 Estrategia IPOG

IPO (*In-parameter-order*) es una estrategia que permite el uso de técnicas de optimización local para la generación de pruebas y la reutilización de las pruebas existentes cuando un sistema se amplía con nuevos parámetros o nuevos valores de parámetros existentes. Esta estrategia es la precursora de la estrategia IPOG [40].

Para un sistema con t o más parámetros, IPOG (In-parameter-order-general) crea un conjunto de pruebas t -way para los primeros parámetros t , extiende el conjunto de pruebas para construir un conjunto de pruebas t -way para los primeros parámetros $t+1$, y luego se seguirá extendiendo en el conjunto de pruebas hasta que se construye un conjunto de prueba t -way para todos los parámetros [41].

Este algoritmo se implementa de acuerdo al siguiente pseudocódigo:

```

Algorithm IPOG – Test (int t, ParameterSet ps)
{
1. Initialize test set ts to be an empty set
2. Denote the parameters in ps, in an arbitrary order, as P1, P2, ..., and Pn
3. Add into test set ts a test for each combination of values of the first parameters
4. For (int i = t + 1; i ≤ n; i ++ ) {
5. Let  $\pi$  be the set of t-way combinations of values involving Parameter Pi and t-1 parameters among the first i – 1 parameters
6. // Horizontal extension for Parameter Pi
7.   For (each test  $\tau = (v_1, v_2, \dots, v_{i-1})$  in test set ts) {
8.     Choose a value  $v_i$  of Pi and replace  $\tau$  with  $\tau' = (v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, v_i)$  so that  $\tau'$  covers the most number of combinations of values in  $\pi$ 
9.     Remove from  $\pi$  the combinations of values covered by  $\tau'$ 
10.  }
11. //Vertical extension for Parameter Pi
12.  For (each combination  $\sigma$  in set  $\pi$ ){
13.    If (there exists a test that already covers  $\sigma$ ){
14.      Remove  $\sigma$  from  $\pi$ 
15.    } else {
16.      Change an existing test, if possible, or otherwise add a new test to cover  $\sigma$  and remove it from  $\pi$ 
17.    }
18.  }
19. }
20. Return ts;
}

```

Figura 2 Algoritmo IPOG [40]

Además este algoritmo adiciona parámetros mediante dos pasos [5]:

- Crecimiento horizontal: Extiende cada prueba existente agregando un valor para el nuevo parámetro (véase en figura 6).
- Crecimiento vertical: agrega nuevas pruebas de ser necesarias, al conjunto de pruebas producidas por el crecimiento horizontal (véase en figura 8).

Ejemplo de creación de Covering Array usando IPOG

1. Para comenzar con la construcción del covering array se necesitan delimitar los parámetros iniciales de la prueba lo que son λ , N , k , v y t .
2. Se procede a inicializar el conjunto de pruebas ts para ser un conjunto vacío.
3. Denotar los parámetros en orden arbitrario.

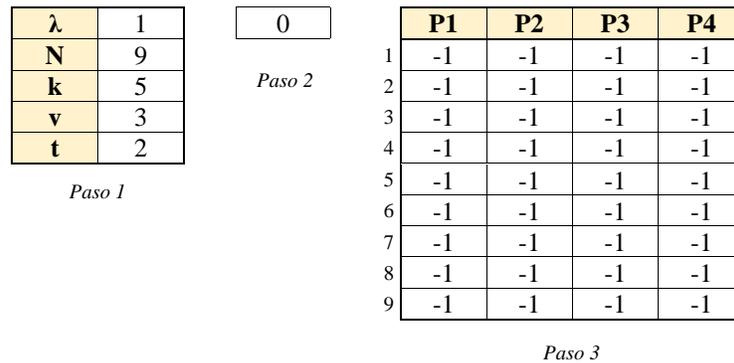


Figura 3 Primeros pasos CA (9; 5,3,2) – IPOG

4. Se procede a agregar un conjunto de pruebas, este conjunto de pruebas será la submatriz resultante de la interacción dada por el alfabeto y la fuerza.
5. Cuando el valor de N parámetros es superior a la fuerza, los parámetros restantes estarán cubiertos. La representación de esta línea es equivalente a $i = t + 1$.
6. Se establece el valor de π como el conjunto de combinaciones t -way de valores que involucran parámetros π y $t-1$ entre los parámetros $i-1$.

P1	P2	P3	P4	P5
0	0	-1	-1	-1
0	1	-1	-1	-1
0	2	-1	-1	-1
1	0	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	-1
1	2	-1	-1	-1
2	0	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
2	2	-1	-1	-1

Figura 4 Paso - CA (9; 5,3,2) – IPOG

7. Se añade un nuevo valor de τ . $\tau = (v_1, v_2, \dots, v_{i-1})$ en el conjunto de pruebas t_s para cada experimento.

π				
P1	P3		P2	P3
0	0		0	0
0	1		0	1
0	2		0	2
1	0		1	0
1	1		1	1
1	2		1	2
2	0		2	0
2	1		2	1
2	2		2	2

P1	P2	P3	P4	P5
0	0	-1	-1	-1
0	1	-1	-1	-1
0	2	-1	-1	-1
1	0	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	-1
1	2	-1	-1	-1
2	0	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
2	2	-1	-1	-1

Figura 5 Paso 7 CA (9; 5,3,2) – IPOG

8. Cabe vez que el valor de τ cambia se deberá evaluar que valor del alfabeto es el que mayor interacción muestra para el parámetro buscado. Este paso se conoce como crecimiento horizontal.

P1	P2	P3
0	0	0
0	0	1
0	0	2

π				
P1	P3		P2	P3
0	0		0	0
0	1		0	1
0	2		0	2
1	0		1	0
1	1		1	1
1	2		1	2
2	0		2	0
2	1		2	1
2	2		2	2

π				
P1	P3		P2	P3
0	0		0	0
0	1		0	1
0	2		0	2
1	0		1	0
1	1		1	1
1	2		1	2
2	0		2	0
2	1		2	1
2	2		2	2

π				
P1	P3		P2	P3
0	0		0	0
0	1		0	1
0	2		0	2
1	0		1	0
1	1		1	1
1	2		1	2
2	0		2	0
2	1		2	1
2	2		2	2

Se selecciona 0 ← P3 0 = 2 P3 1 = 2 P3 2 = 2

Figura 6 Crecimiento Horizontal CA con $\tau = 1$ (9; 5,3,2) – IPOG

NOTA: En caso de que la interacción mayor se repita, se deberá tomar en orden léxico gráfico.

9. El paso 8 se repetirá hasta que τ sea igual al valor de N. Esto dará como resultado los nuevos valores de la columna P3, por lo que se tendrá una nueva matriz con 3 columnas con valores.
10. Antes de poder encontrar los valores de la siguiente columna (P4), se debe verificar que todas las combinaciones se hallan llenado; en caso de que hagan falta combinaciones se deberá realizar un crecimiento vertical para agregar dichas combinaciones.
11. Para la combinación faltante se deberán agregar fila (s) adicionales que cubran con la combinación faltante, está puede hacerse en una línea, o agregar más, sin embargo, hay que recordar que entre menos filas tenga un covering array, será el óptimo.

π				
P1	P3		P2	P3
0	0		0	0
0	1		0	1
0	2		0	2
1	0		1	0
1	1		1	1
1	2		1	2
2	0		2	0
2	1		2	1
2	2		2	2

Combinación faltante

Figura 7 Combinación faltante CA (9; 5,3,2) – IPOG

12. Una vez que ya no se presentan combinaciones faltantes se puede proceder a hacer un crecimiento horizontal para la siguiente columna. Por lo que se repetirán los pasos a partir del 5.

Para la implementación de IPOG, se requiere una herramienta llamada FireEye [42], la cual está implementada en el lenguaje de JAVA, y consta de cuatro componentes: *CombinatoricsHelper*, la cual es la clase responsables de todos los estudios relacionados con la combinatoria, *CombinationManager*, que gestiona las combinaciones para que puedan almacenarse y comprobarse de manera eficiente, *TestEngine*, que implementa el algoritmo y *TestGenerator*, que conduce todo el proceso de generación de pruebas.

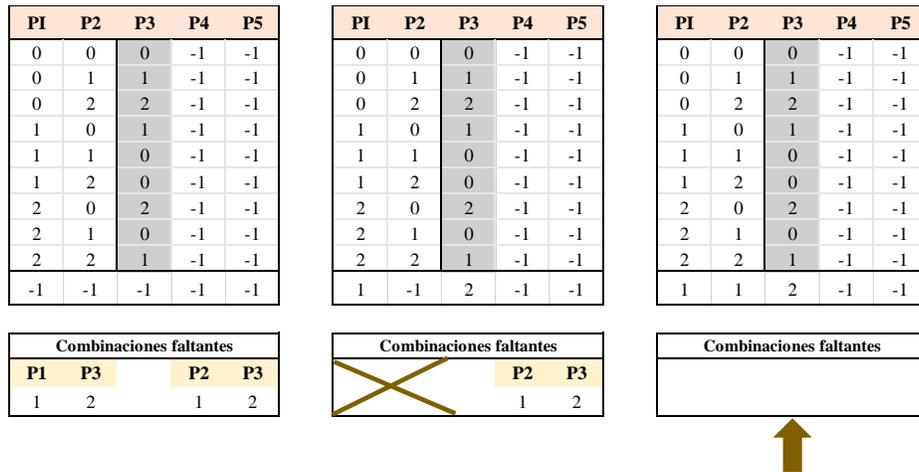


Figura 8 Crecimiento Vertical de un CA (9; 5,3,2) – IPOG

2.5 Covering Arrays en procesos industriales

Se han permitido identificar siete áreas sobre las que a través de los años han tenido aplicación los CAs (o arreglos de cobertura), los cuales son: pruebas de hardware, pruebas de software, biología, procesos de manufactura, diseño de materiales, agricultura y medicina. Para ilustrarlo de mejor manera en la siguiente tabla se detalla cada una de las áreas.

Tabla 8 Áreas de aplicación de Covering Arrays

Área de aplicación	Trabajo Relacionado	Descripción
Pruebas de hardware	[3]	Las relaciones recursivas obtenidas de estructuras de las pruebas y de la definición de las operaciones de las mismas permitirá un método para la construcción de pruebas localmente completas adecuadas para la implementación de software.
Procesos Industriales	[43]	Se sugieren seis pasos del diseño de parámetros, que es la mayor parte del diseño robusto, y se discute un estudio de caso real ilustrado en una empresa coreana.

Pruebas de Software	[44]	AETG (Automatic Efficient Testcase Generator) utiliza una técnica de generación de casos de prueba por parejas para generar tablas de vectores de prueba, donde un conductor de prueba pueda ejecutarse inmediatamente. La cobertura de código se utiliza entonces para indicar la funcionalidad que falta en el modelo de AETG.
Medicina y Agricultura	[23]	Las empresas farmacéuticas utilizan matrices ortogonales para investigar la estabilidad y el período de caducidad de los medicamentos, en el cual le suelen afectar muchos factores diferentes.
Biología/ Regulación de la expresión genética	[45]	Se describe cómo se puede utilizar el diseño combinatorio para definir un conjunto de experimentos que exploren eficazmente los efectos de todas las posibles combinaciones de múltiples entradas en dicha regulación en sistemas de la biología, los genes, las vías y los metabolitos.
Diseño de materiales / pruebas de material	[19]	Estudio de los métodos y aplicaciones del diseño experimental para el desarrollo de materiales de alto rendimiento.
Pruebas de Hardware	[4]	Se utiliza el diseño estadístico de experimentos para estudiar el impacto de los factores y su interacción en el servicio prestado en las redes móviles ad hoc.

Evaluación del rendimiento de los sistemas de comunicación	[20]	Se analizó un experimento de red móvil ad-hoc de cuatro factores para identificar los más importantes en el retardo de las señales entre los nodos de la red.
Pruebas de Software	[7]	Detecta y caracteriza automáticamente los subespacios de configuración (es decir, las opciones y sus ajustes) en los que se manifiestan los errores.
	[8]	Genera casos de prueba más eficientes y completos para encontrar fallas en el tiempo de fijación de defectos y costo de la calidad del software.

De la tabla 8 se concluye que el número de pruebas es el principal factor de impacto en el uso de CAs. Ahora bien, tener un covering array ad-hoc a las necesidades de un experimento es problema abierto, si se busca contar con un arreglo de tamaño óptimo, sin embargo, el propósito de este segundo objetivo es identificar si realmente se requiere un arreglo óptimo, o simplemente uno de un buen tamaño que cubra los intereses perseguidos. El análisis de la literatura ha permitido observar que es deseable utilizar el menor número de casos de prueba posible, sin embargo, una reducción en enfoques afines también es suficiente. Con esto podemos concluir que usar una estrategia ya existente como IPOG cubriría la necesidad de contar con un CA de buen tamaño no necesariamente óptimo, y aunque esto no permitiría realizar una contribución novedosa por sí misma, si lo haría el mostrar que existe un impacto positivo al hacer uso de esos mismos producidos por IPOG en contraste con los diseños experimentales, que es lo que se busca en este trabajo de investigación.

2.6 La Industria Química

La industria química es una subdivisión de la industria manufacturera, pero debido a su naturaleza y a la interdependencia con otras industrias, contribuye a la mayoría de los renglones de la producción. Por otro lado la química industrial puede definirse como la rama

de la química que se encarga de estudiar, los diferentes procesos que conducen a la elaboración de sustancias intermedias o productos químicos terminados de alto valor comercial, a partir de materias primas provenientes de los recursos naturales, y es en la industria química en donde se llevan a cabo la transformación química de las materias primas [46].

La industria química presenta seis características principales como lo son la competencia, la tecnología, investigación y desarrollo, capital, mano de obra e integración. Cada una de ellas es de gran importancia, sin embargo el departamento de investigación y desarrollo es vital para la existencia de la organización en el mercado, debido a que se encargan de desarrollar nuevas líneas de producción, minimizar etapas en los procesos de producción con la consiguiente disminución de costos, evaluación, investigación de nuevos procesos, desarrollo de patentes, asesoramiento técnico y científico a industrias similares y el desarrollo de nuevas tecnologías [46].

Una vez que el departamento de investigación y desarrollo decide aplicar nuevos procesos, estos pueden evaluarse con base en: un análisis económico aproximado y una consideración de la posibilidad técnica basada en el conocimiento de la reacción o de reacciones similares. Una reacción química es un cambio químico en el que una o más sustancias se transforman en otra u otras diferentes. Las sustancias iniciales se llaman reactivos, porque son las que reaccionan, y las sustancias finales se llaman productos, porque son las que se obtienen. Sin embargo una reacción química lleva asociada una reorganización de los átomos de los reactivos para formar los productos [47].

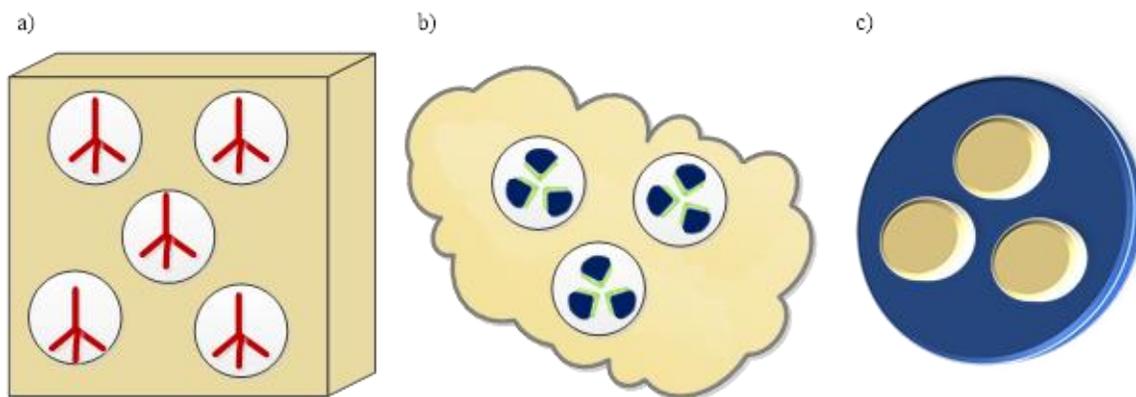


Figura 9 Esquema de tres técnicas de construcción de nanomateriales.

La reacción de síntesis se presenta cuando dos átomos o moléculas diferentes interactúan para formar una molécula o compuesto distinto; cuando se produce una reacción de síntesis, se libera energía y la reacción es exotérmica. Sin embargo, también se puede obtener un resultado endotérmico. Las reacciones de síntesis son una de las clases principales de reacciones químicas, entre las que se incluyen las reacciones de desplazamiento simple, las de desplazamiento doble y las de combustión, entre otras [48].

La síntesis de nanomateriales [49] es actualmente una de las ramas más activas dentro de la nanociencia. La definición de nanomateriales engloba aquellos en los que al menos una de sus dimensiones se encuentra en el rango de la nanoescala, es decir, entre 1 y 100 nanómetros. La cualidad más importante y sorprendente de esta nueva familia de materiales es el desarrollo de importantes propiedades dependientes del tamaño cuando sus dimensiones alcanzan el rango nanométrico. La producción de nuevos nanomateriales se puede llevar a cabo mediante dos estrategias diametralmente opuestas, por un lado, técnicas descendentes o *top-down* (reducción del tamaño de materiales másicos hasta límites nanométricos), y por otro, técnicas ascendentes o “bottom-up” (síntesis de nanomateriales mediante unidades de construcción más pequeñas). Centrándonos en las técnicas ascendentes, el uso de unidades de construcción de tamaño nanométrico permite la preparación de sólidos organizados a varias escalas con gran precisión como se pueden ver en la figura 9, donde se presentan las técnicas de construcción que son: a) Utilización de plantillas (en rojo) que inducen la

formación del sólido (amarillo) a su alrededor y que mantienen su forma original durante la síntesis. b) Auto ensamblaje de componentes individuales (azules y verdes) en estructuras supramoleculares en torno a las cuales crece el sólido (amarillo). c) Mediante el uso de moldes (azul oscuro) es posible preparar sólidos (amarillo) que replican sus huecos mediante el crecimiento restringido en el espacio.

2.6.1 Diseño Factorial en la industria química

El diseño factorial ha contribuido ampliamente en la mayoría de las áreas existentes por lo que la industria química no ha sido una excepción, sin embargo, debido a la diversidad de procesos químicos existentes no ha sido posible aplicar el diseño factorial en todos ellos. Es por eso que en la tabla 9 solo se muestran algunos de los procesos en los que ha intervenido el diseño factorial.

Tabla 9 Diseño factorial en procesos químicos.

Trabajo Relacionado	Proceso	Variables	Objetivo
[50]	Síntesis orgánica que hace reaccionar un gas con un líquido.	1. Relación molar del gas con el líquido. 2. Tiempo de retención. 3. Presión 4. Temperatura del reactor.	Evaluar los efectos principales e interacciones de ciertas reacciones químicas con el fin de mejorar la eficiencia experimental.
[51]	Descarga de aguas residuales de una planta de desalinización	1. Dosis (presente / ausente); 2. TOD (am / pm) 3. Temperatura (15 ° C / 25 ° C) 4. Solución salina (ambiente / elevada)	Determinar si el efluente hipersalino es tóxico para los organismos marinos.

Debido a que los parámetros que se consideran durante una experimentación química son grandes, el diseño factorial completo tiende a ser muy exhaustivo y al generar un gran número de pruebas el investigador prefiere reducir el número de parámetros (considerando los que generen mayor valor) y aplicar un diseño factorial fraccionado, provocando un número menor de pruebas, pero un mayor tiempo de análisis para identificar que variables son las más relevantes.

3 Metodología

Este capítulo detalla la metodología propuesta para la construcción de covering arrays en un proceso químico de síntesis de nanomateriales por reducción química. Esta metodología se consideró, ya que ha sido aplicada ampliamente por artículos del área química puntualmente en este tema. Con ella se valida que los covering arrays cumplan con su funcionamiento y se obtengan resultados, estadísticamente hablando, aceptables durante la experimentación.

3.1 ACTS como herramienta de construcción de CAs

ACTS es una herramienta de generación de pruebas para la construcción de conjuntos de pruebas combinatorias con un nivel de interacción o fuerza t , ya que mediante variaciones de IPOG permitirá la construcción de CAs de menor tamaño [52]. La utilización de esta herramienta permite optimizar la construcción de CAs, satisfaciendo los criterios deseables para este trabajo de rapidez en construcción y tamaño adecuado. En la tabla 10 se enlistan diferentes parámetros empleados durante la experimentación realizada en ACTS utilizando IPOG.

Al utilizar los parámetros de la tabla 10, se pudo concluir que ACTS puede construir CAs con cualquier valor de parámetros y estos son suficientes para poder cubrir la demanda de los casos de estudio de acuerdo a lo revisado.

Tabla 10 Combinación de Parámetros de CA

Nivel de Interacción	Número de Factores	Valores
2	2 – 40	2,3,4
3	2 – 40	2,3,4
4	2 – 40	2,3
5	2 – 40	2
6	2 – 40	2

3.2 Metodología basada en Diseño Factorial

El diseño factorial es un diseño experimental que sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas, mediante pruebas experimentales [10]. En las pruebas se analizan dos tipos de variables del proceso, las variables de control y las variables de respuesta. Las variables de control o factores estudiados son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta. La variable de respuesta permite conocer el efecto o los resultados de cada prueba experimental [10].

<i>Factores</i>		
$k_1 = A$	A_1B_1	A_1B_2
$k_2 = B$	A_2B_1	A_2B_2

Figura 10 Interacción entre factores

En la figura 10 se ejemplifica la interacción resultante de $k = 2$ factores con dos niveles, formando así un diseño factorial $2 \times 2 = 2^2$ que consiste en cuatro combinaciones o puntos experimentales.

3.3 Metodología basada en Covering Arrays

Un covering array (CA) es un objeto combinatorio que con un pequeño número de casos cubre cierto nivel de interacción de un conjunto de parámetros [53]. La construcción de este objeto integra un número de pruebas (N), factores (k), un alfabeto (v) y una fuerza (t) que resulta en una matriz.

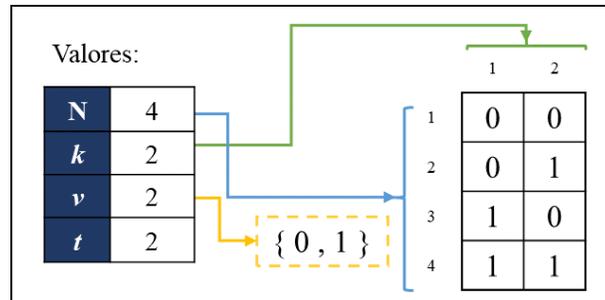


Figura 2 Descripción detallada de un CA (4; 2,2,2).

Dicha matriz se muestra en la figura 2 la cual tiene un tamaño de 4, ($N \times k$ elementos (2×2)) teniendo como valores de construcción $k = 2$ factores, un alfabeto $v = 2 \{0,1\}$ y fuerza o nivel de interacción $t = 2$.

Para efectos de esta investigación en la aplicación de covering arrays en cada caso de estudio se establecieron dos metodologías las cuales son: 1) La construcción de CA con una fuerza específica desde el inicio de su aplicación (*Scratch*) y 2) Un sistema de covering arrays que evoluciona primero las submatrices y luego la fuerza (*Extend*). El primer método (descrito a detalle en el Anexo A) establece la construcción de un CA mediante la herramienta ACTS con la estrategia IPOG bajo el supuesto de determinar la fuerza necesaria para cubrir cierto nivel de interacción en el caso de estudio, es decir, permite construir un conjunto de pruebas desde cero. La fórmula para fijar la fuerza inicial será aplicar $t = k - 2$ (cuando $t \leq 6$), si $t \geq 7$ se recomienda iniciar con $t = 3$ y a partir del resultado de esa operación se construirá un CA, de no encontrarse la combinación ganadora en dicha fuerza se procederá a generar un nuevo CA con la fórmula $t = (k-2) + 1$ y esta fórmula seguirá aplicándose hasta que se llegue al valor máximo de k . Para fines de esta investigación el término “combinación ganadora”, se

referirá a la unión de resultados obtenidos por cada parámetro dentro de cada serie de experimentos por cada caso de estudio.

Para la metodología en donde un CA evoluciona primero las submatrices construidas y seguido de esto aumenta la fuerza, se estableció un sistema en el cual se parte de $t=2$ para la construcción de un CA (Anexo B). Posteriormente al analizar el CA resultante se analizarán cada una de las pruebas y en caso de no aparecer la combinación ganadora la matriz de CA evolucionará, de tal forma en que las pruebas analizadas permanecerán en una nueva matriz sólo que ésta tendrá un nivel de interacción de $t=2+1$. Este paso se repetirá hasta que se encuentre la combinación ganadora o bien hasta que se llegue al valor máximo de k , o dicho de otra manera el método *Extend* permite construir un conjunto de pruebas ampliando un conjunto de pruebas existente. En la tabla 11 se muestra un análisis de ambas metodologías en las cuales se resaltan las ventajas y desventajas de aplicar cada metodología.

Tabla 11 Análisis de ventajas y desventajas de los métodos Scratch y Extend.

Método	Ventajas	Desventajas
<i>Scratch</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar la fuerza, aumenta la posibilidad en donde la combinación ganadora aparezca. 2. Es posible que la combinación ganadora llegue a aparecer en fuerzas pequeñas. 3. La estrategia es eficiente en cuanto a tiempo de construcción. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pese a aumentar la fuerza, puede ocurrir que no aparezca la combinación ganadora. 2. Puede existir un deterioro de tuplas. 3. No construye los CAs más pequeños, pero sí de manera rápida.
<i>Extend</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Parte de un CA, por lo que permite extender el covering array 2. Una vez que aparece la combinación en una fuerza no se necesitan más fuerzas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La fuerza de construcción inicial del covering array influirá directamente en la matriz resultante.

3.4 Indicador de desempeño

El uso de indicadores de desempeño está relacionado directamente con la evaluación de los resultados en varios ámbitos de acción [54], y Bruusgaard define como su objetivo el analizar los datos para aclarar el rendimiento y los resultados de los servicios y su rendimiento [55]. Por ello, el indicador de desempeño que se empleará en esta investigación será *la reducción del número de casos de prueba, el costo de ejecución y de recursos* entre el diseño factorial y el CA.

Según Abdala (2004), bajo la denominación de evaluación de impacto se entiende el proceso evaluativo orientado a medir los resultados de las intervenciones, en cantidad, calidad y extensión según las reglas preestablecido. La evaluación de impacto abarca todos los efectos secundarios a la planeación y a la ejecución [54], que pueden ser: 1) específicos y globales; 2) buscados (según los objetivos) o no; 3) positivos, negativos o neutros; o, 3) directos o indirectos.

Los indicadores (resultados e impactos en relación con los objetivos) se pueden caracterizar según:

- Eficacia: medida de los logros en el número de pruebas;
- Eficiencia: medida de los logros en el número de pruebas, según los recursos utilizados;
- Cobertura: la cantidad de pruebas realizadas y el resultado obtenido mediante el número de pruebas realizadas por cada diseño;
- Pertinencia: el porcentaje de reducción en el número de casos de prueba;
- Adecuación: correlación entre el resultado obtenido y los recursos utilizados.
- Coherencia: grado de correspondencia entre los experimentos realizados en los artículos analizados y lo desarrollado por los diseños (DF y CAs).

4 Análisis y Resultados

Dadas las metodologías implementadas, y con base en los objetivos y los parámetros establecidos para esta investigación, se procedió a realizar un análisis meticuloso de tres casos estudios del área química reportados en la literatura. El análisis se hizo bajo las metodologías establecidas en el capítulo anterior y considerando las condiciones de aplicación previamente señaladas. Los casos analizados se enlistan en la tabla 12.

Tabla 12 Listado de casos detallados para su análisis

Caso de Estudio	Trabajo Relacionado	Descripción Breve del Caso
<i>Caso 1</i>	[56]	Síntesis de nanopartículas de oro obtenidas por reducción de $\text{H}[\text{AuCl}_4]$.
<i>Caso 2</i>	[57]	Influencia de diferentes parámetros en la síntesis por vía húmeda de nanopartículas de plata.
<i>Caso 3</i>	[58]	Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II).

Durante este capítulo se analizarán los casos de la tabla 12 aplicando un diseño factorial completo y los covering arrays bajo el método de *scratch* y *extend*.

4.1 Primer Caso

Corzo [56] realizó una serie de pruebas experimentales, en las cuales varió la concentración de la solución precursora, manteniendo constante la concentración del agente reductor y variando el tipo de agente reductor sobre el tamaño de las nanopartículas de Au a una temperatura de 100°C. Posteriormente fue caracterizada con un analizador del tamaño de partícula por dispersión dinámica de luz (Brookhaven 90-Plus) y con espectrofotometría UV-visible (Perkin Elmer, modelo Lambda 25) para determinar la absorbancia de los plasmones. La segunda serie de pruebas estudió el efecto del pH de la solución precursora (ácido tetracloroáurico) sobre el tamaño de partícula, pero esta vez añadiendo el agente reductor bajo una inyección rápida a la solución en ebullición, considerando que cada prueba fue evaluada bajo la metodología de caracterización.

Tabla 13 Parámetros considerados para cada serie de experimentos del Caso 1

Agente Reductor	Parámetro de Concentración	pH
Citrato trisódico	0.125	2.55
Tartrato de sodio y potasio	0.25	5.0
Borohidruro de sodio	0.5	7.23
		10.82
		12.80

El Caso 1 constó de 3 experimentos. El primer experimento evaluó la influencia de la concentración de la solución precursora sobre el tamaño de partícula y la dispersión (Figura 11), el segundo experimento la Influencia del tipo de agente reductor sobre el tamaño de partícula y la dispersión (Figura 12) y el tercer experimento El efecto del pH sobre el tamaño de partícula (Figura 13).

La figura 11 muestra la preparación de la solución precursora de Au partiendo de H[AuCl₄].3H₂O sólido el cual se disolvió en agua bidestilada y se obtuvo una concentración de 1 Mm (pH=5). A partir de esta solución se prepararon tres disoluciones con concentraciones de 0.125mM, 0.25mM y 0.5Mm, para posteriormente colocar 20 mL de cada

solución en un matraz Erlenmeyer (50mL) sobre la plancha eléctrica para ser calentada hasta los 100°C (ebullición); al alcanzar esta temperatura se añadió con una pipeta gravimétrica un 1mL de solución de AR (17mM). Cada matraz se dejó por 20 minutos a una temperatura de 100°C, manteniendo el volumen inicial añadiendo alícuotas de agua bidestilada en ebullición a cada matraz, para después enfriarlos en baños de agua a temperatura ambiente (27°C).

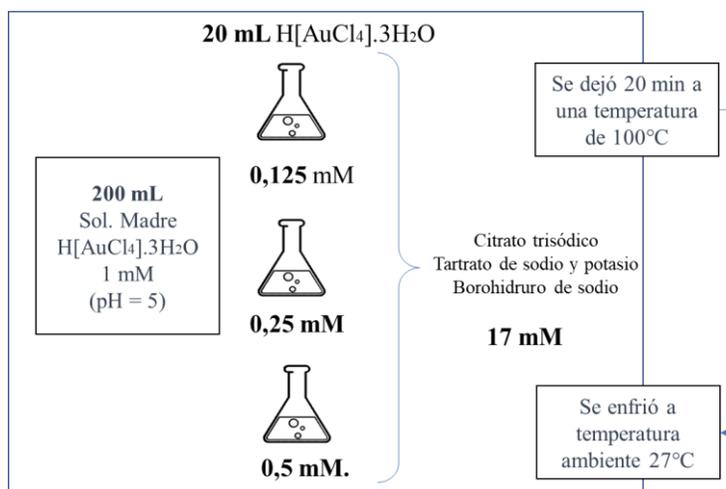


Figura 11 Proceso desarrollado para el primer experimento del Caso 1.

En la figura 12 se ilustra el proceso que se llevó a cabo para el segundo experimento. Este consistió en seleccionar los tres tipos de agentes reductores: el tartrato de sodio y potasio y citrato trisódico (de naturaleza orgánica) y el borohidruro de sodio (de naturaleza inorgánica), cuyas concentraciones se mantuvieron constantes durante todas las pruebas experimentales (17Mm).

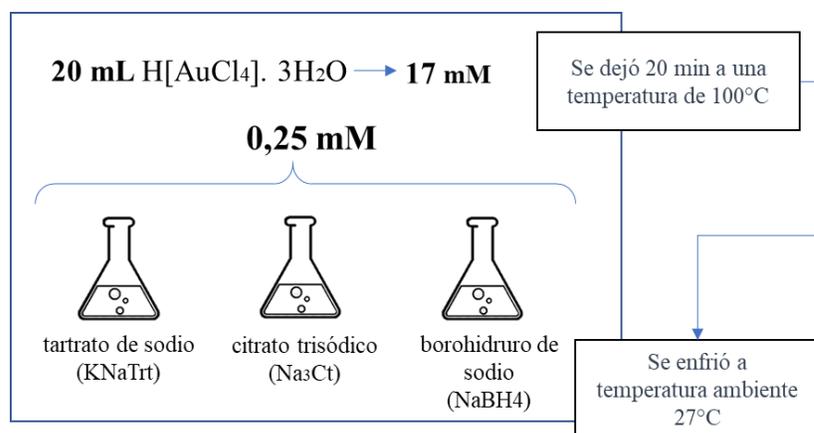


Figura 12 Proceso desarrollado para el segundo experimento del Caso 1

Posteriormente se añadió 1mL de cada uno de los AR obtenidas del primer experimento en plena ebullición y una vez transcurrido el tiempo establecido (20 minutos) se enfriaron los matraces bajo el mismo método del primer experimento.

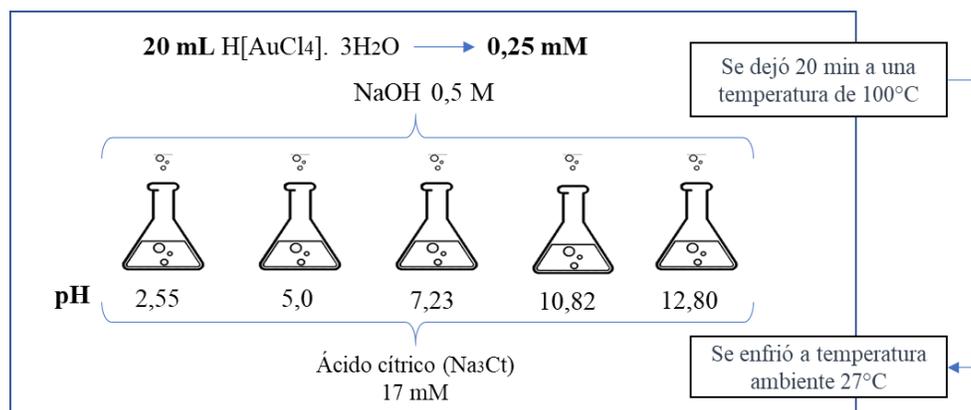


Figura 13 Proceso desarrollado para el tercer experimento del Caso 1

La figura 13 muestra el proceso para evaluar el efecto del pH sobre el tamaño de la partícula preparando cinco soluciones que contenían ácido cítrico (con concentración constante), añadiendo gotas de solución NaOH 0.5M, obteniendo diferentes valores de pH, 2.55 – 5.0 – 7.23 – 10.82 y 12.80, que van desde el medio ácido hasta el alcalino. Además, se colocaron 5 matraces con 20mL de soluciones de H[AuCl₄] de concentración constante 0.25mM para después calentarlo y enfriarlo como los experimentos anteriores.

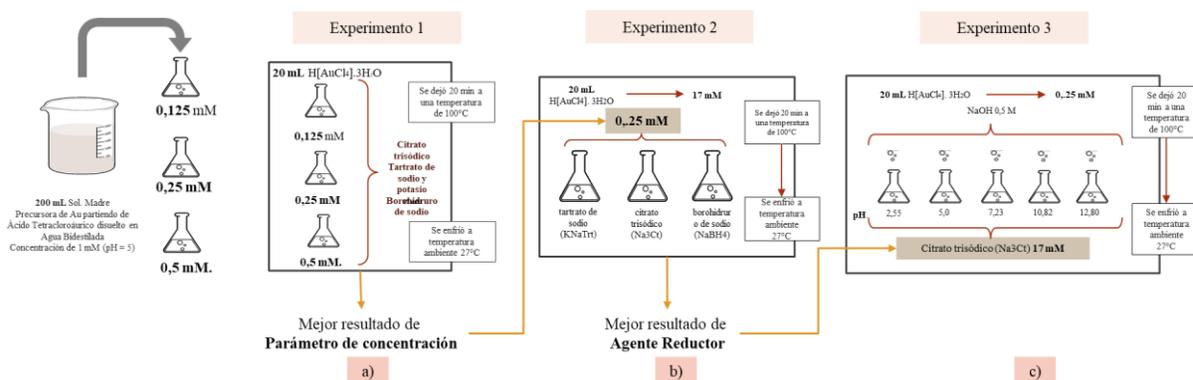


Figura 14 Metodología de evaluación para cada experimento del Caso 1.

Los resultados obtenidos, bajo la experimentación descrita anteriormente, se encontraron ya que se estableció una metodología que evalúa mediante 3 fases. La primera fase analiza un solo parámetro, la segunda fase analiza la influencia de un parámetro con otro parámetro y en la tercera fase otra pareja de parámetros se evalúa hasta obtener un resultado, esta metodología se puede observar en la figura 14.

Una vez establecidas las condiciones de experimentación, se procedió a aplicar el diseño factorial completo y el covering array. Con base a esta metodología se va a intentar integrar el uso de CAs para emular el mismo resultado considerando las condiciones de experimentación descritas anteriormente y los resultados obtenidos.

4.1.1 Diseño Factorial

Para el primer experimento se evaluaron los parámetros del Agente Reductor (Citrato trisódico, Tartrato de sodio y potasio y Borohidruro de sodio) y el Parámetro de concentración (0.125 mM, 0.25mM y 0.5Mm) con un diseño factorial de 2³.

Tabla 14 Conjunto de Pruebas realizadas aplicando DF completo para el Caso 1.

	AR	P. C.		AR	P. C.		AR	P. C.
Prueba 1	Citrato trisodico	0.125	Prueba 1	Citrato trisodico	0.25	Prueba 1	Citrato trisodico	2.55
Prueba 2	Citrato trisodico	0.25	Prueba 2	Tartrato de Na y S	0.25	Prueba 2	Citrato trisodico	5
Prueba 3	Citrato trisodico	0.5	Prueba 3	Borohidruro de sodio	0.25	Prueba 3	Citrato trisodico	7.23
Prueba 4	Tartrato de Na y S	0.125				Prueba 4	Citrato trisodico	10.82
Prueba 5	Tartrato de Na y S	0.25				Prueba 5	Citrato trisodico	12.8
Prueba 6	Tartrato de Na y S	0.5						
Prueba 7	Borohidruro de sodio	0.125						
Prueba 8	Borohidruro de sodio	0.25						
Prueba 9	Borohidruro de sodio	0.5						

a)

b)

c)

El mejor resultado fue la concentración de la solución a 0.25mM ya que arrojó que para el citrato trisódico el tamaño de la partícula de 27.4 nm y 18.3% de dispersión, para el tartrato de sodio el tamaño de la partícula fue de 33.4 nm y 25.2% de dispersión y para el caso de borohidruro de sodio el tamaño de la partícula dio 34.6nm y de 33.2% de dispersión; todos resultados señalados fueron aquellos con valores menores.

El segundo experimento evaluó la Concentración de la solución con mejor resultado (0.25 Mm) y cada agente reductor con las condiciones de la figura 12, y es así como se obtuvo que el citrato trisódico dio el mejor resultado, ya que presentó un menor tamaño de la partícula (28.0nm) y con la dispersión al 28.5%. Para el experimento tres, el mejor pH fue de 4.10 – 5.00 el cual dio un tamaño de la partícula de 29.4nm y de 35.9% de dispersión, reduciendo en un 33% el tamaño de la partícula con respecto al pH con mayor resultado. Los resultados de esta experimentación pueden verse en el Anexo C.

En la tabla 14-a) se puede observar que aplicando un DF completo (3^3) para el primer experimento se realizaron 9 pruebas, para el segundo experimento (3^1) se realizaron 3 pruebas más (tabla 14-b) y para el tercer experimento (1^5), 5 pruebas más, por lo que se realizaron 17 pruebas experimentales para obtener la combinación con mejores resultados (En la tabla 14 se encuentra sombreada, en color verde, la combinación ganadora por cada experimento).

Tabla 15 Parámetros de Construcción del CA para el Caso 1.

	Agente Reductor (P1)	P. de Concentración (P2)	pH (P3)
0	Tartrato de sodio y potasio	0.25	2.55
1	Citrato trisódico	0.125	5.0
2	Borohidruro de sodio	0.5	7.23
3			10.82
4			12.80

4.1.2 Covering Array

La construcción de CA se realizó con base a los siguientes parámetros $k=3$, $v=2-4$ y $t=$, resultando en una matriz de tamaño $N=15$. La codificación de los parámetros para la construcción del CA se muestra en la tabla 15.

Metodología Scratch

Para construir el CA mediante la metodología *scratch* es necesario establecer el valor de la fuerza, por lo que se aplica la fórmula $t = k-1$ (Esta fórmula se aplica cuando $k \leq 3$). La tabla 16 sección a) representa la matriz resultante del CA, mientras que en la parte b) se interpreta la matriz de la tabla 16 a) con los valores que representa el alfabeto del CA. Por lo que, si se observa la tabla a detalle, la línea aparece sombreada, con la combinación $\{1,0,1\}$ equivalente a aplicar como AR: citrato trisódico, P.C.:0.25 mM y pH 5.0.

Tabla 16 CA(15; 3, 4, 2) e interpretación del mismo para el Caso 1 mediante *scratch*

No. Prueba	P1	P2	P3	No. Prueba	P1	P2	P3
1	0	0	0	1	Citrato trisódico	0.125	2.55
2	1	0	1	2	Citrato trisódico	0.25	5
3	2	0	2	3	Citrato trisódico	0.5	7.23
4	0	1	2	4	Tartrato de sodio y potasio	0.125	7.23
5	1	1	0	5	Tartrato de sodio y potasio	0.25	2.55
6	2	1	1	6	Tartrato de sodio y potasio	0.5	5
7	0	2	1	7	Borohidruro de sodio	0.125	5
8	1	2	2	8	Borohidruro de sodio	0.25	7.23
9	2	2	0	9	Borohidruro de sodio	0.5	2.55
10	0	0	3	10	Citrato trisódico	0.125	10.82
11	1	1	3	11	Tartrato de sodio y potasio	0.25	10.82
12	2	2	3	12	Borohidruro de sodio	0.5	10.82
13	0	2	4	13	Borohidruro de sodio	0.125	12.8
14	1	0	4	14	Citrato trisódico	0.25	12.8
15	2	1	4	15	Tartrato de sodio y potasio	0.5	12.8

a)

b)

Metodología Extend

La tabla 17 muestra la construcción de CA mediante la metodología *extend*, en el cual se puede observar que la combinación ganadora {1, 0, 1} si aparece y se encuentra en la primera línea del conjunto de pruebas. Sin embargo, se debe mencionar, que pese a poseer mejores beneficios en comparación con la metodología *scratch*, para este caso se realizan 15 pruebas, teniendo como resultado un CA (15; 3, 4, 2).

Tabla 17 CA (15; 3, 4, 2) e interpretación del mismo para el Caso 1 mediante *extend*

No. Prueba	P1	P2	P3	No. Prueba	P1	P2	P3
1	1	0	1	1	Citrato trisódico	0.25	5.0
2	0	2	1	2	Tartrato de sodio y potasio	0.5	5.0
3	2	1	1	3	Borohidruro de sodio	0.125	5.0
4	1	2	0	4	Citrato trisódico	0.5	2.55
5	0	1	0	5	Tartrato de sodio y potasio	0.125	2.55
6	2	0	0	6	Borohidruro de sodio	0.25	2.55
7	1	1	2	7	Citrato trisódico	0.125	7.23
8	0	0	2	8	Tartrato de sodio y potasio	0.25	7.23
9	2	2	2	9	Borohidruro de sodio	0.5	7.23
10	1	1	3	10	Citrato trisódico	0.125	10.82
11	0	0	3	11	Tartrato de sodio y potasio	0.25	10.82
12	2	2	3	12	Borohidruro de sodio	0.5	10.82
13	1	1	4	13	Citrato trisódico	0.125	12.80
14	0	0	4	14	Tartrato de sodio y potasio	0.25	12.80
15	2	2	4	15	Borohidruro de sodio	0.5	12.80

4.1.3 Análisis de los Resultados del Caso 1

El Caso 1 consistió de 3 experimentos, con 3 parámetros y con niveles variantes de 3,3 y 5, se aplicaron las dos metodologías, DF y CAs, para el DF se realizaron 17 pruebas (para el experimento 1: 9, experimento 2: 3, experimento 3: 5) y para el CA mediante *scratch* se realizaron 15 pruebas y con *extend* 15 pruebas, en ambos casos la fuerza inicial utilizada fue de $t=2$. Para ambos casos se encontró la combinación ganadora (1, 0, 1). Por lo que comparando ambas metodologías (DF vs. CA) se puede concluir lo siguiente dados los indicadores marcados:

- Eficacia: Se redujeron 2 casos de prueba (el DF con 17 pruebas y CA con *scratch* y *extend* con 15 pruebas).

- **Eficiencia:** Al reducir 2 casos de prueba, principalmente se reduce el tiempo de experimentación, en la tabla 18 se pueden observar los recursos utilizados tanto de material como en el tiempo de ejecución por experimento (debe señalarse que pese a indicarse en el artículo las acciones que se realizaron para la experimentación, no se menciona el tiempo que se tomó en cada una) por lo que se puede visualizar el ahorro de recursos. Por otro lado, en el Anexo D se encuentran los tiempos de construcción de una CA.
- **Cobertura:** El resultado obtenido durante la experimentación fue el mismo que aparece tanto en el DF y el CA, y además se redujo el número de pruebas en 2.
- **Pertinencia:** Se redujo en 11.76% las pruebas.
- **Adecuación:** Se validó que el resultado obtenido correspondía al obtenido durante la experimentación y se cuantificó la reducción de recursos como se señala en el punto de eficiencia.
- **Coherencia:** El análisis realizado siguió los mismos lineamientos que la experimentación del artículo analizado.

Tabla 18 Recursos utilizados durante la experimentación para el Caso 1

Número de Experimento	Materiales Utilizados ¹	Tiempo de ejecución ²
<i>Experimento 1</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 200 mL H[AuCl₄].3H₂O • Agua bidestilada • 1mL de solución de AR correspondiente a la prueba 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones • 20 min de ebullición • Tiempo de enfriamiento • 20 min centrifugación
<i>Experimento 2</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 1 mL de cada AR • 20 mL H[AuCl₄] 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones • 20 min de ebullición • Tiempo de enfriamiento • 20 min centrifugación
<i>Experimento 3</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ácido cítrico • Gotas de solución de NaOH • 20 mL H[AuCl₄] • 1 mL de las soluciones de citrato 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones • 20 min de ebullición • Tiempo de enfriamiento
<p>NOTAS:</p> <p>¹ Los materiales listados son los requeridos por cada prueba experimental.</p> <p>² Los tiempos listados son los que se tomaron para realizar cada prueba experimental.</p>		

Se concluye que en este caso aplicar un CA es más efectivo que un DF, ya que reduce el número de pruebas, genera una ganancia en cuanto al tiempo y los recursos que se ahorran con la reducción en un 11.76% y basto con utilizar una fuerza 2 para encontrar la combinación ganadora

4.2 Segundo Caso

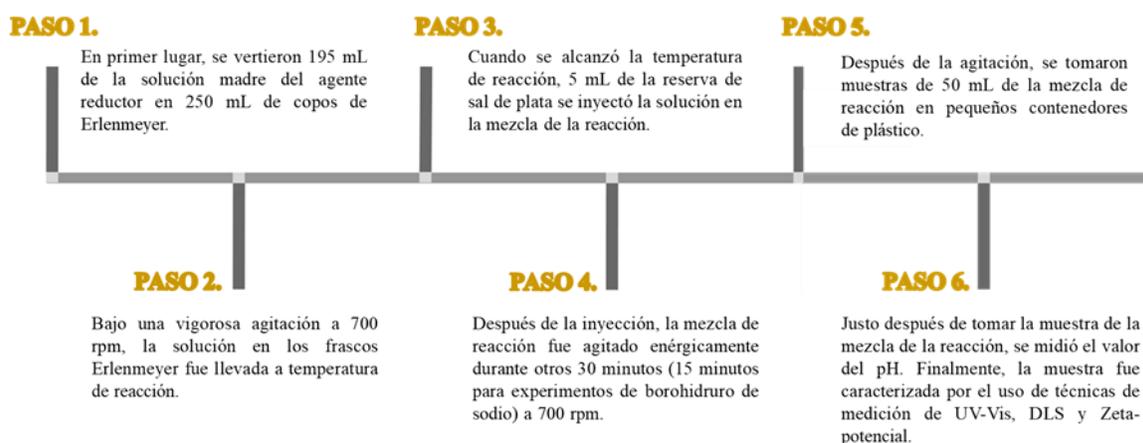


Figura 15 Proceso base para cada experimento en el Caso 2 [57]

Pris [57], en su artículo titulado la Influencia de diferentes parámetros en la síntesis por vía húmeda de nanopartículas de plata, buscaba desarrollar un método para fabricar una solución mono dispersa y estable de nanopartículas de plata por lo que se planteó como objetivo el investigar la influencia de seis parámetros, agente reductor, composición de la mezcla de reacción, temperatura de la reacción, periodo de agitación, adición de agente estabilizador y variación del valor de pH) en el tamaño medio de las partículas, la estabilidad de la muestra y el grado de dispersión.

Las condiciones para establecer la experimentación son las siguientes: Se utilizaron tres agentes reductores diferentes para los experimentos. El dihidrato tribásico de citrato de sodio, el ácido ascórbico y el borohidruro de sodio se obtuvieron de Sigma-Aldrich™. AgNO₃, también se obtuvo de Sigma-Aldrich™, fue usada como la sal de plata. Las soluciones se prepararon usando agua desionizada (Milli-Q, Millipore™). Las soluciones se agitaron con

una barra de agitación magnética. Los calentadores y las barras magnéticas los agitadores, así como los termómetros eran de IKA™. Frascos Erlenmeyer de 250 mL de Schott Duran™ se utilizaron para las soluciones experimentales. Para las soluciones madre del agente reductor, 2.0 L fueron. Todo el material de laboratorio y la cristalería fueron limpiados a fondo antes de usarlos con el Aqua Regia, seguido de un enjuague a fondo con agua desionizada. Para la caracterización, un espectrofotómetro UV-Vis de Varian Inc. y el Zetasizer de Malvern Instruments™. Se realizaron mediciones del valor del pH de las soluciones usando el medidor de pH 713 de Metrohm AG™. Además, se usó hielo para enfriar el borohidruro de sodio durante los experimentos [57].

Tabla 19 Parámetros para la experimentación en el Caso 2

Agente Reductor	Temperatura (°C)	P.M.F de AR a AgNO3	T. A. P. (min)	pH
Citrato trisódico	20, 40, 70, 100	1:1, 2:1, 5:1, 10:1, 20:1	45, 60	5, 6, 7, 8, 10
Ácido Ascórbico	20, 40, 70, 100	1:2, 1:1, 2:1, 5:1, 10: 1	45, 60	5, 6, 7, 8, 9, 10
Borohidruro Sódico	0, 20, 50	1:1, 2:1, 5:1	30, 45	5, 6, 7, 9, 10

Este caso consistió en llevar a cabo cinco experimentos en donde los parámetros que se consideraban por prueba son los siguientes: 1) Temperatura y concentración, 2) Tiempo de agitación, 3) pH, 4) Agente estabilizador presente en la mezcla de la reacción y 5) Agente estabilizador añadido después de la formación de partículas.

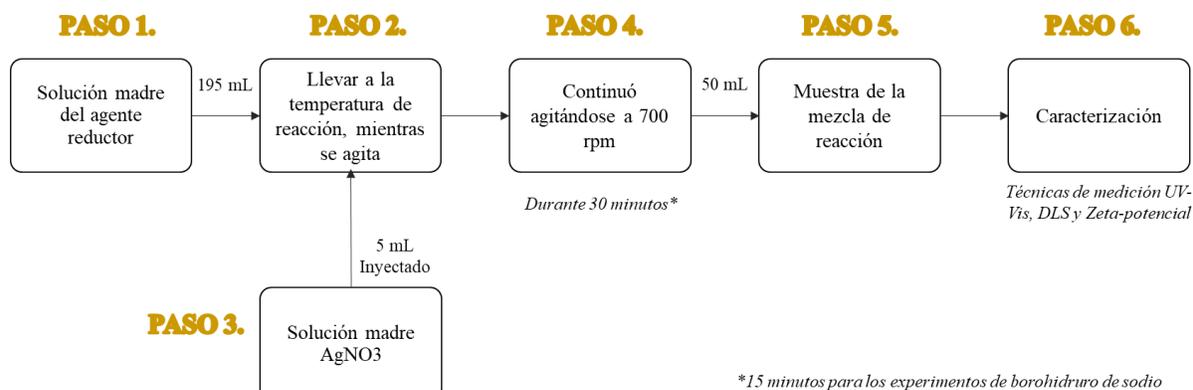


Figura 16 Secuencia de experimentos para la primera serie de experimentos [57]

Cada experimento conllevó un proceso general, el proceso base se puede observar en la figura 15 mientras que en la tabla 19 se muestran los parámetros a considerar para la experimentación en el Caso 2.

La primera serie de experimentos consistió en cambiar la concentración del agente reductor, dando lugar a diferentes proporciones de agente reductor y sal de plata en la mezcla de reacción. Las concentraciones se mantuvieron constantes en 1mM en todos los experimentos. Todos los experimentos se realizaron a una temperatura diferente y se varió la concentración de las soluciones, la temperatura y cada uno de los tres agentes reductores. La figura 16 representa la secuencia de experimentos durante la primera serie.

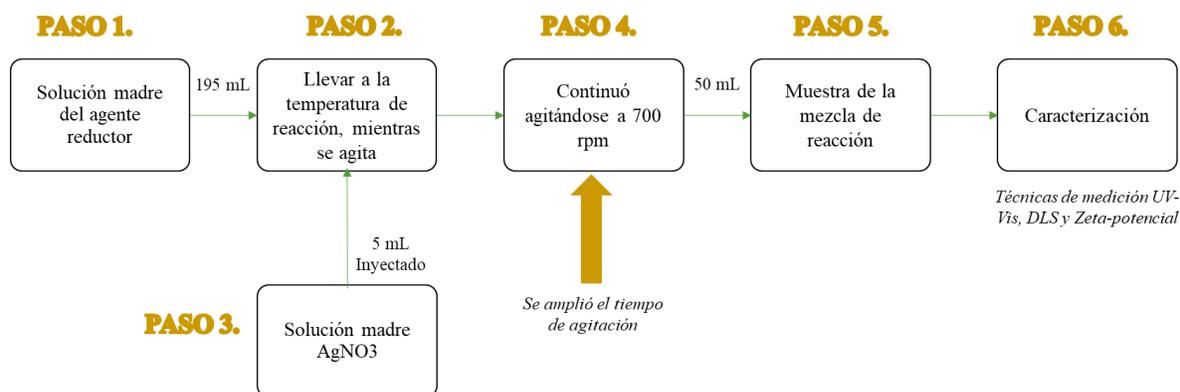


Figura 17 Secuencia de experimentos para la segunda serie de experimentos del Caso 2

La segunda serie de experimentos se basó en la variación de los tiempos de agitación, por lo que se tomaron los mejores resultados de la primera serie de experimentos y se amplió el tiempo de agitación. El proceso detallado se observa en la figura 17.

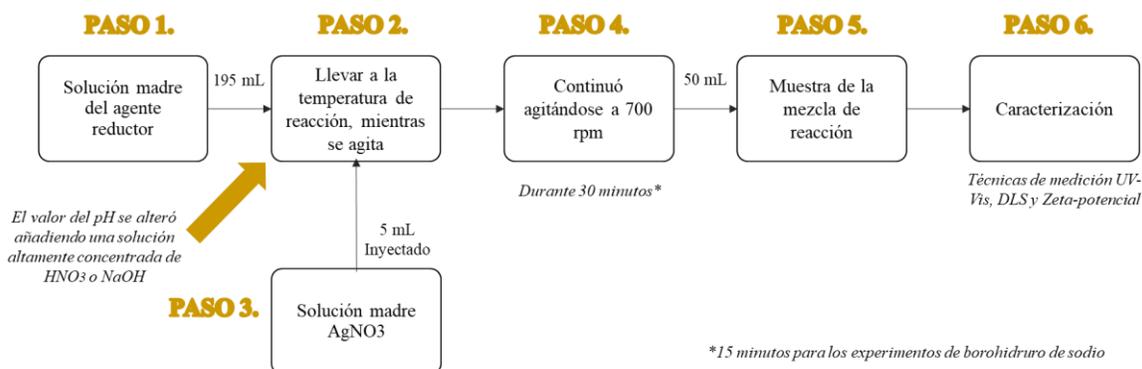


Figura 18 Secuencia de experimentos para la tercera serie de experimentos del Caso 2

La tercera serie de experimentos se realizó con los resultados de las primeras dos series de experimentos (La temperatura y la mejor relación de concentración de agente reductor). La figura 18 es muy parecida a la figura 17 sólo que en esta serie el paso 2 se modificó el valor del pH añadiendo HNO₃. Se experimentaron con 5 y 6 valores del pH para cada AR.

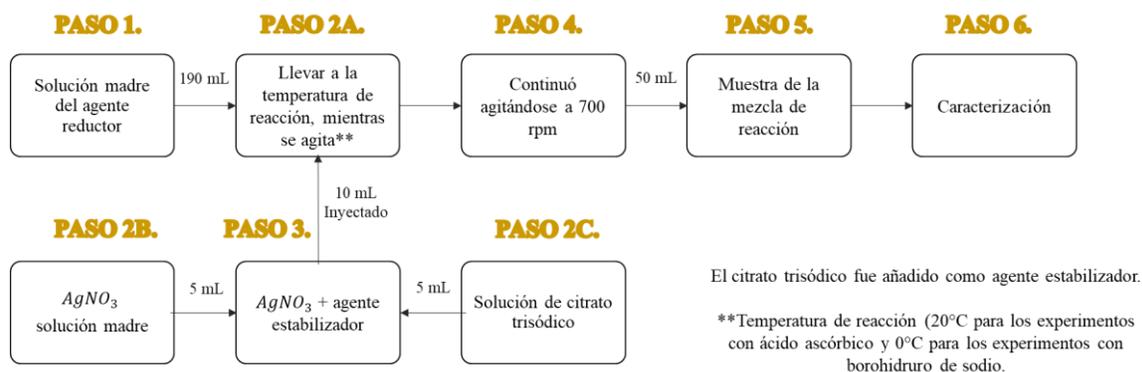


Figura 19 Secuencia de experimentos para la cuarta serie de experimentos del Caso 2

Para la cuarta serie, los mejores resultados de los experimentos anteriores se volvieron a realizar sólo que en esta ocasión se añadió citrato trisódico como agente estabilizador. En la figura 19 se observa cómo primero se prepara la solución madre del agente reductor, y después a esa solución se agrega la relación molar final entre el ácido ascórbico, el borohidruro de sodio y el AgNO₃ en una relación de 1:2 y 2:1 respectivamente.

La figura 20 muestra la quinta serie de experimentos que se realizó similarmente a la cuarta serie, con la excepción del orden de adición del agente estabilizador, ya que fue añadido después de la formación de las partículas (paso 5).

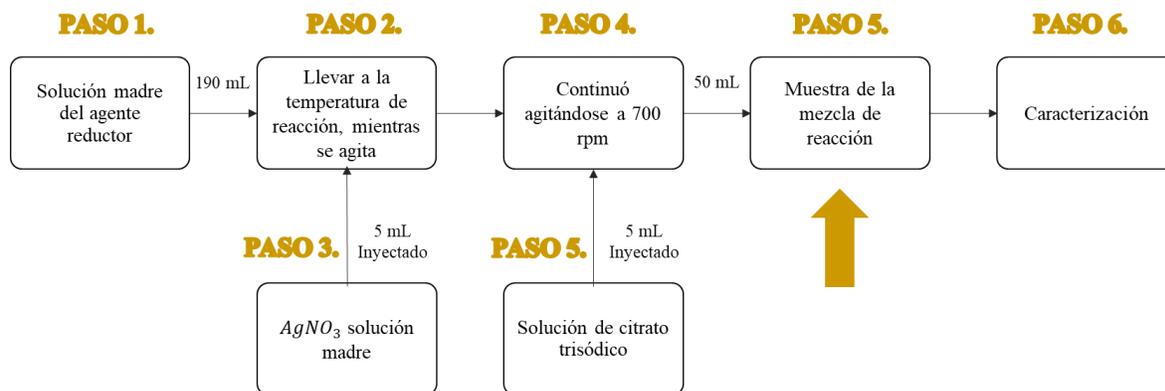


Figura 20 Secuencia de experimentos para la quinta serie de experimentos del Caso 2

4.2.1 Diseño Factorial

Para la primera serie de experimentos por cada agente reductor se varió tanto la temperatura como las proporciones molares finales del Agente Reductor a $AgNO_3$.

Tabla 20 Resultados obtenidos en la primera serie de experimentos del Caso 2.

Agente Reductor	Resultados
Citrato trisódico	Una porción de 5:1 a 70°C (el tiempo de agitación fue de 30 min.)
Ácido ascórbico	Relación de 1:2 a 20°C (el tiempo de agitación fue de 30 min.)
Borohidruro sódico	Relación de 2:1 a 0°C (el tiempo de agitación fue de 15 min.)

Tabla 21 Pruebas realizadas al aplicar un DF completo para el experimento 1 del Caso 2

AR	Prueba	T	P. M. F. de AR a $AgNO_3$	AR	Prueba	T	P. M. F. de AR a $AgNO_3$	AR	Prueba	T	P. M. F. de AR a $AgNO_3$	
Citrato Trisódico	Prueba 1	20	01:01	Ácido Ascórbico	Prueba 1	20	01:02	Borohidruro Sódico	Prueba 1	0	05:01	
	Prueba 2	40			Prueba 2	40			Prueba 2	20		01:01
	Prueba 3	70			Prueba 3	70			Prueba 3	50		02:01
	Prueba 4	100			Prueba 4	100			Prueba 4	0		
	Prueba 5	20	Prueba 5		20	Prueba 5	20		02:01			
	Prueba 6	40	02:01		Prueba 6	40	Prueba 6		50	05:01		
	Prueba 7	70			Prueba 7	70	Prueba 7		0			
	Prueba 8	100			Prueba 8	100	Prueba 8		20			05:01
	Prueba 9	20			Prueba 9	20	Prueba 9		50			
	Prueba 10	40	05:01		Prueba 10	40	02:01	Borohidruro Sódico	Prueba 10	0		
	Prueba 11	70			Prueba 11	70			Prueba 11	20	02:01	
	Prueba 12	100			Prueba 12	100			Prueba 12	50	05:01	
	Prueba 13	20			Prueba 13	20			Prueba 13	0		
	Prueba 14	40	10:01		Prueba 14	40	05:01		Prueba 14	20		
	Prueba 15	70			Prueba 15	70			Prueba 15	50		
	Prueba 16	100			Prueba 16	100			Prueba 16	0		
	Prueba 17	20			Prueba 17	20			Prueba 17	20	10:01	
	Prueba 18	40	20:01		Prueba 18	40	10:01		Prueba 18	40		
	Prueba 19	70			Prueba 19	70		Prueba 19	70			
	Prueba 20	100			Prueba 20	100		Prueba 20	100			

a)

b)

c)

Tabla 22 Datos considerados para la tercera serie de experimentos del Caso 2

Agente Reductor	Temperatura	P.M.F. del AR a AgNO ₃	Valores de pH
Citrato trisódico	70°C	Relación de 5:1 (el valor del pH era de 9)	pH = 5, 6, 7, 8, 10
Ácido ascórbico	20°C	Relación de 1:2 (el valor del pH era de 3.5)	pH = 5, 6, 7, 8, 9, 10
Borohidruro sódico	0°C	Relación de 2:1 (el valor del pH era de 8)	pH = 5, 6, 7, 9, 10

En la tabla 21 se pueden ver las pruebas que fueron realizadas; para el citrato trisódico se realizaron 20 pruebas (a) ya que se variaron la temperatura (20,40,70,100) con la proporción molar del AR a AgNO₃ (1:1, 2:1, 5:1, 10:1, 20:1), en el caso del ácido ascórbico se realizaron 20 pruebas más (b), se variaron la temperatura (20,40,70,100) con la proporción molar del AR a AgNO₃ (1:2, 1:1, 2:1, 5:1, 10: 1) y para el borohidruro sódico se realizaron 9 pruebas más (c), debido a que se variaron la temperatura (0, 20,50 °C) con la proporción molar del AR a AgNO₃ (1:1, 2:1, 5:1).

Tabla 23 Datos considerados para la cuarta y quinta serie de experimentos del Caso 2

Agente Reductor	T	P.M.F. del AR a AgNO ₃	Concentración en la mezcla de reacción	Agente estabilizador
Ácido ascórbico	20 °C	1 : 2	0.25 Mm	Citrato trisódico
			0.5 Mm	
			0.75 Mm	
			1.0 Mm	
Borohidruro sódico	0 °C	2 : 1	0.25 Mm	Citrato trisódico
			0.5 Mm	
			0.75 Mm	
			1.0 Mm	

Por lo tanto, para el primer experimento se realizaron 49 pruebas obteniendo los resultados mostrados en la tabla 20, sin embargo, dado a que este experimento marcará la pauta para los siguientes experimentos, se repitió la prueba, por lo que se realizaron un total de 98 pruebas y el resultado obtenido fue el mismo en ambas rondas. La combinación que dio mejor

resultado se puede observar sombreada en la tabla 21, para el citrato trisódico en color verde (tabla 21 a), para el ácido ascórbico en rosa (tabla 21 b) y para el borohidruro sódico en naranja (tabla 21 c).

Para la segunda serie de experimentos se tomaron los resultados de la primera serie de experimentos que se muestran en la tabla 20 y a estos resultados se agregaron nuevos tiempos de agitación. Para el citrato trisódico y el ácido ascórbico se agregaron tiempos de agitación de 45 y 60 minutos, mientras que para el borohidruro sódico tiempos de 30 y 45 minutos. Aplicando el DF completo (3^2) se realizaron un total de 6 pruebas.

Con respecto a la tercera serie de experimentos, se siguieron considerando los resultados de las series de experimentos anteriores por lo que solo se agregaron nuevos valores de pH. En el caso del citrato trisódico se añadieron valores de pH de 5,6,7,8 y 10, para el ácido ascórbico valores de pH de 5,6,7,8,9 y 10, y para el borohidruro sódico valores de pH de 5,6,7,9 y 10.

Tabla 24 Pruebas realizadas al aplicar un DF completo en la tercera serie de experimentos

AR	Pruebas	T	P.M.F. de AR a AgNO ₃	Valores de pH
Citrato Trisódico	Prueba 1			5
	Prueba 2			6
	Prueba 3	70	5 : 1	7
	Prueba 4			8
	Prueba 5			10
Ácido Ascórbico	Prueba 6			5
	Prueba 7			6
	Prueba 8	20	1 : 2	7
	Prueba 9			8
	Prueba 10			9
	Prueba 11			10
Borohidruro Sódico	Prueba 12			5
	Prueba 13			6
	Prueba 14	0	2 : 1	7
	Prueba 15			9
	Prueba 16			10

La tabla 23 enlista los datos que se consideraron para la aplicación de un DF completo, para el caso del citrato trisódico se realizaron 5 pruebas, para el ácido ascórbico 6 pruebas y para el borohidruro sódico 5 pruebas más, habiendo realizado un total de 16 pruebas, como se muestra en la tabla 24; en la misma tabla sombreado se observa que valor de pH fue el que dio mejor resultado con base a los objetivos (tamaño de la partícula y porcentaje de dispersión).

En cuanto a la cuarta y quinta serie de experimentos los parámetros considerados para la aplicación del DF completo son los que se muestran en la tabla 23. La única diferencia radica en el orden de adición del agente estabilizador (Citrato trisódico) con respecto a los demás parámetros, es decir, el agente estabilizador se añadió después de la formación de las partículas (Paso 5 en la figura 20).

Tabla 25 Datos considerados para la construcción de CA para el Caso 2

	Agente Reductor	Temperatura (°C)	P.M.F del AR a AgNO3	Tiempo de agitación	pH	Concentración en la mezcla de reacción	Agente estabilizador
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
0	Ácido ascórbico	40	01:01	30 min	3.5	1.0 mM	Citrato Trisódico
1	Borohidruro Sódico	100	02:01	15 min	8	0.25 mM	
2	Citrato Trisódico	0	05:01	45 min	5	0.75 mM	
3		20	10:01	60 min	7	0.5 mM	
4		70	01:02		6		
5		50	20:01			10	
6						9	

NOTA:

Mejores resultados obtenido por Agente Reductor:

- Ácido Ascórbico
- Ácido ascórbico y citrato trisódico
- Borohidruro Sódico
- Ácido ascórbico y Borohidruro Sódico
- Citrato trisódico
- Ácido Ascórbico, Borohidruro Sódico y Citrato Trisódico

Por lo tanto, el número de pruebas para la cuarta y quinta serie de experimentos es el mismo 8 pruebas cada una, ya que son 4 valores a analizar de la concentración en la mezcla de

reacción (0.25mM, 0.5mM, 0.75mM y 1.00mM) y dos por cada agente reductos (ácido ascórbico y borohidruro sódico), por lo que se aplicó un DF completo de 2^4 .

4.2.2 Covering Array

Pese a las cualidades que posee el CA, y su particularidad de aplicación individual en cada experimento del Caso 2, se construyó un CA que permitiera evaluar cada parámetro dentro del conjunto de prueba (matriz resultante); por ello los valores considerados para la construcción de CA se mencionan a continuación. Se tomaron en cuenta $k=7$ y $v= 3 a 7$ (*heterogéneo*); En cuanto a N y t , los valores que tomarán se verán relacionados entre ellos, debido a que entre mayor sea la fuerza de interacción (t), mayor serán los números de pruebas que se realizarán.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	1	0	2	1	0	1	0
2	2	1	3	3	0	0	0
3	0	2	5	0	0	2	0
4	1	4	1	2	0	3	0
5	0	5	4	1	0	0	0
6	2	3	2	3	0	2	0
7	0	0	3	0	6	3	0
8	2	1	5	2	6	1	0
9	1	2	1	1	6	0	0
10	1	4	4	3	6	2	0
11	2	5	2	0	6	3	0
12	0	3	3	2	6	1	0
13	1	0	5	3	4	0	0
14	0	1	1	0	4	2	0
15	2	2	4	2	4	3	0
16	0	4	2	1	4	1	0
17	1	5	3	3	4	2	0
18	2	3	5	1	4	3	0
19	2	0	1	2	3	2	0
20	1	1	4	0	3	1	0
21	0	2	2	3	3	0	0
22	2	4	3	1	3	3	0
23	0	5	5	2	3	1	0
24	1	3	1	0	3	0	0
25	0	0	4	2	5	0	0
26	1	1	2	1	5	2	0
27	2	2	3	3	5	1	0
28	1	4	5	0	5	3	0
29	1	5	1	3	5	1	0
30	0	3	4	1	5	0	0
31	0	0	2	2	1	0	0
32	1	1	3	1	1	3	0
33	2	2	5	0	1	2	0
34	2	4	1	3	1	3	0
35	0	5	4	2	1	1	0
36	2	3	1	1	1	1	0
37	0	0	2	0	2	0	0
38	1	1	3	2	2	2	0
39	2	2	5	1	2	3	0
40	1	4	1	3	2	1	0
41	1	5	4	0	2	2	0
42	1	3	4	0	2	3	0
43	2	4	2	1	5	0	0

Figura 21 Construcción de un CA (43; 7, 7, 2) para el Caso 2 mediante *scratch*

Scratch

Para poder construir el CA bajo cualquier modalidad (*scratch* y *extend*) es necesario definir los parámetros a considerar. Es por ello que en la tabla 25 se muestran los parámetros y los niveles de cada uno, además se señala que número (computacional) tomará cada valor y a su vez se define la gama de colores que se usará para identificar el resultado de cada experimento dentro del covering array.

Por otra parte, la figura 21 representa la matriz resultante de aplicar la metodología *scratch* para construir el CA; los valores considerados para la construcción fueron de $k = 7$, $v = 3$ a 7 y $t = 2$. Dado que la fuerza establecida fue de dos $N = 43$, es decir se realizaron 43 pruebas. De igual manera se muestran tres colores de sombreado y tres líneas contorneadas, las cuales significan lo siguiente:

El tono rosado (■) indica los resultados arrojados de la experimentación con el ácido ascórbico como agente reductor, además se puede notar que se ve sombreado por pares lo que indica el resultado de cada experimento por separado y se demuestra que al menos en una ocasión aparece dentro del CA (Esto ayuda a comprobar que efectivamente corresponde a un CA), dicho de otra manera en el caso sombreado de la línea 12 (0 , 3) indicaría el resultado obtenido del primer experimento que correspondería a aplicar el ácido ascórbico a una temperatura de 20°C y así sucesivamente.

El tono naranja (■) indica los resultados arrojados de la experimentación con el Borohidruro sódico, y en cuanto al sombreado la explicación del punto anterior aplica tanto para el sombreado naranja como para el verde.

El tono verde (■) indica los resultados obtenidos de la experimentación con el citrato trisódico, y al igual que como se acota en los puntos anteriores el sombreado corresponde a los resultados por pares de cada experimentación. Sin embargo, también se muestra un contorneado por líneas (línea 9, 30 y 43) que como se indicó cada contorneado tiene un color que corresponde directamente al agente reductor.

Tabla 26 Combinación ganadora por Agente Reductor para el Caso 2

	AR	T	PMFA	TA	pH	C.M.R	AE
Ácido ascórbico	0	3	4	1	5	0	0
Borohidruro Sódico	1	2	1	1	6	0	0
Citrato Trisódico	2	4	2	1	5	0	*

**Como agente estabilizante se utilizó el citrato trisódico, por lo que en la última columna ya no fue necesaria la prueba.*

Las líneas contorneadas de la figura 21 señalan la combinación completa de los 5 experimentos realizados y descritos en el punto 4 de este capítulo, así como también se señala en la tabla 26 la combinación ganadora por cada agente reductor; por ejemplo, para el ácido ascórbico como agente reductor, fue requerida una temperatura de 20°C, con una proporción molar final del ácido ascórbico a AgNO₃ de 01:02 con un tiempo de agitación variable de entre 15 y 60 min (sin embargo por cuestión de recursos se tomará el de menor tiempo, 15 min), con un pH de 10, con 1.0Mm de concentración en la mezcla de reacción y utilizando al citrato trisódico como agente estabilizador. Para la interpretación de la tabla 25 es necesario considerar los datos de la tabla 24.

Extend

Para generar el CA, aplicando *extend* se consideraron los mismos datos que se aplicaron para el diseño factorial completo y el covering array- *scratch*, es por ello que los datos de la tabla 25 se utilizaron tal cual para el CA- *extend*. Es importante recalcar que, para fines analíticos, la experimentación se inició desde la fuerza 2 y aumentando para demostrar la importancia de esta metodología.

En la figura 22 se ve el CA(43; 7, 7,2), y de igual manera como en *scratch* se señala con sombreado y con bordes, los resultados por experimento de cada agente reductor y la combinación total formada por los resultados de cada AR.

Al construir la matriz con $t=2$ (figura 22), se puede observar que las 3 combinaciones buscadas se encontraron y esto se puede ver en la línea 9, la 30 y la 43, donde aparece la combinación (1,2,1,1,6,0,0) correspondiente al borohidruro sódico, (0,3,4,1,5,0,0) del ácido ascórbico y la combinación (2,4,2,1,5,0,0) del citrato trisódico respectivamente. Por ende, al

aparecer las combinaciones en la fuerza 2 ya no es necesario explorar una fuerza 3, sin embargo, fines ilustrativos y justificar la decisión de no aumentar la fuerza, la figura 23. Demuestra el por qué ya no es necesario. Como se enlistó en las ventajas de *extend*, se puntualizó que una característica importante de esta metodología es que, si al aplicar una fuerza y la combinación ganadora aparece, ya no es necesario aumentar la fuerza debido que, aunque se aumente la fuerza, la matriz resultante de la fuerza 2 aparecerá en la de la fuerza 3, es decir, la figura 23 es la matriz de un CA de $t=3$ y como se puede observar las primeras 43 líneas corresponden al CA de $t=2$.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	1	0	2	1	0	1	0	22	2	4	3	1	3	3	0
2	2	1	3	3	0	0	0	23	0	5	5	2	3	1	0
3	0	2	5	0	0	2	0	24	1	3	1	0	3	0	0
4	1	4	1	2	0	3	0	25	0	0	4	2	5	0	0
5	0	5	4	1	0	0	0	26	1	1	2	1	5	2	0
6	2	3	2	3	0	2	0	27	2	2	3	3	5	1	0
7	0	0	3	0	6	3	0	28	1	4	5	0	5	3	0
8	2	1	5	2	6	1	0	29	1	5	1	3	5	1	0
9	1	2	1	1	6	0	0	30	0	3	4	1	5	0	0
10	1	4	4	3	6	2	0	31	0	0	2	2	1	0	0
11	2	5	2	0	6	3	0	32	1	1	3	1	1	3	0
12	0	3	3	2	6	1	0	33	2	2	5	0	1	2	0
13	1	0	5	3	4	0	0	34	2	4	1	3	1	3	0
14	0	1	1	0	4	2	0	35	0	5	4	2	1	1	0
15	2	2	4	2	4	3	0	36	2	3	1	1	1	1	0
16	0	4	2	1	4	1	0	37	0	0	2	0	2	0	0
17	1	5	3	3	4	2	0	38	1	1	3	2	2	2	0
18	2	3	5	1	4	3	0	39	2	2	5	1	2	3	0
19	2	0	1	2	3	2	0	40	1	4	1	3	2	1	0
20	1	1	4	0	3	1	0	41	1	5	4	0	2	2	0
21	0	2	2	3	3	0	0	42	1	3	4	0	2	3	0
								43	2	4	2	1	5	0	0

Figura 22 Matriz resultante del CA (43; 7, 7,2) con *extend* en el Caso 2

Dicho de otra manera, al no construir un CA de $t=3$ se están ahorrando el realizar 187 pruebas lo que representa un ahorro de 81.3% en construcción y experimentación.

4.2.3 Análisis de los Resultados del Caso 2

Para el Caso 2 se realizaron 5 series de experimentos, para ello se consideraron 5 parámetros y cada uno con niveles de entre 2 hasta 6 y obteniendo 3 combinaciones ganadoras por cada agente reductor. Con el DF se realizaron 134 pruebas, mientras que con un CA solo se necesitaron un mínimo de 43 y un máximo de 54, esta diferencia se debió a la metodología que se aplicó, con *extend* se consiguió el mínimo y con *scratch* el máximo. Bajo las dos metodologías se construyó un CA de fuerza 2 y en ambos CAs se encontró la combinación ganadora. Pese a haber encontrado la combinación ganadora con $t = 2$ se construyó un CA con $t = 3$, CA(230, 7, 7, 3), y se validó que la combinación ganadora apareció en la misma línea, comprobando la eficacia del CA con $t = 2$ y desechando la construcción de un nuevo CA con una fuerza mayor, evitando así aumentar el número de casos de prueba.

Tabla 27 Recursos utilizados durante la experimentación para el Caso 1

Número de Experimento	Materiales Utilizados ¹	Tiempo de ejecución ²
<i>Experimento 1</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 195 mL de cada AR • 5 mL AgNO₃ • Agua desionizada • Hielo 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones³ • 40 min agitación de la mezcla de reacción para cada AR y 15 min para el borohidruro de sodio
<i>Experimento 2</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 195 mL de cada AR • 5 mL AgNO₃ 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones • Tiempo de agitación de 45 y 60 min de la mezcla de reacción para cada AR y 30 y 45 min para el borohidruro de sodio
<i>Experimento 3</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 195 mL de cada AR • 5 mL AgNO₃ • HNO₃ 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones³ • Tiempo de ejecución³
<i>Experimento 4</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 190 mL de cada AR • 5 mL AgNO₃ • 5 mL AgNO₃ con agente estabilizante • 10 mL Citrato trisódico 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones³ • Tiempo de ejecución³
<i>Experimento 5</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 190 mL de cada AR • 5 mL AgNO₃ • 5 mL AgNO₃ con agente estabilizante • 5 mL Citrato trisódico 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de preparación de soluciones³ • Tiempo de ejecución³
<p>NOTAS:</p> <p>¹ Los materiales listados son los requeridos por cada prueba experimental.</p> <p>² Los tiempos listados son los que se tomaron para realizar cada prueba experimental.</p> <p>³ No se especificaron los tiempos.</p>		

Para el Caso 2 la evaluación de los indicadores de desempeño fue la siguiente:

- Eficacia: Frente al DF, los CAs redujeron el número de pruebas en 91 pruebas aplicando *extend* y 80 con *scratch*. En la tabla 27 se enlistan los recursos utilizados por experimento, es decir los recursos que se están ahorrando. Un CA que ofrezca menos casos de prueba que un DF es indicador que el tiempo de experimentación se disminuirá en la misma proporción.
- Eficiencia: Al reducirse el número de pruebas se redujeron exponencialmente los tiempos y recursos empleados para la experimentación (Los tiempos de construcción de los CAs se encuentran en el Anexo E). El CA más pequeño para este caso fue con $N = 43$ y su construcción tomo 0.001 seg. (figura 51) y el más grande fue con $N = 265$ con un tiempo de construcción de 0.011 seg. (figura 52)
- Cobertura: El resultado obtenido fue el mismo que el arrojado en el artículo analizado, a excepción que aplicando los CAs el número de casos de prueba fue menor.
- Pertinencia: Los CAs permitieron una disminución de pruebas en un 67.91% con *extend* y un 59.70% con *scratch*.
- Adecuación: Al hablar de una reducción en el número de pruebas realizadas, se tiene que contemplar la disminución de los recursos utilizados en esas 91 (*extend*) y 80 (*scratch*) pruebas que no se realizaron, además del tiempo de ejecución ahorrado como se señala en el indicador de eficiencia.
- Coherencia: El análisis realizado al artículo se llevó a cabo de acuerdo a los lineamientos marcados por lo que se válida que se realizó la evaluación de manera correcta para ambos diseños (DF y CA).

Con la evaluación de los indicadores se concluye que el Caso 2 es un caso de éxito aplicando CAs ya que permitió llegar al mismo resultado que en la experimentación pero con un número menor de pruebas realizadas comparadas con el DF; a su vez se resalta una de las cualidades del CA *extender* ya que redujo las pruebas aún más con un 8.2% frente a un CA *scratch*, concluyendo que es eficiente y eficaz cuando se consideran pocos parámetros (de 1 a 3 parámetros) , pero aún más cuando el número de parámetros es igual o mayor a 5.

4.3 Tercer Caso

El tercer caso analizado hace una evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja en la eliminación de metales pesados como el Pb (II) y Zn (II). Este trabajo por [58] tuvo el objetivo de evaluar la capacidad de biosorción de la cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados y el porcentaje de remoción de dichos metales. Este caso contó de 8 parámetros (metal, pH, tamaño de partícula de la biomasa, concentración del contaminante - metal-, cantidad de la biomasa, temperatura, tiempo de contacto y tipo de tratamiento) y dos niveles cada uno.

Tabla 28 Parámetros y niveles para el Caso 3

Metales	pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT
Pb	1.5	0.4	80	0.5	2	25	1
	5	1	100	1	4	50	2
Zn	1.5	0.4	80	0.5	2	25	1
	5	0.48	100	1	4	50	2
		1					

**Tratamiento 1 sin reticulación, Tratamiento 2 con reticulación*

En la tabla 28 se señala que el parámetro tratamiento (TT) tiene dos niveles, y son representados con los valores 1 y 2. El valor 1 representa un tratamiento sin reticulación y el 2 con reticulación, la descripción de estos dos tratamientos se enlista a continuación.

1. Tratamiento 1: Las cáscaras de naranja se cortaron en fracciones de aprox. 5 cm, y posteriormente lavadas con agua abundante para eliminar la presencia de compuestos como azúcares, suciedad y elementos solubles en agua. Posteriormente se dejaron secar durante 24 horas en un horno de laboratorio a 60°C, con la finalidad de eliminar la humedad. Las cáscaras una vez secas fueron trituradas y cribadas con un tamiz formado por una malla #40 (.4 mm de diámetro de poro) en la parte superior y una malla #18 (1 mm de diámetro de poro) en la parte inferior [58].

2. Tratamiento 2: Se realizaron los pasos del tratamiento 1 con excepción del cribado. Posteriormente se realizó el proceso de dexmetoxilación (se mezclaron 30 gramos de la biomasa, que fue la cáscara de naranja, en 500 ml de una solución de NaOH 0.2 M), la mezcla fue agitada constantemente durante 2 horas, seguidas de un período de reposo. Después se procedió a filtrarla haciendo lavados sucesivos con agua desionizada para eliminar el exceso de NaOH. Posteriormente se secó en una estufa a una temperatura de 40°C durante 2 horas [58].

pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT				
1	1.5	0.4	80	0.5	2	25	1	33	1.5	0.4	80	0.5	2	25	2	65	5	0.4	80	0.5	2	25	1	97	5	0.4	80	0.5	2	25	2
2	1.5	1	80	0.5	2	25	1	34	1.5	1	80	0.5	2	25	2	66	5	1	80	0.5	2	25	1	98	5	1	80	0.5	2	25	2
3	1.5	0.4	100	0.5	2	25	1	35	1.5	0.4	100	0.5	2	25	2	67	5	0.4	100	0.5	2	25	1	99	5	0.4	100	0.5	2	25	2
4	1.5	1	100	0.5	2	25	1	36	1.5	1	100	0.5	2	25	2	68	5	1	100	0.5	2	25	1	100	5	1	100	0.5	2	25	2
5	1.5	0.4	80	1	2	25	1	37	1.5	0.4	80	1	2	25	2	69	5	0.4	80	1	2	25	1	101	5	0.4	80	1	2	25	2
6	1.5	1	80	1	2	25	1	38	1.5	1	80	1	2	25	2	70	5	1	80	1	2	25	1	102	5	1	80	1	2	25	2
7	1.5	0.4	100	1	2	25	1	39	1.5	0.4	100	1	2	25	2	71	5	0.4	100	1	2	25	1	103	5	0.4	100	1	2	25	2
8	1.5	1	100	1	2	25	1	40	1.5	1	100	1	2	25	2	72	5	1	100	1	2	25	1	104	5	1	100	1	2	25	2
9	1.5	0.4	80	0.5	4	25	1	41	1.5	0.4	80	0.5	4	25	2	73	5	0.4	80	0.5	4	25	1	105	5	0.4	80	0.5	4	25	2
10	1.5	1	80	0.5	4	25	1	42	1.5	1	80	0.5	4	25	2	74	5	1	80	0.5	4	25	1	106	5	1	80	0.5	4	25	2
11	1.5	0.4	100	0.5	4	25	1	43	1.5	0.4	100	0.5	4	25	2	75	5	0.4	100	0.5	4	25	1	107	5	0.4	100	0.5	4	25	2
12	1.5	1	100	0.5	4	25	1	44	1.5	1	100	0.5	4	25	2	76	5	1	100	0.5	4	25	1	108	5	1	100	0.5	4	25	2
13	1.5	0.4	80	1	4	25	1	45	1.5	0.4	80	1	4	25	2	77	5	0.4	80	1	4	25	1	109	5	0.4	80	1	4	25	2
14	1.5	1	80	1	4	25	1	46	1.5	1	80	1	4	25	2	78	5	1	80	1	4	25	1	110	5	1	80	1	4	25	2
15	1.5	0.4	100	1	4	25	1	47	1.5	0.4	100	1	4	25	2	79	5	0.4	100	1	4	25	1	111	5	0.4	100	1	4	25	2
16	1.5	1	100	1	4	25	1	48	1.5	1	100	1	4	25	2	80	5	1	100	1	4	25	1	112	5	1	100	1	4	25	2
17	1.5	0.4	80	0.5	2	50	1	49	1.5	0.4	80	0.5	2	50	2	81	5	0.4	80	0.5	2	50	1	113	5	0.4	80	0.5	2	50	2
18	1.5	1	80	0.5	2	50	1	50	1.5	1	80	0.5	2	50	2	82	5	1	80	0.5	2	50	1	114	5	1	80	0.5	2	50	2
19	1.5	0.4	100	0.5	2	50	1	51	1.5	0.4	100	0.5	2	50	2	83	5	0.4	100	0.5	2	50	1	115	5	0.4	100	0.5	2	50	2
20	1.5	1	100	0.5	2	50	1	52	1.5	1	100	0.5	2	50	2	84	5	1	100	0.5	2	50	1	116	5	1	100	0.5	2	50	2
21	1.5	0.4	80	1	2	50	1	53	1.5	0.4	80	1	2	50	2	85	5	0.4	80	1	2	50	1	117	5	0.4	80	1	2	50	2
22	1.5	1	80	1	2	50	1	54	1.5	1	80	1	2	50	2	86	5	1	80	1	2	50	1	118	5	1	80	1	2	50	2
23	1.5	0.4	100	1	2	50	1	55	1.5	0.4	100	1	2	50	2	87	5	0.4	100	1	2	50	1	119	5	0.4	100	1	2	50	2
24	1.5	1	100	1	2	50	1	56	1.5	1	100	1	2	50	2	88	5	1	100	1	2	50	1	120	5	1	100	1	2	50	2
25	1.5	0.4	80	0.5	4	50	1	57	1.5	0.4	80	0.5	4	50	2	89	5	0.4	80	0.5	4	50	1	121	5	0.4	80	0.5	4	50	2
26	1.5	1	80	0.5	4	50	1	58	1.5	1	80	0.5	4	50	2	90	5	1	80	0.5	4	50	1	122	5	1	80	0.5	4	50	2
27	1.5	0.4	100	0.5	4	50	1	59	1.5	0.4	100	0.5	4	50	2	91	5	0.4	100	0.5	4	50	1	123	5	0.4	100	0.5	4	50	2
28	1.5	1	100	0.5	4	50	1	60	1.5	1	100	0.5	4	50	2	92	5	1	100	0.5	4	50	1	124	5	1	100	0.5	4	50	2
29	1.5	0.4	80	1	4	50	1	61	1.5	0.4	80	1	4	50	2	93	5	0.4	80	1	4	50	1	125	5	0.4	80	1	4	50	2
30	1.5	1	80	1	4	50	1	62	1.5	1	80	1	4	50	2	94	5	1	80	1	4	50	1	126	5	1	80	1	4	50	2
31	1.5	0.4	100	1	4	50	1	63	1.5	0.4	100	1	4	50	2	95	5	0.4	100	1	4	50	1	127	5	0.4	100	1	4	50	2
32	1.5	1	100	1	4	50	1	64	1.5	1	100	1	4	50	2	96	5	1	100	1	4	50	1	128	5	1	100	1	4	50	2

Figura 24 Diseño Factorial completo 2⁷ del metal Pb para el Caso 3

4.3.1 Diseño Factorial

El análisis de este caso se abordó bajo dos ángulos, considerando el metal como un parámetro (Diseño Factorial de 2⁸) y no considerándolo (Diseño Factorial de 2⁷). La figura 24 representa la aplicación del DF completo 2⁷ del metal Pb, para este experimento se realizaron 128

Capítulo 4. Análisis y Resultados

M	pH	TP	CM	CC	TC	T	TT	M	pH	TP	CM	CC	TC	T	TT	M	pH	TP	CM	CC	TC	T	TT	M	pH	TP	CM	CC	TC	T	TT				
1	Pb	1.5	0.48	80	0.5	2	25	1	97	Pb	1.5	0.48	80	0.5	2	50	1	193	Pb	1.5	0.48	80	0.5	2	25	2	289	Pb	1.5	0.48	80	0.5	2	50	2
2	Zn	1.5	0.48	80	0.5	2	25	1	98	Zn	1.5	0.48	80	0.5	2	50	1	194	Zn	1.5	0.48	80	0.5	2	25	2	290	Zn	1.5	0.48	80	0.5	2	50	2
3	Pb	5	0.48	80	0.5	2	25	1	99	Pb	5	0.48	80	0.5	2	50	1	195	Pb	5	0.48	80	0.5	2	25	2	291	Pb	5	0.48	80	0.5	2	50	2
4	Zn	5	0.48	80	0.5	2	25	1	100	Zn	5	0.48	80	0.5	2	50	1	196	Zn	5	0.48	80	0.5	2	25	2	292	Zn	5	0.48	80	0.5	2	50	2
5	Pb	1.5	0.4	80	0.5	2	25	1	101	Pb	1.5	0.4	80	0.5	2	50	1	197	Pb	1.5	0.4	80	0.5	2	25	2	293	Pb	1.5	0.4	80	0.5	2	50	2
6	Zn	1.5	0.4	80	0.5	2	25	1	102	Zn	1.5	0.4	80	0.5	2	50	1	198	Zn	1.5	0.4	80	0.5	2	25	2	294	Zn	1.5	0.4	80	0.5	2	50	2
7	Pb	5	0.4	80	0.5	2	25	1	103	Pb	5	0.4	80	0.5	2	50	1	199	Pb	5	0.4	80	0.5	2	25	2	295	Pb	5	0.4	80	0.5	2	50	2
8	Zn	5	0.4	80	0.5	2	25	1	104	Zn	5	0.4	80	0.5	2	50	1	200	Zn	5	0.4	80	0.5	2	25	2	296	Zn	5	0.4	80	0.5	2	50	2
9	Pb	1.5	1	80	0.5	2	25	1	105	Pb	1.5	1	80	0.5	2	50	1	201	Pb	1.5	1	80	0.5	2	25	2	297	Pb	1.5	1	80	0.5	2	50	2
10	Zn	1.5	1	80	0.5	2	25	1	106	Zn	1.5	1	80	0.5	2	50	1	202	Zn	1.5	1	80	0.5	2	25	2	298	Zn	1.5	1	80	0.5	2	50	2
11	Pb	5	1	80	0.5	2	25	1	107	Pb	5	1	80	0.5	2	50	1	203	Pb	5	1	80	0.5	2	25	2	299	Pb	5	1	80	0.5	2	50	2
12	Zn	5	1	80	0.5	2	25	1	108	Zn	5	1	80	0.5	2	50	1	204	Zn	5	1	80	0.5	2	25	2	300	Zn	5	1	80	0.5	2	50	2
13	Pb	1.5	0.48	100	0.5	2	25	1	109	Pb	1.5	0.48	100	0.5	2	50	1	205	Pb	1.5	0.48	100	0.5	2	25	2	301	Pb	1.5	0.48	100	0.5	2	50	2
14	Zn	1.5	0.48	100	0.5	2	25	1	110	Zn	1.5	0.48	100	0.5	2	50	1	206	Zn	1.5	0.48	100	0.5	2	25	2	302	Zn	1.5	0.48	100	0.5	2	50	2
15	Pb	5	0.48	100	0.5	2	25	1	111	Pb	5	0.48	100	0.5	2	50	1	207	Pb	5	0.48	100	0.5	2	25	2	303	Pb	5	0.48	100	0.5	2	50	2
16	Zn	5	0.48	100	0.5	2	25	1	112	Zn	5	0.48	100	0.5	2	50	1	208	Zn	5	0.48	100	0.5	2	25	2	304	Zn	5	0.48	100	0.5	2	50	2
17	Pb	1.5	0.4	100	0.5	2	25	1	113	Pb	1.5	0.4	100	0.5	2	50	1	209	Pb	1.5	0.4	100	0.5	2	25	2	305	Pb	1.5	0.4	100	0.5	2	50	2
18	Zn	1.5	0.4	100	0.5	2	25	1	114	Zn	1.5	0.4	100	0.5	2	50	1	210	Zn	1.5	0.4	100	0.5	2	25	2	306	Zn	1.5	0.4	100	0.5	2	50	2
19	Pb	5	0.4	100	0.5	2	25	1	115	Pb	5	0.4	100	0.5	2	50	1	211	Pb	5	0.4	100	0.5	2	25	2	307	Pb	5	0.4	100	0.5	2	50	2
20	Zn	5	0.4	100	0.5	2	25	1	116	Zn	5	0.4	100	0.5	2	50	1	212	Zn	5	0.4	100	0.5	2	25	2	308	Zn	5	0.4	100	0.5	2	50	2
21	Pb	1.5	1	100	0.5	2	25	1	117	Pb	1.5	1	100	0.5	2	50	1	213	Pb	1.5	1	100	0.5	2	25	2	309	Pb	1.5	1	100	0.5	2	50	2
22	Zn	1.5	1	100	0.5	2	25	1	118	Zn	1.5	1	100	0.5	2	50	1	214	Zn	1.5	1	100	0.5	2	25	2	310	Zn	1.5	1	100	0.5	2	50	2
23	Pb	5	1	100	0.5	2	25	1	119	Pb	5	1	100	0.5	2	50	1	215	Pb	5	1	100	0.5	2	25	2	311	Pb	5	1	100	0.5	2	50	2
24	Zn	5	1	100	0.5	2	25	1	120	Zn	5	1	100	0.5	2	50	1	216	Zn	5	1	100	0.5	2	25	2	312	Zn	5	1	100	0.5	2	50	2
25	Pb	1.5	0.48	80	1	2	25	1	121	Pb	1.5	0.48	80	1	2	50	1	217	Pb	1.5	0.48	80	1	2	25	2	313	Pb	1.5	0.48	80	1	2	50	2
26	Zn	1.5	0.48	80	1	2	25	1	122	Zn	1.5	0.48	80	1	2	50	1	218	Zn	1.5	0.48	80	1	2	25	2	314	Zn	1.5	0.48	80	1	2	50	2
27	Pb	5	0.48	80	1	2	25	1	123	Pb	5	0.48	80	1	2	50	1	219	Pb	5	0.48	80	1	2	25	2	315	Pb	5	0.48	80	1	2	50	2
28	Zn	5	0.48	80	1	2	25	1	124	Zn	5	0.48	80	1	2	50	1	220	Zn	5	0.48	80	1	2	25	2	316	Zn	5	0.48	80	1	2	50	2
29	Pb	1.5	0.4	80	1	2	25	1	125	Pb	1.5	0.4	80	1	2	50	1	221	Pb	1.5	0.4	80	1	2	25	2	317	Pb	1.5	0.4	80	1	2	50	2
30	Zn	1.5	0.4	80	1	2	25	1	126	Zn	1.5	0.4	80	1	2	50	1	222	Zn	1.5	0.4	80	1	2	25	2	318	Zn	1.5	0.4	80	1	2	50	2
31	Pb	5	0.4	80	1	2	25	1	127	Pb	5	0.4	80	1	2	50	1	223	Pb	5	0.4	80	1	2	25	2	319	Pb	5	0.4	80	1	2	50	2
32	Zn	5	0.4	80	1	2	25	1	128	Zn	5	0.4	80	1	2	50	1	224	Zn	5	0.4	80	1	2	25	2	320	Zn	5	0.4	80	1	2	50	2
33	Pb	1.5	1	80	1	2	25	1	129	Pb	1.5	1	80	1	2	50	1	225	Pb	1.5	1	80	1	2	25	2	321	Pb	1.5	1	80	1	2	50	2
34	Zn	1.5	1	80	1	2	25	1	130	Zn	1.5	1	80	1	2	50	1	226	Zn	1.5	1	80	1	2	25	2	322	Zn	1.5	1	80	1	2	50	2
35	Pb	5	1	80	1	2	25	1	131	Pb	5	1	80	1	2	50	1	227	Pb	5	1	80	1	2	25	2	323	Pb	5	1	80	1	2	50	2
36	Zn	5	1	80	1	2	25	1	132	Zn	5	1	80	1	2	50	1	228	Zn	5	1	80	1	2	25	2	324	Zn	5	1	80	1	2	50	2
37	Pb	1.5	0.48	100	1	2	25	1	133	Pb	1.5	0.48	100	1	2	50	1	229	Pb	1.5	0.48	100	1	2	25	2	325	Pb	1.5	0.48	100	1	2	50	2
38	Zn	1.5	0.48	100	1	2	25	1	134	Zn	1.5	0.48	100	1	2	50	1	230	Zn	1.5	0.48	100	1	2	25	2	326	Zn	1.5	0.48	100	1	2	50	2
39	Pb	5	0.48	100	1	2	25	1	135	Pb	5	0.48	100	1	2	50	1	231	Pb	5	0.48	100	1	2	25	2	327	Pb	5	0.48	100	1	2	50	2
40	Zn	5	0.48	100	1	2	25	1	136	Zn	5	0.48	100	1	2	50	1	232	Zn	5	0.48	100	1	2	25	2	328	Zn	5	0.48	100	1	2	50	2
41	Pb	1.5	0.4	100	1	2	25	1	137	Pb	1.5	0.4	100	1	2	50	1	233	Pb	1.5	0.4	100	1	2	25	2	329	Pb	1.5	0.4	100	1	2	50	2
42	Zn	1.5	0.4	100	1	2	25	1	138	Zn	1.5	0.4	100	1	2	50	1	234	Zn	1.5	0.4	100	1	2	25	2	330	Zn	1.5	0.4	100	1	2	50	2
43	Pb	5	0.4	100	1	2	25	1	139	Pb	5	0.4	100	1	2	50	1	235	Pb	5	0.4	100	1	2	25	2	331	Pb	5	0.4	100	1	2	50	2
44	Zn	5	0.4	100	1	2	25	1	140	Zn	5	0.4	100	1	2	50	1	236	Zn	5	0.4	100	1	2	25	2	332	Zn	5	0.4	100	1	2	50	2
45	Pb	1.5	1	100	1	2	25	1	141	Pb	1.5	1	100	1	2	50	1	237	Pb	1.5	1	100	1	2	25	2	333	Pb	1.5	1	100	1	2	50	2
46	Zn	1.5	1	100	1	2	25	1	142	Zn	1.5	1	100	1	2	50	1	238	Zn	1.5	1	100	1	2	25	2	334	Zn	1.5	1	100	1	2	50	2
47	Pb	5	1	100	1	2	25	1	143	Pb	5	1	100	1	2	50	1	239	Pb	5	1	100	1	2	25	2	335	Pb	5	1	100	1	2	50	2
48	Zn	5	1	100	1	2	25	1	144	Zn	5	1	100	1	2	50	1	240	Zn	5	1	100	1	2	25	2	336	Zn	5	1	100				

pruebas. En el caso del metal Zn se aplicó el mismo DF completo de 2^7 y este se puede ver en la figura 25.

Por otro lado, se aplicó un DF completo con ambos metales (Pb y Zn), en este caso no es posible aplicar un DF 2^k dado que un parámetro (tamaño de la partícula) consta de 3 niveles, por lo que se realizaron 384 pruebas. El desarrollo de este DF puede verse en la figura 26.

	pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT		pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT		pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT
1	1.5	0.48	80	0.5	2	25	1	44	1.5	1	100	0.5	4	25	2	87	5	0.48	100	1	2	50	1
2	1.5	1	80	0.5	2	25	1	45	1.5	0.48	80	1	4	25	2	88	5	1	100	1	2	50	1
3	1.5	0.48	100	0.5	2	25	1	46	1.5	1	80	1	4	25	2	89	5	0.48	80	0.5	4	50	1
4	1.5	1	100	0.5	2	25	1	47	1.5	0.48	100	1	4	25	2	90	5	1	80	0.5	4	50	1
5	1.5	0.48	80	1	2	25	1	48	1.5	1	100	1	4	25	2	91	5	0.48	100	0.5	4	50	1
6	1.5	1	80	1	2	25	1	49	1.5	0.48	80	0.5	2	50	2	92	5	1	100	0.5	4	50	1
7	1.5	0.48	100	1	2	25	1	50	1.5	1	80	0.5	2	50	2	93	5	0.48	80	1	4	50	1
8	1.5	1	100	1	2	25	1	51	1.5	0.48	100	0.5	2	50	2	94	5	1	80	1	4	50	1
9	1.5	0.48	80	0.5	4	25	1	52	1.5	1	100	0.5	2	50	2	95	5	0.48	100	1	4	50	1
10	1.5	1	80	0.5	4	25	1	53	1.5	0.48	80	1	2	50	2	96	5	1	100	1	4	50	1
11	1.5	0.48	100	0.5	4	25	1	54	1.5	1	80	1	2	50	2	97	5	0.48	80	0.5	2	25	2
12	1.5	1	100	0.5	4	25	1	55	1.5	0.48	100	1	2	50	2	98	5	1	80	0.5	2	25	2
13	1.5	0.48	80	1	4	25	1	56	1.5	1	100	1	2	50	2	99	5	0.48	100	0.5	2	25	2
14	1.5	1	80	1	4	25	1	57	1.5	0.48	80	0.5	4	50	2	100	5	1	100	0.5	2	25	2
15	1.5	0.48	100	1	4	25	1	58	1.5	1	80	0.5	4	50	2	101	5	0.48	80	1	2	25	2
16	1.5	1	100	1	4	25	1	59	1.5	0.48	100	0.5	4	50	2	102	5	1	80	1	2	25	2
17	1.5	0.48	80	0.5	2	50	1	60	1.5	1	100	0.5	4	50	2	103	5	0.48	100	1	2	25	2
18	1.5	1	80	0.5	2	50	1	61	1.5	0.48	80	1	4	50	2	104	5	1	100	1	2	25	2
19	1.5	0.48	100	0.5	2	50	1	62	1.5	1	80	1	4	50	2	105	5	0.48	80	0.5	4	25	2
20	1.5	1	100	0.5	2	50	1	63	1.5	0.48	100	1	4	50	2	106	5	1	80	0.5	4	25	2
21	1.5	0.48	80	1	2	50	1	64	1.5	1	100	1	4	50	2	107	5	0.48	100	0.5	4	25	2
22	1.5	1	80	1	2	50	1	65	5	0.48	80	0.5	2	25	1	108	5	1	100	0.5	4	25	2
23	1.5	0.48	100	1	2	50	1	66	5	1	80	0.5	2	25	1	109	5	0.48	80	1	4	25	2
24	1.5	1	100	1	2	50	1	67	5	0.48	100	0.5	2	25	1	110	5	1	80	1	4	25	2
25	1.5	0.48	80	0.5	4	50	1	68	5	1	100	0.5	2	25	1	111	5	0.48	100	1	4	25	2
26	1.5	1	80	0.5	4	50	1	69	5	0.48	80	1	2	25	1	112	5	1	100	1	4	25	2
27	1.5	0.48	100	0.5	4	50	1	70	5	1	80	1	2	25	1	113	5	0.48	80	0.5	2	50	2
28	1.5	1	100	0.5	4	50	1	71	5	0.48	100	1	2	25	1	114	5	1	80	0.5	2	50	2
29	1.5	0.48	80	1	4	50	1	72	5	1	100	1	2	25	1	115	5	0.48	100	0.5	2	50	2
30	1.5	1	80	1	4	50	1	73	5	0.48	80	0.5	4	25	1	116	5	1	100	0.5	2	50	2
31	1.5	0.48	100	1	4	50	1	74	5	1	80	0.5	4	25	1	117	5	0.48	80	1	2	50	2
32	1.5	1	100	1	4	50	1	75	5	0.48	100	0.5	4	25	1	118	5	1	80	1	2	50	2
33	1.5	0.48	80	0.5	2	25	2	76	5	1	100	0.5	4	25	1	119	5	0.48	100	1	2	50	2
34	1.5	1	80	0.5	2	25	2	77	5	0.48	80	1	4	25	1	120	5	1	100	1	2	50	2
35	1.5	0.48	100	0.5	2	25	2	78	5	1	80	1	4	25	1	121	5	0.48	80	0.5	4	50	2
36	1.5	1	100	0.5	2	25	2	79	5	0.48	100	1	4	25	1	122	5	1	80	0.5	4	50	2
37	1.5	0.48	80	1	2	25	2	80	5	1	100	1	4	25	1	123	5	0.48	100	0.5	4	50	2
38	1.5	1	80	1	2	25	2	81	5	0.48	80	0.5	2	50	1	124	5	1	100	0.5	4	50	2
39	1.5	0.48	100	1	2	25	2	82	5	1	80	0.5	2	50	1	125	5	0.48	80	1	4	50	2
40	1.5	1	100	1	2	25	2	83	5	0.48	100	0.5	2	50	1	126	5	1	80	1	4	50	2
41	1.5	0.48	80	0.5	4	25	2	84	5	1	100	0.5	2	50	1	127	5	0.48	100	1	4	50	2
42	1.5	1	80	0.5	4	25	2	85	5	0.48	80	1	2	50	1	128	5	1	100	1	4	50	2
43	1.5	0.48	100	0.5	4	25	2	86	5	1	80	1	2	50	1								

Figura 26 Diseño Factorial completo 2^7 del metal Zn para el Caso 3

El DF completo permite identificar los posibles efectos de interacción entre todos los niveles de los factores, es por ello que el analizar el Caso 3 bajo dos modalidades distintas a las anteriormente aplicadas cobra relevancia cuando se ve confrontado con el CA, debido a que,

a mayor número de pruebas en el DF, mayor será la reducción de recursos al aplicar el covering array, o dicho de otra manera mientras más parámetros se analicen el impacto del uso del CA será mayor. Esto sucede ya que al tener un número reducido de pruebas no es posible apreciar la reducción en el número de casos de prueba, aunque si se ha apreciado una reducción en el número de casos de prueba que ronda entre los 10% – 30%.

4.3.2 Covering Array

Al igual que para el Diseño Factorial completo, en el caso del CA se aplicaron las dos metodologías para el análisis del metal individual (Pb y Zn por separado) y de manera conjunta (Pb y Zn a la vez). Para el caso 3 se manejaron diferentes parámetros en la tabla 29 se pueden observar tres tablas cada una de ellas representa a un metal distinto: a) Pb, b) Zn y c) Pb y Zn.

Tabla 29 Parámetros considerados en la construcción de CA para el Caso 3

	pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT
0	1.5	0.4	80	0.5	2	25	1
1	5	1	100	1	4	50	2

a) Pb

	pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT
0	1.5	0.48	80	0.5	2	25	1
1	5	1	100	1	4	50	2

b) Zn

	Metal	pH	TP	C.Mt	C.C.N.	T.C.	T	TT
0	Pb	1.5	0.48	80	0.5	2	25	1
1	Zn	5	0.4	100	1	4	50	2
2			1					

c) Pb y Zn

Pb

Pb y Zn

Zn

Scratch

Para iniciar la construcción del CA con *scratch*, después de establecer los parámetros fue necesario aplicar la fórmula para fijar la fuerza de inicio, por lo que al aplicar $t = k-2$, nos resulta que se debe construir el conjunto de pruebas con $t=5$. Una vez establecida la fuerza se procedió a construir el CA mediante ACTS [52], lo que resultó en un CA (60; 7, 2, 5) (Figura 27).

	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
1	1	1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	0	0	1
3	1	1	1	0	1	0	0
4	1	1	1	0	0	1	1
5	1	1	0	1	1	0	1
6	1	1	0	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	1
8	1	1	0	0	0	0	0
9	1	0	1	1	1	0	0
10	1	0	1	1	0	1	1
11	1	0	1	0	1	1	0
12	1	0	1	0	0	0	1
13	1	0	0	1	1	1	1
14	1	0	0	1	0	0	0
15	1	0	0	0	1	0	1
16	1	0	0	0	0	1	0
17	0	1	1	1	1	0	1
18	0	1	1	1	0	1	0
19	0	1	1	0	1	1	1
20	0	1	1	0	0	0	0
21	0	1	0	1	1	1	0
22	0	1	0	1	0	0	1
23	0	1	0	0	1	0	0
24	0	1	0	0	0	1	1
25	0	0	1	1	1	1	1
26	0	0	1	1	0	0	0
27	0	0	1	0	1	0	1
28	0	0	1	0	0	1	0
29	0	0	0	1	1	0	0
30	0	0	0	1	0	1	1
31	0	0	0	0	1	1	0
32	0	0	0	0	0	0	1
33	0	0	1	1	1	1	0
34	0	1	1	0	1	1	0
35	0	0	0	1	0	1	0
36	0	1	0	0	0	1	0
37	0	1	1	1	1	0	0
38	1	0	1	0	1	0	0
39	0	1	0	1	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
41	1	1	1	1	1	1	1
42	1	0	1	0	1	1	1
43	1	1	0	1	0	1	1
44	1	0	0	0	0	1	1
45	1	0	1	1	1	0	1
46	1	1	1	0	1	0	1
47	1	0	0	1	0	0	1
48	0	1	0	0	0	0	1
49	1	0	0	1	1	1	0
50	1	1	1	1	0	1	0
51	1	1	0	0	1	0	0
52	1	0	1	0	0	0	0
53	0	1	0	1	1	1	1
54	0	1	1	1	0	1	1
55	0	0	0	0	1	0	1
56	0	0	1	0	0	0	1
57	1	1	0	0	0	1	0
58	1	1	1	1	0	0	0
59	0	0	0	0	1	1	1
60	0	0	0	1	1	0	1

Figura 27 CA (60; 7, 2, 5) correspondiente *Pb* construido con *scratch* para el Caso 3

Experimentando con la metodología establecida para la construcción del CA de $t=5$ se pudo localizar en la línea 44 la combinación ganadora para el metal *Pb* (Tabla 29, a)) que corresponde a la combinación (1, 0, 0, 0, 0, 1, 1), es decir, un pH de 5, un tamaño de partícula de 0.4mm, 80ppm de concentración del metal (*Pb*), 0.5g de cantidad de cáscara de naranja,

con un tiempo de contacto de 2 h, a una temperatura de 50°C y un tratamiento con reticulación; aplicando esta combinación se garantiza los mejores resultados para Pb(II).

	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
1	1	1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	0	0	1
3	1	1	1	0	1	0	0
4	1	1	1	0	0	1	1
5	1	1	0	1	1	0	1
6	1	1	0	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	1
8	1	1	0	0	0	0	0
9	1	0	1	1	1	0	0
10	1	0	1	1	0	1	1
11	1	0	1	0	1	1	0
12	1	0	1	0	0	0	1
13	1	0	0	1	1	1	1
14	1	0	0	1	0	0	0
15	1	0	0	0	1	0	1
16	1	0	0	0	0	1	0
17	0	1	1	1	1	0	1
18	0	1	1	1	0	1	0
19	0	1	1	0	1	1	1
20	0	1	1	0	0	0	0
21	0	1	0	1	1	1	0
22	0	1	0	1	0	0	1
23	0	1	0	0	1	0	0
24	0	1	0	0	0	1	1
25	0	0	1	1	1	1	1
26	0	0	1	1	0	0	0
27	0	0	1	0	1	0	1
28	0	0	1	0	0	1	0
29	0	0	0	1	1	0	0
30	0	0	0	1	0	1	1
31	0	0	0	0	1	1	0
32	0	0	0	0	0	0	1
33	0	0	1	1	1	1	0
34	0	1	1	0	1	1	0
35	0	0	0	1	0	1	0
36	0	1	0	0	0	1	0
37	0	1	1	1	1	0	0
38	1	0	1	0	1	0	0
39	0	1	0	1	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
41	1	1	1	1	1	1	1
42	1	0	1	0	1	1	1
43	1	1	0	1	0	1	1
44	1	0	0	0	0	1	1
45	1	0	1	1	1	0	1
46	1	1	1	0	1	0	1
47	1	0	0	1	0	0	1
48	0	1	0	0	0	0	1
49	1	0	0	1	1	1	0
50	1	1	1	1	0	1	0
51	1	1	0	0	1	0	0
52	1	0	1	0	0	0	0
53	0	1	0	1	1	1	1
54	0	1	1	1	0	1	1
55	0	0	0	0	1	0	1
56	0	0	1	0	0	0	1
57	1	1	0	0	0	1	0
58	1	1	1	1	0	0	0
59	0	0	0	0	1	1	1
60	0	0	0	1	1	0	1

Figura 28 CA (60; 7, 2, 5) correspondiente Zn construido con *scratch* para el Caso 3

Para construir el CA correspondiente a Zn, se aplicó nuevamente la fórmula ($t=k-2$) por lo que al igual que con Pb la fuerza de construcción del conjunto de pruebas es de 5. Por lo tanto, resultó un CA (60; 7, 2, 5). La figura 28 muestra cómo en la línea 38 se encontró la combinación ganadora (1, 0, 1, 0, 1, 0, 0) la cual garantizaba que el uso de un pH de 5, un tamaño de partícula de 0.48mm, 100ppm de concentración del metal (Pb), 0.5g de cantidad de cáscara de naranja, con un tiempo de contacto de 4 h, a una temperatura de 25°C y un tratamiento sin reticulación da los mejores resultados para Zn (II).

	Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT		Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
1	0	0	1	1	0	0	0	0	51	1	1	1	1	0	0	0	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	52	0	0	1	1	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0	1	0	1	53	0	1	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	1	0	54	0	1	2	1	1	0	0	0
5	0	1	1	1	0	1	1	0	55	1	0	0	0	0	1	0	1
6	0	1	1	1	1	0	0	1	56	0	0	2	0	0	1	0	0
7	0	1	1	0	0	0	1	1	57	1	1	1	0	0	1	0	0
8	0	1	1	0	1	1	0	0	58	1	0	1	0	1	1	0	1
9	1	0	1	1	0	1	0	0	59	1	1	0	0	1	1	0	1
10	1	0	1	1	1	0	1	1	60	1	1	2	0	1	1	0	1
11	1	0	1	0	0	0	0	1	61	0	0	1	1	0	0	1	1
12	1	0	1	0	1	1	1	0	62	0	1	0	1	0	0	1	0
13	1	1	1	1	0	0	1	0	63	1	1	2	1	0	0	1	0
14	1	1	1	1	1	1	0	1	64	0	0	0	1	1	0	1	1
15	1	1	1	0	0	1	1	1	65	0	0	2	1	1	0	1	0
16	1	1	1	0	1	0	0	0	66	0	1	1	1	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	1	1	67	0	0	1	0	0	1	1	0
18	0	0	0	1	1	0	0	0	68	0	1	0	0	0	1	1	1
19	0	0	0	0	0	0	1	0	69	1	1	2	0	0	1	1	1
20	0	0	0	0	1	1	0	1	70	1	0	0	0	1	1	1	0
21	0	1	0	1	0	0	0	1	71	1	0	2	0	1	1	1	1
22	0	1	0	1	1	1	1	0	72	1	1	1	0	1	1	1	1
23	0	1	0	0	0	1	0	0	73	0	1	1	0	0	0	0	0
24	0	1	0	0	1	0	1	1	74	0	0	0	0	0	0	0	1
25	1	0	0	1	0	0	1	1	75	1	0	2	0	0	0	0	0
26	1	0	0	1	1	1	0	0	76	0	1	1	1	1	1	0	1
27	1	0	0	0	0	1	1	0	77	0	0	0	1	1	1	0	0
28	1	0	0	0	1	0	0	1	78	1	1	2	1	1	1	0	0
29	1	1	0	1	0	1	0	1	79	0	1	2	0	0	0	1	0
30	1	1	0	1	1	0	1	0	80	1	0	1	0	0	0	1	1
31	1	1	0	0	0	0	0	0	81	1	1	0	0	0	0	1	0
32	1	1	0	0	1	1	1	1	82	0	0	2	1	0	1	1	0
33	0	0	2	1	0	0	1	0	83	1	1	1	1	0	1	1	1
34	0	0	2	1	1	1	0	1	84	1	0	0	1	0	1	1	0
35	0	0	2	0	0	1	1	1	85	1	0	2	1	1	0	0	1
36	0	0	2	0	1	0	0	0	86	0	1	2	1	0	1	0	1
37	0	1	2	1	0	1	0	0	87	1	0	2	0	0	0	1	1
38	0	1	2	1	1	0	1	1	88	0	0	0	0	1	0	0	0
39	0	1	2	0	0	0	0	1	89	1	0	0	1	1	1	0	1
40	0	1	2	0	1	1	1	0	90	1	1	1	1	1	1	0	0
41	1	0	2	1	0	1	1	1	91	0	1	1	0	1	0	0	1
42	1	0	2	1	1	0	0	0	92	1	0	2	0	1	1	1	0
43	1	0	2	0	0	0	1	0	93	1	0	1	0	0	0	0	0
44	1	0	2	0	1	1	0	1	94	1	0	1	1	1	0	1	0
45	1	1	2	1	0	0	0	1	95	1	1	1	0	0	1	1	0
46	1	1	2	1	1	1	1	0	96	1	0	1	1	0	0	0	1
47	1	1	2	0	0	1	0	0	97	1	1	0	1	1	0	1	1
48	1	1	2	0	1	0	1	1	98	0	0	0	0	1	1	1	1
49	1	0	0	1	0	0	0	0	99	1	1	0	0	1	1	1	0
50	0	0	2	1	0	0	0	1	100	0	1	2	0	1	0	1	1

Figura 29 CA (100; 8, 3, 5) mediante *scratch* correspondiente a *Pb* y *Zn* para el Caso 3

Al considerar los valores de *Pb* y *Zn* para el conjunto de pruebas, se identificó que el CA es heterogéneo (P3 consta de 3 niveles), 6 de 7 parámetros cuentan con dos niveles cada uno por ende los valores de construcción de CA son: $k=8$, $v=3$ y $t=5$ (el valor de t se identificó

empleando la fórmula $t=k-2$). La figura 29 presenta la matriz resultante/conjunto de pruebas de los valores definidos para la construcción, lo que produjo un CA (100; 8, 3, 5).

	Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
1	0	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	1	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	0	1	0
4	0	0	1	1	1	1	0	1
5	0	0	1	0	0	0	1	1
6	0	0	1	0	0	1	0	0
7	0	0	1	0	1	0	0	1
8	0	0	1	0	1	1	1	0
9	0	1	1	1	0	0	1	0
10	0	1	1	1	0	1	0	1
11	0	1	1	1	1	0	0	0
12	0	1	1	1	1	1	1	1
13	0	1	1	0	0	0	0	1
14	0	1	1	0	0	1	1	0
15	0	1	1	0	1	0	1	1
16	0	1	1	0	1	1	0	0
17	1	0	1	1	0	0	1	1
18	1	0	1	1	0	1	0	0
19	1	0	1	1	1	0	0	1
20	1	0	1	1	1	1	1	0
21	1	0	1	0	0	0	0	0
22	1	0	1	0	0	1	1	1
23	1	0	1	0	1	0	1	0
24	1	0	1	0	1	1	0	1
25	1	1	1	1	0	0	0	1
26	1	1	1	1	0	1	1	0
27	1	1	1	1	1	0	1	1
28	1	1	1	1	1	1	0	0
29	1	1	1	0	0	0	1	0
30	1	1	1	0	0	1	0	1
31	1	1	1	0	1	0	0	0
32	1	1	1	0	1	1	1	1
33	0	0	0	1	0	0	1	0
34	0	0	0	1	0	1	0	1
35	0	0	0	1	1	0	0	0
36	0	0	0	1	1	1	1	1
37	0	0	0	0	0	0	0	1
38	0	0	0	0	0	1	1	0
39	0	0	0	0	1	0	1	1
40	0	0	0	0	1	1	0	0
41	0	1	0	1	0	0	0	0
42	0	1	0	1	0	1	1	1
43	0	1	0	1	1	0	1	0
44	0	1	0	1	1	1	0	1
45	0	1	0	0	0	0	1	1
46	0	1	0	0	0	1	0	0
47	0	1	0	0	1	0	0	1
48	0	1	0	0	1	1	1	0
49	1	0	0	1	0	0	0	1
50	1	0	0	1	0	1	1	0
51	1	0	0	1	1	0	1	1
52	1	0	0	1	1	1	0	0
53	1	0	0	0	0	0	1	0
54	1	0	0	0	0	1	0	1
55	1	0	0	0	1	0	0	0
56	1	0	0	0	1	1	1	1
57	1	1	0	1	0	0	1	1
58	1	1	0	1	0	1	0	0
59	1	1	0	1	1	0	0	1
60	1	1	0	1	1	1	1	0

	Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
61	1	1	0	0	0	0	0	0
62	1	1	0	0	0	1	1	1
63	1	1	0	0	1	0	1	0
64	1	1	0	0	1	1	0	1
65	0	0	2	1	0	0	0	1
66	0	0	2	1	0	1	1	0
67	0	0	2	1	1	0	1	1
68	0	0	2	1	1	1	0	0
69	0	0	2	0	0	0	1	0
70	0	0	2	0	0	1	0	1
71	0	0	2	0	1	0	0	0
72	0	0	2	0	1	1	1	1
73	0	1	2	1	0	0	1	1
74	0	1	2	1	0	1	0	0
75	0	1	2	1	1	0	0	1
76	0	1	2	1	1	1	1	0
77	0	1	2	0	0	0	0	0
78	0	1	2	0	0	1	1	1
79	0	1	2	0	1	0	1	0
80	0	1	2	0	1	1	0	1
81	1	0	2	1	0	0	1	0
82	1	0	2	1	0	1	0	1
83	1	0	2	1	1	0	0	0
84	1	0	2	1	1	1	1	1
85	1	0	2	0	0	0	0	1
86	1	0	2	0	0	1	1	0
87	1	0	2	0	1	0	1	1
88	1	0	2	0	1	1	0	0
89	1	1	2	1	0	0	0	0
90	1	1	2	1	0	1	1	1
91	1	1	2	1	1	0	1	0
92	1	1	2	1	1	1	0	1
93	1	1	2	0	0	0	1	1
94	1	1	2	0	0	1	0	0
95	1	1	2	0	1	0	0	1
96	1	1	2	0	1	1	1	0
97	1	0	0	1	0	0	0	0
98	0	0	2	1	0	0	0	0
99	1	1	1	1	0	0	0	0
100	1	0	1	1	1	0	0	0
101	1	1	0	1	1	0	0	0
102	0	1	2	1	1	0	0	0
103	1	0	0	0	0	1	0	0
104	0	0	2	0	0	1	0	0
105	1	1	1	0	0	1	0	0
106	1	0	1	0	1	1	0	0
107	1	1	0	0	1	1	0	0
108	0	1	2	0	1	1	0	0
109	1	0	1	1	0	0	1	0
110	1	1	0	1	0	0	1	0
111	0	1	2	1	0	0	1	0
112	0	0	0	1	1	0	1	0
113	0	0	2	1	1	0	1	0
114	0	1	1	1	1	0	1	0
115	1	0	1	0	0	1	1	0
116	1	1	0	0	0	1	1	0
117	0	1	2	0	0	1	1	0
118	1	0	0	0	1	1	1	0
119	1	0	2	0	1	1	1	0
120	1	1	1	0	1	1	1	0

	Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
121	0	0	1	1	0	0	0	1
122	0	1	0	1	0	0	0	1
123	1	1	2	1	0	0	0	1
124	0	0	0	1	1	0	0	1
125	1	0	2	1	1	0	0	1
126	0	1	1	1	1	0	0	1
127	0	0	1	0	0	1	0	1
128	0	1	0	0	0	1	0	1
129	1	1	2	0	0	1	0	1
130	0	0	0	0	1	1	0	1
131	1	0	2	0	1	1	0	1
132	0	1	1	0	1	1	0	1
133	0	0	0	1	0	0	1	1
134	1	0	2	1	0	0	1	1
135	0	1	1	1	0	0	1	1
136	0	0	1	1	1	0	1	1
137	0	1	0	1	1	0	1	1
138	0	1	2	1	1	0	1	1
139	0	0	0	0	0	1	1	1
140	1	0	2	0	0	1	1	1
141	0	1	1	0	0	1	1	1
142	1	0	1	0	1	1	1	1
143	1	1	0	0	1	1	1	1
144	1	1	2	0	1	1	1	1
145	0	1	1	0	0	0	0	0
146	0	0	0	0	0	0	0	0
147	1	0	2	0	0	0	0	0
148	0	0	1	1	0	1	0	0
149	0	0	0	1	0	1	0	0
150	1	0	2	1	0	1	0	0
151	0	0	1	0	1	0	1	0
152	0	1	0	0	1	0	1	0
153	1	1	2	0	1	0	1	0
154	0	1	1	1	1	1	1	0
155	0	1	0	1	1	1	1	0
156	1	1	2	1	1	1	1	0
157	0	1	2	0	0	0	0	1
158	1	0	1	0	0	0	0	1
159	1	1	0	0	0	0	0	1
160	0	0	2	1	0	1	0	1
161	1	0	1	1	0	1	0	1
162	1	0	0	1	0	1	0	1
163	0	0	2	0	1	0	1	1
164	1	1	1	0	1	0	1	1
165	1	0	0	0	1	0	1	1
166	0	1	2	1	1	1	1	1
167	1	1	1	1	1	1	1	1
168	1	1	0	1	1	1	1	1
169	0	0	1	0	1	1	0	0
170	0	1	0	1	1	1	0	0
171	1	1	2	0	1	0	0	0
172	0	0	1	0	0	0	1	0
173	0	1	0	0	0	1	1	0
174	1	1	2	1	0	0	1	0
175	0	0	2	1	1	1	0	1
176	1	0	0	0	1	1	0	1
177	1	1	1	0	1	0	0	1
178	0	0	2	0	0	0	1	1
179	1	0	0	1	0	0	0	1
180	1	1	1	1	0	0	1	1

Figura 30 CA(180; 8, 3, 6) correspondiente a Pb y Zn construido con *scratch* para el Caso 3

Como se puede observar en la figura 1 al establecer $t=5$ solo se encontró una de las 2 combinaciones; Esta combinación fue referente al Pb con la combinación de (0,1,1,0,0,1,1) que significa emplear un pH de 5, un tamaño de partícula de 0.4mm, 80ppm de concentración del metal (Pb), 0.5g de cantidad de cáscara de naranja, con un tiempo de contacto de 2 h, a una temperatura de 50°C y un tratamiento con reticulación; aplicando esta combinación se

garantiza los mejores resultados para Pb (II). Al faltar una combinación se aumenta la fuerza ($t+1$), en virtud de lo cual se construye un CA con $t=6$ (Figura 30).

Pese a haberse encontrado la combinación de Zn (1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0) en el CA con $t=6$, la combinación correspondiente al Pb (0,1,1,0,0,1,1) no apareció dentro del mismo conjunto de pruebas (CA (180; 8, 3, 6)), es por ello que, pese a no ser completamente exitoso, dado que no se encontró la combinación deseada, es exitoso ya que garantiza la exploración de todas las combinaciones entre 6 parámetros con un número de casos reducido.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	0	0	0	0	0	0	0	31	1	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	32	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	0	1	0	33	1	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	1	34	1	0	0	1	0	0	0
5	0	0	1	0	0	1	1	35	1	1	1	0	1	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	36	1	0	1	1	1	0	0
7	0	0	1	1	0	0	1	37	1	0	0	0	0	1	0
8	0	0	1	1	1	1	0	38	0	1	0	1	0	1	0
9	0	1	0	0	0	1	0	39	1	0	1	0	1	1	0
10	0	1	0	0	1	0	1	40	1	1	1	1	1	1	0
11	0	1	0	1	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	1
12	0	1	0	1	1	1	1	42	0	1	0	1	0	0	1
13	0	1	1	0	0	0	1	43	0	0	1	0	1	0	1
14	0	1	1	0	1	1	0	44	0	1	1	1	1	0	1
15	0	1	1	1	0	1	1	45	0	1	0	0	0	1	1
16	0	1	1	1	1	0	0	46	0	0	0	1	0	1	1
17	1	0	0	0	0	1	1	47	0	1	1	0	1	1	1
18	1	0	0	0	1	0	0	48	1	0	1	1	1	1	1
19	1	0	0	1	0	0	1	49	0	1	1	0	0	0	0
20	1	0	0	1	1	1	0	50	0	0	0	0	1	0	0
21	1	0	1	0	0	0	0	51	0	0	1	1	0	1	0
22	1	0	1	0	1	1	1	52	0	1	0	1	1	1	0
23	1	0	1	1	0	1	0	53	1	0	1	0	0	0	1
24	1	0	1	1	1	0	1	54	1	0	0	0	1	0	1
25	1	1	0	0	0	0	1	55	1	1	1	1	0	1	1
26	1	1	0	0	1	1	0	56	1	1	0	1	1	1	1
27	1	1	0	1	0	1	1	57	0	0	1	1	1	0	0
28	1	1	0	1	1	0	0	58	0	0	0	0	1	1	0
29	1	1	1	0	0	1	0	59	1	1	1	1	0	0	1
30	1	1	1	0	1	0	1	60	1	1	1	0	0	1	1

Figura 31 CA (60; 7, 3, 5) correspondiente a Pb construido con *extend* para el Caso 3

Extender

Los CA de esta sección fueron construidos en relación con la información de la tabla 29, a su vez el análisis se ejecutó de la misma manera que el *scratch* (*Pb*, *Zn* y *Pb* y *Zn*) en individual y de conjunto sucesivamente.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	0	0	0	0	0	0	0	48	1	0	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1	1	1	49	0	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	1	0	50	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	1	0	1	51	0	0	1	1	0	1	0
5	0	0	1	0	0	1	1	52	0	1	0	1	1	1	0
6	0	0	1	0	1	0	0	53	1	0	1	0	0	0	1
7	0	0	1	1	0	0	1	54	1	0	0	0	1	0	1
8	0	0	1	1	1	1	0	55	1	1	1	1	0	1	1
9	0	1	0	0	0	1	0	56	1	1	0	1	1	1	1
10	0	1	0	0	1	0	1	57	0	0	1	1	1	0	0
11	0	1	0	1	0	0	0	58	0	0	0	0	1	1	0
12	0	1	0	1	1	1	1	59	1	1	1	1	0	0	1
13	0	1	1	0	0	0	1	60	1	1	1	0	0	1	1
14	0	1	1	0	1	1	0	61	1	0	0	0	0	0	1
15	0	1	1	1	0	1	1	62	0	1	0	0	0	0	0
16	0	1	1	1	1	0	0	63	0	0	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	1	1	64	1	1	1	0	0	0	1
18	1	0	0	0	1	0	0	65	0	0	0	1	0	0	0
19	1	0	0	1	0	0	1	66	1	1	0	1	0	0	1
20	1	0	0	1	1	1	0	67	1	0	1	1	0	0	1
21	1	0	1	0	0	0	0	68	0	1	1	1	0	0	0
22	1	0	1	0	1	1	1	69	1	1	0	0	1	0	1
23	1	0	1	1	0	1	0	70	1	0	1	0	1	0	0
24	1	0	1	1	1	0	1	71	0	1	1	0	1	0	0
25	1	1	0	0	0	0	1	72	1	0	0	1	1	0	1
26	1	1	0	0	1	1	0	73	0	1	0	1	1	0	0
27	1	1	0	1	0	1	1	74	1	1	1	1	1	0	1
28	1	1	0	1	1	0	0	75	0	0	0	0	0	1	0
29	1	1	1	0	0	1	0	76	1	1	0	0	0	1	1
30	1	1	1	0	1	0	1	77	1	0	1	0	0	1	1
31	1	1	1	1	0	0	0	78	0	1	1	0	0	1	0
32	1	1	1	1	1	1	1	79	1	0	0	1	0	1	1
33	1	1	0	0	0	0	0	80	1	0	0	0	1	1	1
34	1	0	0	1	0	0	0	81	0	1	0	0	1	1	0
35	1	1	1	0	1	0	0	82	0	0	1	0	1	1	0
36	1	0	1	1	1	0	0	83	1	1	1	0	1	1	1
37	1	0	0	0	0	1	0	84	0	0	0	1	1	1	1
38	0	1	0	1	0	1	0	85	0	1	1	1	1	1	0
39	1	0	1	0	1	1	0	86	1	0	1	1	0	0	0
40	1	1	1	1	1	1	0	87	1	1	0	0	1	0	0
41	0	0	0	0	0	0	1	88	0	0	0	1	1	0	0
42	0	1	0	1	0	0	1	89	0	0	1	0	0	1	0
43	0	0	1	0	1	0	1	90	1	1	1	1	0	1	0
44	0	1	1	1	1	0	1	91	1	1	0	1	1	0	1
45	0	1	0	0	0	1	1	92	0	0	1	1	0	1	1
46	0	0	0	1	0	1	1	93	1	1	0	0	1	1	1
47	0	1	1	0	1	1	1	94	1	1	0	1	0	1	0
								95	0	0	1	1	1	1	1

Figura 33 CA (95; 7, 3, 6) correspondiente a *Pb* construido con *extend* para el Caso 3

Analizando el número de parámetros considerados para la construcción individual del CA (Pb, Zn), se aplicó la fórmula para establecer la fuerza, $t=k-2$, obteniendo una fuerza 5 de construcción.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1	0	0	0	0	0	0	0	48	1	0	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1	1	1	49	0	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	1	0	50	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	1	0	1	51	0	0	1	1	0	1	0
5	0	0	1	0	0	1	1	52	0	1	0	1	1	1	0
6	0	0	1	0	1	0	0	53	1	0	1	0	0	0	1
7	0	0	1	1	0	0	1	54	1	0	0	0	1	0	1
8	0	0	1	1	1	1	0	55	1	1	1	1	0	1	1
9	0	1	0	0	0	1	0	56	1	1	0	1	1	1	1
10	0	1	0	0	1	0	1	57	0	0	1	1	1	0	0
11	0	1	0	1	0	0	0	58	0	0	0	0	1	1	0
12	0	1	0	1	1	1	1	59	1	1	1	1	0	0	1
13	0	1	1	0	0	0	1	60	1	1	1	0	0	1	1
14	0	1	1	0	1	1	0	61	1	0	0	0	0	0	1
15	0	1	1	1	0	1	1	62	0	1	0	0	0	0	0
16	0	1	1	1	1	0	0	63	0	0	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	1	1	64	1	1	1	0	0	0	1
18	1	0	0	0	1	0	0	65	0	0	0	1	0	0	0
19	1	0	0	1	0	0	1	66	1	1	0	1	0	0	1
20	1	0	0	1	1	1	0	67	1	0	1	1	0	0	1
21	1	0	1	0	0	0	0	68	0	1	1	1	0	0	0
22	1	0	1	0	1	1	1	69	1	1	0	0	1	0	1
23	1	0	1	1	0	1	0	70	1	0	1	0	1	0	0
24	1	0	1	1	1	0	1	71	0	1	1	0	1	0	0
25	1	1	0	0	0	0	1	72	1	0	0	1	1	0	1
26	1	1	0	0	1	1	0	73	0	1	0	1	1	0	0
27	1	1	0	1	0	1	1	74	1	1	1	1	1	0	1
28	1	1	0	1	1	0	0	75	0	0	0	0	0	1	0
29	1	1	1	0	0	1	0	76	1	1	0	0	0	1	1
30	1	1	1	0	1	0	1	77	1	0	1	0	0	1	1
31	1	1	1	1	0	0	0	78	0	1	1	0	0	1	0
32	1	1	1	1	1	1	1	79	1	0	0	1	0	1	1
33	1	1	0	0	0	0	0	80	1	0	0	0	1	1	1
34	1	0	0	1	0	0	0	81	0	1	0	0	1	1	0
35	1	1	1	0	1	0	0	82	0	0	1	0	1	1	0
36	1	0	1	1	1	0	0	83	1	1	1	0	1	1	1
37	1	0	0	0	0	1	0	84	0	0	0	1	1	1	1
38	0	1	0	1	0	1	0	85	0	1	1	1	1	1	0
39	1	0	1	0	1	1	0	86	1	0	1	1	0	0	0
40	1	1	1	1	1	1	0	87	1	1	0	0	1	0	0
41	0	0	0	0	0	0	1	88	0	0	0	1	1	0	0
42	0	1	0	1	0	0	1	89	0	0	1	0	0	1	0
43	0	0	1	0	1	0	1	90	1	1	1	1	0	1	0
44	0	1	1	1	1	0	1	91	1	1	0	1	1	0	1
45	0	1	0	0	0	1	1	92	0	0	1	1	0	1	1
46	0	0	0	1	0	1	1	93	1	1	0	0	1	1	1
47	0	1	1	0	1	1	1	94	1	1	0	1	0	1	0
								95	0	0	1	1	1	1	1

Figura 33 CA (95; 7, 3, 6) correspondiente a Zn construido con *extend* para el Caso 3

La figura 31 representa un CA (60; 7, 3,5) para Pb. Al construir con base a $t=5$, no se encontró la combinación correspondiente a Pb, (1, 1, 0, 0, 0, 1, 1), por lo cual es necesario ampliar el CA a $t=6$. La figura 32 corresponde al conjunto de pruebas generado con $t=6$.

	Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	1
3	0	0	0	1	0	1	0	1
4	0	0	0	1	1	0	1	0
5	0	1	0	0	0	1	1	0
6	0	1	0	0	1	0	0	1
7	0	1	0	1	0	0	1	1
8	0	1	0	1	1	1	0	0
9	1	0	0	0	0	1	0	0
10	1	0	0	0	1	0	1	1
11	1	0	0	1	0	0	0	1
12	1	0	0	1	1	1	1	0
13	1	1	0	0	0	0	1	0
14	1	1	0	0	1	1	0	1
15	1	1	0	1	0	1	1	1
16	1	1	0	1	1	0	0	0
17	0	0	1	0	0	1	1	1
18	0	0	1	0	1	0	0	0
19	0	0	1	1	0	0	1	0
20	0	0	1	1	1	1	0	1
21	0	1	1	0	0	0	0	1
22	0	1	1	0	1	1	1	0
23	0	1	1	1	0	1	0	0
24	0	1	1	1	1	0	1	1
25	1	0	1	0	0	0	1	1
26	1	0	1	0	1	1	0	0
27	1	0	1	1	0	1	1	0
28	1	0	1	1	1	0	0	1
29	1	1	1	0	0	1	0	1
30	1	1	1	0	1	0	1	0
31	1	1	1	1	0	0	0	0
32	1	1	1	1	1	1	1	1
33	0	0	2	0	0	0	1	0
34	0	0	2	0	1	1	0	1
35	0	0	2	1	0	1	1	1
36	0	0	2	1	1	0	0	0
37	0	1	2	0	0	1	0	0
38	0	1	2	0	1	0	1	1
39	0	1	2	1	0	0	0	1
40	0	1	2	1	1	1	1	0
41	1	0	2	0	0	1	1	1
42	1	0	2	0	1	0	0	0
43	1	0	2	1	0	0	1	0
44	1	0	2	1	1	1	0	1
45	1	1	2	0	0	0	0	1
46	1	1	2	0	1	1	1	0
47	1	1	2	1	0	1	0	0
48	1	1	2	1	1	0	1	1
49	1	0	1	0	0	0	0	0
50	0	0	2	0	0	0	0	1
51	1	1	0	0	0	0	0	1
52	0	0	0	0	1	0	0	0
53	0	1	1	0	1	0	0	0
54	0	1	2	0	1	0	0	0
55	1	0	1	1	0	1	0	1
56	0	0	2	1	0	1	0	0
57	1	1	0	1	0	1	0	0
58	1	0	0	1	1	1	0	1
59	1	1	1	1	1	1	0	1
60	1	1	2	1	1	1	0	1

Figura 34 Parte 1 - CA (100; 8, 3, 5) correspondiente a Pb y Zn construido con *extend* para el Caso 3

En la línea 76 de la $t=6$ aparece la combinación que dio los mejores resultados con el metal Pb, por lo que ya no es necesario explorar en una fuerza mayor, debido a que ya se encontró la combinación que se estaba buscando. Por otro lado, para el análisis de Zn se aplicó el

mismo procedimiento que con Pb, se construyó un CA de $t=5$, y al no aparecer la combinación buscada (1, 0, 1, 0, 1, 0, 0) se construyó uno de $t=6$ (figura 33).

	Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT		Mt	pH	TP	C.Mt	CCN	T.C.	T	TT
61	0	0	0	0	0	0	1	1	81	1	1	1	1	0	0	1	0
62	0	1	1	0	0	0	1	0	82	0	0	2	0	0	1	1	0
63	1	1	2	0	0	0	1	0	83	1	1	0	0	0	1	1	1
64	0	0	1	0	1	0	1	1	84	1	0	1	0	0	1	1	0
65	0	0	2	0	1	0	1	0	85	1	0	2	0	1	0	0	1
66	0	1	0	0	1	0	1	0	86	0	1	2	0	0	1	0	1
67	0	0	0	1	0	1	1	0	87	1	0	2	1	0	0	1	1
68	0	1	1	1	0	1	1	1	88	0	0	1	1	1	0	0	0
69	1	1	2	1	0	1	1	1	89	1	0	1	0	1	1	0	1
70	1	0	1	1	1	1	1	0	90	1	1	0	0	1	1	0	0
71	1	0	2	1	1	1	1	1	91	0	1	0	1	1	0	0	1
72	1	1	0	1	1	1	1	1	92	1	0	2	1	1	1	1	0
73	0	1	0	1	0	0	0	0	93	1	0	0	1	0	0	0	0
74	0	0	1	1	0	0	0	1	94	1	0	0	0	1	0	1	0
75	1	0	2	1	0	0	0	0	95	1	1	0	1	0	1	1	0
76	0	1	0	0	1	1	0	1	96	1	0	0	0	0	0	0	1
77	0	0	1	0	1	1	0	0	97	1	1	1	0	1	0	1	1
78	1	1	2	0	1	1	0	0	98	0	0	1	1	1	1	1	1
79	0	1	2	1	0	0	1	0	99	1	1	1	1	1	1	1	0
80	1	0	0	1	0	0	1	1	100	0	1	2	1	1	0	1	1

Figura 35 Parte 2 - CA (100; 8, 3, 5) correspondiente a Pb y Zn construido con *extend* para el Caso 3

Tanto para Pb y Zn se requirieron 95 pruebas cada una, y en la fuerza 6 se encontró la combinación ganadora en la línea 76 y la 70 respectivamente. Al encontrarse las combinaciones en $t=6$, ya no es requerido explorar una fuerza mayor.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	1	0	0	1	1	0	1
2	0	0	0	0	1	1	1	1	15	1	1	0	1	0	1	1	1
3	0	0	0	1	0	1	0	1	16	1	1	0	1	1	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	1	0	17	0	0	1	0	0	1	1	1
5	0	1	0	0	0	1	1	0	18	0	0	1	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	1	0	0	1	19	0	0	1	1	0	0	1	0
7	0	1	0	1	0	0	1	1	20	0	0	1	1	1	1	0	1
8	0	1	0	1	1	1	0	0	21	0	1	1	0	0	0	0	1
9	1	0	0	0	0	1	0	0	22	0	1	1	0	1	1	1	0
10	1	0	0	0	1	0	1	1	23	0	1	1	1	0	1	0	0
11	1	0	0	1	0	0	0	1	24	0	1	1	1	1	0	1	1
12	1	0	0	1	1	1	1	0	25	1	0	1	0	0	0	1	1
13	1	1	0	0	0	0	1	0	26	1	0	1	0	1	1	0	0

Figura 36 Parte 1 -CA (178; 8, 3, 6) correspondiente a Pb y Zn construido con *extend* para el Caso 3

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
27	1	0	1	1	0	1	1	0	70	1	0	1	1	1	1	1	0
28	1	0	1	1	1	0	0	1	71	1	0	2	1	1	1	1	1
29	1	1	1	0	0	1	0	1	72	1	1	0	1	1	1	1	1
30	1	1	1	0	1	0	1	0	73	0	1	0	1	0	0	0	0
31	1	1	1	1	0	0	0	0	74	0	0	1	1	0	0	0	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	75	1	0	2	1	0	0	0	0
33	0	0	2	0	0	0	1	0	76	0	1	0	0	1	1	0	1
34	0	0	2	0	1	1	0	1	77	0	0	1	0	1	1	0	0
35	0	0	2	1	0	1	1	1	78	1	1	2	0	1	1	0	0
36	0	0	2	1	1	0	0	0	79	0	1	2	1	0	0	1	0
37	0	1	2	0	0	1	0	0	80	1	0	0	1	0	0	1	1
38	0	1	2	0	1	0	1	1	81	1	1	1	1	0	0	1	0
39	0	1	2	1	0	0	0	1	82	0	0	2	0	0	1	1	0
40	0	1	2	1	1	1	1	0	83	1	1	0	0	0	1	1	1
41	1	0	2	0	0	1	1	1	84	1	0	1	0	0	1	1	0
42	1	0	2	0	1	0	0	0	85	1	0	2	0	1	0	0	1
43	1	0	2	1	0	0	1	0	86	0	1	2	0	0	1	0	1
44	1	0	2	1	1	1	0	1	87	1	0	2	1	0	0	1	1
45	1	1	2	0	0	0	0	1	88	0	0	1	1	1	0	0	0
46	1	1	2	0	1	1	1	0	89	1	0	1	0	1	1	0	1
47	1	1	2	1	0	1	0	0	90	1	1	0	0	1	1	0	0
48	1	1	2	1	1	0	1	1	91	0	1	0	1	1	0	0	1
49	1	0	1	0	0	0	0	0	92	1	0	2	1	1	1	1	0
50	0	0	2	0	0	0	0	1	93	1	0	0	1	0	0	0	0
51	1	1	0	0	0	0	0	1	94	1	0	0	0	1	0	1	0
52	0	0	0	0	1	0	0	0	95	1	1	0	1	0	1	1	0
53	0	1	1	0	1	0	0	0	96	1	0	0	0	0	0	0	1
54	0	1	2	0	1	0	0	0	97	1	1	1	0	1	0	1	1
55	1	0	1	1	0	1	0	1	98	0	0	1	1	1	1	1	1
56	0	0	2	1	0	1	0	0	99	1	1	1	1	1	1	1	0
57	1	1	0	1	0	1	0	0	100	0	1	2	1	1	0	1	1
58	1	0	0	1	1	1	0	1	101	0	0	1	0	0	0	0	0
59	1	1	1	1	1	1	0	1	102	1	0	2	0	0	0	1	1
60	1	1	2	1	1	1	0	1	103	0	1	0	0	0	0	0	1
61	0	0	0	0	0	0	1	1	104	0	1	2	0	0	0	1	1
62	0	1	1	0	0	0	1	0	105	1	1	1	0	0	0	0	0
63	1	1	2	0	0	0	1	0	106	0	0	0	1	0	0	0	1
64	0	0	1	0	1	0	1	1	107	0	0	2	1	0	0	1	1
65	0	0	2	0	1	0	1	0	108	1	0	1	1	0	0	1	1
66	0	1	0	0	1	0	1	0	109	0	1	1	1	0	0	0	1
67	0	0	0	1	0	1	1	0	110	1	1	0	1	0	0	1	1
68	0	1	1	1	0	1	1	1	111	1	1	2	1	0	0	0	0
69	1	1	2	1	0	1	1	1	112	1	0	1	0	1	0	1	0

Figura 37 Parte 2 -CA (178; 8, 3, 6) correspondiente a Pb y Zn construido con extend para el Caso 3

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
113	1	1	0	0	1	0	0	1	146	0	1	2	1	1	1	0	1
114	1	1	2	0	1	0	1	0	147	0	1	0	1	1	1	1	0
115	1	0	0	1	1	0	0	0	148	1	1	0	0	1	0	1	1
116	1	0	2	1	1	0	1	0	149	1	1	0	1	0	1	0	1
117	1	1	1	1	1	0	0	0	150	0	0	0	1	1	0	1	1
118	0	0	0	0	0	1	0	1	151	1	0	1	1	1	1	0	0
119	0	1	1	0	0	1	0	0	152	0	0	2	1	1	0	0	1
120	1	1	2	0	0	1	1	0	153	1	1	2	1	1	0	0	1
121	0	0	1	1	0	1	0	0	154	0	1	1	1	1	0	1	0
122	1	0	0	1	0	1	1	1	155	0	0	2	0	0	0	0	0
123	1	0	2	1	0	1	0	1	156	0	0	2	1	1	1	0	0
124	0	1	0	1	0	1	1	1	157	0	0	0	1	0	0	1	0
125	0	1	2	1	0	1	1	1	158	1	1	2	1	0	1	1	0
126	1	1	1	1	0	1	1	1	159	0	1	1	1	0	1	1	0
127	1	0	0	0	1	1	1	0	160	1	0	0	1	1	0	0	1
128	1	0	2	0	1	1	1	1	161	0	1	1	0	0	0	1	1
129	0	1	2	0	1	1	1	1	162	0	0	2	0	1	0	1	1
130	1	1	1	0	1	1	0	0	163	1	1	0	0	1	0	0	0
131	0	0	0	1	1	1	0	0	164	1	0	1	0	0	0	0	1
132	0	0	2	1	1	1	1	0	165	1	1	2	0	1	1	0	1
133	0	1	1	1	1	1	0	1	166	0	0	2	0	1	1	1	0
134	1	1	2	1	1	0	0	0	167	0	1	1	0	1	1	0	1
135	0	0	1	0	0	1	0	1	168	1	1	1	0	0	1	0	0
136	1	0	2	0	0	1	0	0	169	0	1	1	1	1	0	0	1
137	0	1	0	0	0	1	0	0	170	0	0	0	0	1	1	1	0
138	1	0	0	0	1	1	0	1	171	0	0	1	1	1	1	1	0
139	1	0	1	1	1	0	1	0	172	0	0	0	1	1	1	0	1
140	1	1	0	1	1	0	1	0	173	1	1	1	1	0	0	0	1
141	1	0	0	0	0	1	1	0	174	0	1	2	1	1	0	0	0
142	1	1	1	0	0	1	1	1	175	0	0	1	0	1	1	1	0
143	1	0	1	0	1	1	1	1	176	1	0	2	0	0	0	1	0
144	0	1	0	0	1	1	1	1	177	0	1	2	0	0	1	1	0
145	1	1	1	0	1	0	0	1	178	1	1	2	0	1	1	1	1

Figura 38 Parte 3 -CA (178; 8, 3, 6) correspondiente a Pb y Zn construido con *extend* para el Caso 3

Una vez analizadas individualmente (Pb, Zn), se experimentó con ambos metales simultáneamente (Pb y Zn) con la finalidad de maximizar el impacto en la reducción del conjunto de pruebas con un alfabeto mayor al que se utilizó para la construcción individual por cada metal.

El CA de fuerza 5 dio como resultado un conjunto de pruebas de 100, y solo se encontró una de las combinaciones buscadas correspondiente al metal Zn (línea 57), por lo que es necesario expandirlo a una fuerza 6 (figura 35). Las figuras 36, 37 y 38 representan un CA de fuerza 6 en las que la matriz se formó por un conjunto de 178 pruebas. De este total, 100 pruebas ya se habían probado con anterioridad, contorneadas con rojo, ($t=5$) por lo que para la fuerza 6 solo se probaron las restantes (78 pruebas) y dentro de esas 78 pruebas adicionales apareció la combinación faltante del Pb (0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1), en la línea 161.

4.3.3 Análisis de los Resultados del Caso 3

El Caso 3 se evaluó de dos formas con 7 y con 8 parámetros (contando el metal), cada uno con diferentes niveles que rondan entre 1 a 3. Se evaluó bajo las dos formas tanto el DF como el CA, para el DF (2^7) evaluando individualmente se realizaron 128 pruebas cada metal (Pb y Zn) y de manera conjunta considerando ambos metales como un parámetro (8) realizando 384 pruebas, para este caso no se considera un diseño factorial $2k$, esto debido a que no todos los parámetros tienen 2 niveles. Para el caso del covering array aplicando *scratch* se aplicó $t = k - 2$, por lo que se inició con una $t = 5$. Se creó un CA(60; 7, 2, 5) para Pb y en la línea 44 apareció la combinación ganadora, de misma manera para Zn un CA(60; 7, 2, 5) y apareció en la línea 38. Caso contrario para Pb y Zn en conjunto se creó un CA(100; 8, 3, 5) y solo la combinación Pb se encontró en la línea 7. Al no encontrarse en $t=5$ se construyó un CA de fuerza 6 resultando CA(180; 8, 3, 6) y apareció la combinación (1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0) correspondiente a Zn más no apareció Pb, por lo que, en estas dos matrices, de diferentes fuerzas, no aparecieron ambas combinaciones por lo que no se considera que fue efectivo el CA bajo este método (*scratch*).

En el caso se *extend* se evaluó de la misma manera descrita en el párrafo anterior, para Pb se construyó un covering array de $t = 5$, CA (60; 7,3,5) y si fue encontrada la combinación ganadora, al encontrarse esta combinación, no se siguió con una fuerza superior. Para el caso de Zn de manera ilustrativa se inició construyendo una matriz de fuerza 6 CA(95; 7,3,6) y se validó que en esta aparecía la combinación ganadora (línea 70). Evaluando Pb y Zn simultáneamente se construyó el CA(100; 8,3,5) y en la línea 57 se encontró la línea 57, sin

embargo no se encontró la combinación correspondiente a Pb por lo que se aumentó la fuerza a 6 resultando un CA(178; 8, 3 ,6) y en la línea 161 se encontró la combinación faltante.

Tabla 30 Recursos utilizados para llevar a cabo la experimentación para el Caso 3

Método	Materiales	Tiempo
<i>Tratamiento 1</i>	<ul style="list-style-type: none"> Naranjas 	<ul style="list-style-type: none"> Lavado Cortado 24 hrs Reposo Trituración y cribado
<i>Tratamiento 2</i>	<ul style="list-style-type: none"> Naranjas 30 gr. Biomasa 500 ml de NaOH Agua desionizada 	<ul style="list-style-type: none"> Lavado Cortado 24 hrs Reposo Trituración Dexmetoxilación 2 hrs de agitación Filtrado 2 hrs de secado
<i>Reticulación de la cáscara</i>	<ul style="list-style-type: none"> 20 gr de cáscara Desmetoxilada 500 ml de CaCl₂ Agua desionizada 	<ul style="list-style-type: none"> 24 hrs. de agitación Lavado de la mezcla 6 hrs de filtración y secado Cribado
<i>Preparación de la solución de metal</i>	<ul style="list-style-type: none"> PbNO₃ ZnCl₂ Agua desionizada 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo de preparación
<i>Para los experimentos</i>	<ul style="list-style-type: none"> 0.5 gr y 1 gr de cantidad de naranja de acuerdo al tratamiento 	<ul style="list-style-type: none"> Tiempo de contacto de 2 y 4 hrs.

La evaluación de los indicadores marcados fue la siguiente:

- Eficacia: Para la evaluación individual de Pb y Zn, con el DF se realizaron 128 pruebas con los CA *scratch* se redujo cada metal con 68 pruebas, con *extend* para Pb se redujeron 68 pruebas ($t = 5$) y para Zn 33 pruebas ($t = 6$). Para Pb y Zn ee evaluación simultánea, con el DF se realizaron 384 pruebas, con CA *scratch* se

realizaron 280 pruebas y pese a encontrarse la solución de ambos, no se encontraron a la vez en una matriz; con el CA *extend* se realizaron 178 pruebas construyendo 2 matrices CA(100; 8,3,5) y CA(178; 8,3,6) y se encontró las dos combinaciones ganadoras.

- Eficiencia: Comprobada la reducción en el número de pruebas, se cuantificó los recursos utilizados, y se puede observar en el Anexo F los tiempos de construcción por cada CA. A su vez es evidente el ahorro de recursos debido a la disminución del número de pruebas en más del 50% con *scratch*, es importante señalar que el tiempo de construcción del CA más pequeño con $N = 60$ fue de 0.002 seg. (figura 55) mientras que el mayor de $N = 180$ tardó en construirse solo 0.003 seg. (figura 58).
- Cobertura: Las pruebas realizadas durante el análisis fueron menores aplicando CA con *scratch* y *extend* que cuando se aplicó el diseño factorial y en ambos casos se encontró la combinación ganadora.
- Pertinencia: Para la evaluación individual aplicando CA para Pb Y Zn se redujo 53.12% el número de pruebas para cada uno con *scratch*, con *extend* para Pb se redujo en un 53.12% y para Zn un 25.78%. Evaluando Pb y Zn en conjunto con *scratch* se ahorró un 53.12% en pruebas y con *extend* 53.61% en pruebas.
- Adecuación: Los resultados obtenidos tanto aplicando un diseño factorial como un covering array fueron los mismos y el análisis se realizó bajo las mismas condiciones sin embargo reflejó un ahorro en cuanto a los recursos de la experimentación.
- Coherencia: Al desarrollarse bajo los mismos términos se asevera que los resultados obtenidos son confiables y replicables.

La tabla 30 muestra los recursos que fueron utilizados para llevar a cabo la experimentación, en los cuales se puede observar el ahorro tanto en materiales como de tiempo de una sola prueba. El ahorro en el tiempo de experimentación será generado proporcionalmente por la disminución en el número de casos de prueba del CA.

Se puede concluir que este caso en particular tiene un gran impacto en cuanto a la selección de construcción del CA entre *scratch* y *extend*, ya que se puede observar un mayor impacto en la reducción del número de pruebas realizadas aplicando *extend*, a su vez es importante señalar que al aplicarse un DF completo el número de pruebas crecerá exponencialmente por

lo que si un investigador desea aplicar esta estrategia y tiene parámetros mayores a 6 no es recomendable por los recursos que empleara para la experimentación. Es importante resaltar que los CAs para este caso el porcentaje mínimo de reducción de número de pruebas fue en un 25.78%, que, traduciéndolo a otras palabras, se comprueba que los CAs si pueden utilizarse como diseños experimentales bajo las condiciones de aplicación delimitadas en este trabajo de investigación.

4.4 Análisis General de Resultados

Los resultados obtenidos en el análisis de casos bajo un diseño factorial completo y covering arrays se observan en la tabla 31. Para el caso 1 y el caso 2 aplicando la metodología de *scratch* y *extend*, se redujeron en un 11.76% y en un 56.12% el número de casos de pruebas, respectivamente. Particularmente para estos dos casos se pudo implementar ambas metodologías y no se mostró diferencias en el tamaño del conjunto de pruebas. Sin embargo, el caso 3 mostró diferencias significativas en cuanto la aplicación de *scratch* y *extend*.

Tabla 31 Tabla resumen de los resultados obtenidos del análisis de los tres casos.

DoE	Número de pruebas realizadas						Reducción en el número de casos de prueba (%)		
	Diseño Factorial completo		Covering Array						
			Scratch		Extend				
Caso 1	17		15		15		11.76%		
Caso 2	98		43		43		56.12%		
Caso 3	Metal	# Pruebas	No. De pruebas		Fuerza	# Pruebas	Se encontró	Scratch	Extend
	Pb	128	60		t = 5 t = 6	60 95	✗ ✓	53.12%	25.78%
	Zn	128	60		t = 5 t = 6	60 95	✗ ✓	53.12%	25.78%
	Pb y Zn	384	t = 5 t = 6	100 ½ 180 ✓	t = 5 t = 6	100 178	½ ✓	27.08%	53.64%

Para el caso 3, analizando individualmente tanto Pb como Zn se redujeron en un 53.12% (*scratch*) y 25.78% (*extend*). Aplicando *extend* con $t=5$ ($N=60$) para ambos casos no se encontró la combinación esperada por lo que se amplió el conjunto de pruebas a una $t=6$ ($N=95$) equivalente a adicional 35 pruebas más, las primeras 60 ya habían sido probadas. Al analizar tanto Pb y Zn a la vez con *scratch* se partió de una fuerza 5 para construir los CAs, sin embargo, solo se pudo encontrar Zn, por lo que se requirió expandir el CA a fuerza 6 para

buscar la combinación faltante. Una vez ampliado se encontró la combinación ganadora, por lo que con 180 pruebas se encontraron ambas combinaciones dentro de un mismo conjunto de pruebas reduciendo en un 27.08% al diseño factorial completo.

Con el método *extend* para el caso 3 evaluando tanto Pb como Zn se inició la construcción con $t=5$ y como con *scratch* no apareció más que una combinación Zn, por lo que se aumentó la fuerza ($t=6$) y se pudieron encontrar ambas combinaciones con solo 178 pruebas, reduciendo el número de pruebas en un 53.64%.

Una vez detallados los resultados se puede concluir lo siguiente, pese a que *extend* dio mejores resultados en los casos analizados no puede considerarse el mejor método ya que no siempre dará los mejores resultados frente al *scratch*, si el investigador aproxima bien la fuerza de interacción es posible tener menor número de casos de prueba que el uso de *extend* debido a su naturaleza incremental. El impacto que se genera por la reducción de los casos de prueba usando CA no se representa tal cual, por el tiempo de construcción de la matriz, sino por la reducción del tiempo experimental, el ahorro en tiempo y/o recurso económico.

5 Conclusiones y Recomendaciones

Lo anteriormente expuesto permite concluir que la aplicación de covering arrays como un diseño experimental es factible y genera un buen rendimiento comparándose directamente con un diseño factorial completo, esto se concluye ya que el CA actúa similarmente al diseño de experimentos, permitiendo señalar cuales pruebas se deben realizar y de qué manera, para cuando se obtengan los datos, estos puedan ser analizados y a su vez proporcionen evidencias que permitan dar respuesta a las preguntas planteadas y dé la posibilidad de resolver un problema, lograr mejoras y establecer los parámetros requeridos para lograr un resultado efectivo a la interrogante planteada.

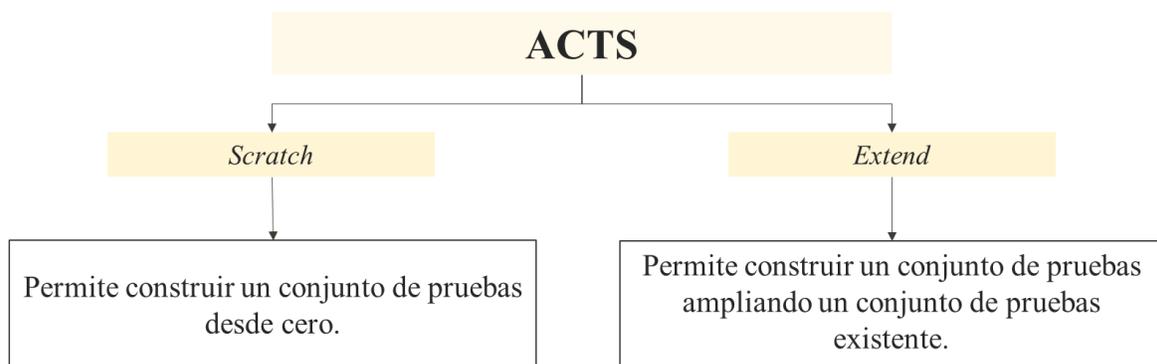


Figura 39 Metodologías para la construcción de covering arrays a través de ACTS

Esto se relaciona directamente a que con esta estrategia determinística se enumeran todas las combinaciones de las pruebas de interacción, produciendo un conjunto de pruebas con una

configuración con los datos cargados. Pese a reducir el conjunto de pruebas se crearon dos metodologías, que dependiendo del caso analizado pudiesen utilizarse y que continuarán garantizando la reducción en el número de pruebas.

Se comprobó que la metodología *scratch* a pesar de poder ser aplicada para fuerzas grandes como 4, 5 y 6, generaban CA de menor tamaño (pequeños) pero es menos posible que contengan la combinación buscada (ganadora), es por ello que con base al análisis de casos se decidió que este método es conveniente aplicarlo cuando $t \leq 3$. Se mostró que en algunos casos cuando $t \leq 3$ la combinación ganadora aparecía incluso ocasionalmente desde la fuerza 1, y de no ser así aparecería en $t = 2$ y $t = 3$.

En cuanto al uso de *extend* y su aplicación en el análisis de casos, particularmente *extend* permite la ampliación de un conjunto de pruebas existente dando la posibilidad de ahorrar un esfuerzo que anteriormente se había invertido en el proceso de pruebas. La fuerza recomendada para la aplicación de *extend* es cuando $t \geq 4$ y garantiza la aparición de la combinación ganadora dentro del conjunto de pruebas. Sin embargo, es posible aplicar *extend* para fuerzas menores (1, 2, 3) pero aumenta en el número de pruebas entre un 20 a 40% y en el 80% de los casos la combinación ganadora aparece en CAs de fuerzas 4 a 6.

Es importante recalcar que cuando se requiere aplicar un diseño experimental se pretende entender el proceso que se analiza y determinar cómo las variables de control impactan en las variables incontrolables o de respuesta permitiendo el estudio del efecto de varios factores en el comportamiento del proceso o producto analizada; es por ello que cuando se considera aplicar CAs, la matriz resultante (conjunto de pruebas) propondrá los experimentos a realizar así como también cual tendrá la mayor probabilidad a ser el que de los mejores resultados, por ello que es necesario aclarar que el construir CAs permitirá la reducción en el número de casos de prueba permitiendo un ahorro en los recursos utilizados, llámese de tiempo, recursos materiales, humanos, etc., por lo que no dará solo una línea de respuesta afirmando ser la combinación ganadora. Cabe señalar que el CAs también puede proponer una combinación que genere mejores resultados y no sea parte del resultado establecido en un experimento/artículo publicado.

Por lo anterior es importante hacer mención que un CA puede utilizarse aun cuando no se tenga un análisis de un diseño factorial previo (pueden obtenerse los mismos resultados del DF, pero no depende de que exista para poder utilizarse para definir el DoE), esto debido a que el CA pretende sustituir a un DoE, ya que se observó que si causa un impacto favorable en la reducción del número de los casos de prueba pero también se observó que puede ser guía para poder definir los experimentos con cuales trabajar por lo cual el investigador será el que decida hasta donde parar.

Con base a los resultados obtenidos, se comprobó que los covering arrays si pueden ser aplicados como un diseño experimental, que pueden influir de forma positiva en el desarrollo de un análisis e incluso permite el ahorro de recursos, así como también se válida que los CAs pueden aplicarse en el tema de síntesis de nanomateriales por reducción química, lo que se valida el uso de CAs en la industria química.

Trabajos futuros

De este trabajo de tesis se pueden seguir futuras líneas de investigación derivado a áreas de oportunidad que han surgido durante el desarrollo de esta tesis, a los resultados alcanzados, por exceder el alcance planteado o puntos que no pudieron ser tratados con una mayor profundidad. Estas pueden retomarse posteriormente o bien como una opción de investigación para trabajos futuros de otros investigadores.

A continuación, se enlistan algunas líneas de investigación y/o áreas de oportunidad que pueden desarrollarse a partir de esta investigación.

1. Realizar un análisis de procesos químicos que tiendan a aplicar diseños experimentales para validar la aplicación de CAs, evaluar su impacto y/o crear restricciones de uso.
2. Evaluar el grado de impacto que generen los CAs con diferentes diseños experimentales.
3. Establecer un nuevo enfoque de aplicación de CAs en las ciencias sociales.

4. Aumentar los valores de construcción de CAs para experimentación en diferentes áreas a excepción de software y hardware.
5. La creación de un modelo que permita identificar efectivamente la estrategia a aplicar para la generación de pruebas de un CA, y bajo que restricciones puede llevarse a cabo.

Bibliografía

- [1] J. A. Timaná-Peña, C. A. Cobos-Lozada, y J. Torres-Jimenez, “Metaheuristic Algorithms for Building Covering Arrays a Review”, *Rev. Fac. Ing.*, vol. 25, núm. 43, pp. 31–45, 2016, doi: 10.19053/01211129.v25.n43.2016.5295.
- [2] B. J. Garvin, M. B. Cohen, y M. B. Dwyer, “Evaluating improvements to a metaheuristic search for constrained interaction testing”, *Empir. Softw. Eng.*, vol. 16, núm. 1, pp. 61–102, 2011, doi: 10.1007/s10664-010-9135-7.
- [3] S. Y. Borodai y I. S. Grunskii, “Recursive Generation of Locally Complete Tests”, *Cybern. Syst. Anal.*, vol. 28, núm. 4, pp. 504–508, 1993, doi: 10.1007/BF01124983.
- [4] K. K. Vadde y V. R. Syrotiuk, “Factor interaction on service delivery in mobile ad hoc networks”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, núm. 7, pp. 1335–1346, 2004, doi: 10.1109/JSAC.2004.829351.
- [5] V. O. and J. L. Yu Lei, Raghu Kacker, D. Richard Kuhn, “IPOG/IPOG-D: efficient test generation for multi-way combinatorial testing”, *Softw. Test. Verif. Reliab.*, vol. 24, núm. 8, pp. 591–592, 2014, doi: 10.1002/stvr.
- [6] R. C. Bryce, Y. Lei, D. R. Kuhn, y R. Kacker, “Combinatorial testing”, *Handb. Res. Softw. Eng. Product. Technol. Implic. Glob.*, pp. 196–208, 2009, doi: 10.4018/978-1-60566-731-7.ch014.
- [7] C. Yilmaz, M. B. Cohen, y A. A. Porter, “Covering Arrays for Efficient Fault Characterization in Complex Configuration Spaces”, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 32, núm. 1, pp. 20–34, 2006, doi: 10.1109/TSE.2006.8.
- [8] L. Lazić, “Use of Orthogonal Arrays and Design of Experiments via Taguchi methods in Software Testing”, *Recent Adv. Appl. Theor. Math.*, núm. December 2013, pp. 256–267, 2013.
- [9] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*,

Segunda Ed. México, 2008.

- [10] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley, 2004.
- [11] G. Figueroa Preciado, “Ronald Aylmer Fisher”, *Apunt. Hist. las Matemáticas*, vol. 1, núm. 3, pp. 1–5, 2002, doi: 10.1007/978-3-319-16999-6_1335-1.
- [12] A. Felipe, “Historia y biografía de Genichi Taguchi”. <https://historia-biografia.com/genichi-taguchi/> (consultado oct. 06, 2019).
- [13] M. Tanco, E. Viles, y L. Pozueta, “Diferentes enfoques del diseño de experimentos (DOE)”, vol. 7. pp. 29–37, 2009, doi: 1510-7450.
- [14] L. Baresi y M. Pezzè, “An Introduction to Software Testing”, *Electron. Notes Theor. Comput. Sci.*, vol. 148, pp. 89–111, 2006, doi: 10.1016/j.entcs.2005.12.014.
- [15] B. B. Agarral, S. P. Tayal, y M. Gupta, *Software Engineering and Testing*. Sudbury, MA, 2010.
- [16] M. B. Cohen, M. B. Dwyer, y J. Shi, “Interaction Testing of Highly-Configurable Systems in the Presence of Constraints”, *2007 ACM Int. Symp. Softw. Test. Anal. ISSTA '07*, pp. 129–139, 2007, doi: 10.1145/1273463.1273482.
- [17] A. Besoun S. y K. Z. Zamli, “A Review of Covering Arrays and Their Application to Software Testing Bestoun S . Ahmed and Kamal Z . Zamli Software Engineering Group , School of Electrical and Electronic Engineering ”, vol. 7, núm. 9, pp. 1375–1385, 2011.
- [18] D. E. Shasha, A. Y. Kouranov, L. V. Lejay, M. F. Chou, y G. M. Coruzzi, “Using Combinatorial Design to Study Regulation by Multiple Input Signals. A Tool for Parsimony in the Post-Genomics Era”, *Plant Physiol.*, vol. 127, núm. 4, pp. 1590–1594, 2001, doi: 10.1104/pp.010683.
- [19] J. N. Cawse, “Experimental Design for Combinatorial and High Throughput Materials Development”, *Technometrics*, vol. 45, núm. 4. General Electric Company, p. 25, 2002, doi: 10.1198/tech.2003.s168.
- [20] D. S. Hoskins, C. J. Colbourn, y D. C. Montgomery, “Software Performance Testing

- Using Covering Arrays : Efficient Screening Designs with Categorical Factors”, *Proc. Fifth Int. Work. Softw. Performance, WOSP’05*, pp. 131–136, 2005.
- [21] D. Lopez-Escogido, J. Torres-Jimenez, E. Rodriguez-Tello, y N. Rangel-Valdez, “Strength Two Covering Arrays Construction Using a SAT Representation”, en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 53, A. Gelbukj y E. F. Morales, Eds. 2008, pp. 44–53.
- [22] B. S. Ahmed, A. Gargantini, K. Z. Zamli, C. Yilmaz, M. Bures, y M. Szeles, “Code-Aware Combinatorial Interaction Testing”, *J. Name*, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1907.09029>.
- [23] J. Hedayat, A.S.; Sloane, N.J.A.; Stufken, *Orthogonal Arrays, Theory and Applications*. .
- [24] Fundación CIDOB, “Indicadores económicos y sociales de México”, *Anuario Internacional CIDOB 2014. México, perfil de país*. Cidob Barcelona Center for International Affairs, pp. 369–372, 2014, [En línea]. Disponible en: https://www.cidob.org/es/publicaciones/serie_de_publicacion/anuario_internacional_cidob/anuario_internacional_cidob_2014_mexico_perfil_de_pais.
- [25] Inegi, “Industria manufacturera. Cuéntame de México”, 2019. <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/manufacturera/default.aspx?tema=E> (consultado oct. 06, 2019).
- [26] O. E. Guerrero, *Procesos de manufactura*. 2008.
- [27] R. Carro Paz y D. González Gómez, “Diseño y selección de procesos”, *Facultad Ciencias Económicas y Soc.*, vol. 7, p. 23, 2013, [En línea]. Disponible en: http://nulan.mdp.edu.ar/1613/1/08_diseno_procesos.pdf.
- [28] F. Quispe, “Marco teórico de los de costos”, *Costos y Presup.*, pp. 7–46, 2012, [En línea]. Disponible en: [https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/7438/1/Fundamentos de Costos 7-46.pdf](https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/7438/1/Fundamentos%20de%20Costos%207-46.pdf)
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/7438/1/Fundamentos de Costos 7-46.pdf>

Costos 7-46.pdf%0Ahttps://www.mendeley.com/viewer/?fileId=4a3c1f9a-35c1-d6f1-0e95-95fd0570ac2b&docu.

- [29] H. Rocha, “Los sistemas de costos y la eficiencia en las operaciones comerciales”, *Puntos Finos*, p. 4, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.ccpm.org.mx/avisos/88-91Sistemas.pdf>.
- [30] K. Sarkar, “Covering Arrays: Algorithms and Asymptotics”, 2013.
- [31] J. Ferré y F. Xavier Rius, “Introducción al diseño estadístico de experimentos”.
- [32] H. Avila-George, “Verificación de covering arrays utilizando supercomputación y computación grid”, Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [33] S. Guardati Buemo, *Estructura de datos orientada a objetos: algoritmos con C++*. Mexico: Pearson Educación, 2007.
- [34] H. Avila-George, “Constructing Covering Arrays: Using Parallel and Grid computing”, Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, 2012.
- [35] I. Izquierdo Marquez y J. Torres Jiménez, “Torres de covering arrays”, 2016.
- [36] S. K. Khalsa, “An Analysis and Extension of Category Partition Testing in the presence of Constraints”, Ottawa-Carleton Institute of Electrical and Computer Engineering, 2017.
- [37] H. Mercan, C. Yilmaz, y K. Kaya, “An Approach for Choosing the Best Covering Array Constructor to Use”, *Proc. - 2017 IEEE Int. Conf. Softw. Qual. Reliab. Secur. Companion, QRS-C 2017*, pp. 77–84, 2017, doi: 10.1109/QRS-C.2017.21.
- [38] R. Huang, Y. Zhou, D. Towey, T. Y. Chen, y J. Chen, “Poster: An experimental analysis of fault detection capabilities of covering array constructors”, *Proc. - Int. Conf. Softw. Eng.*, pp. 246–247, 2018, doi: 10.1145/3183440.3194953.
- [39] L. Yu, Y. Lei, R. N. Kacker, y D. R. Kuhn, “ACTS: A combinatorial test generation tool”, *Proc. - IEEE 6th Int. Conf. Softw. Testing, Verif. Validation, ICST 2013*, pp. 370–375, 2013, doi: 10.1109/ICST.2013.52.
- [40] Y. Lei, R. Kacker, D. R. Kuhn, V. Okun, y J. Lawrence, “IPOG: A general strategy

- for T-way software testing”, *Proc. Int. Symp. Work. Eng. Comput. Based Syst.*, pp. 549–556, 2007, doi: 10.1109/ECBS.2007.47.
- [41] L. Yu, Y. Lei, M. Nourozborazjany, R. N. Kacker, y D. R. Kuhn, “An efficient algorithm for constraint handling in combinatorial test generation”, *Proc. - IEEE 6th Int. Conf. Softw. Testing, Verif. Validation, ICST 2013*, pp. 242–251, 2013, doi: 10.1109/ICST.2013.35.
- [42] S. Gao, J. Lv, B. Du, Y. Jiang, y S. Ma, “General optimization strategies for refining the In-Parameter-order algorithm”, *Proc. - Int. Conf. Qual. Softw.*, pp. 21–26, 2014, doi: 10.1109/QSIC.2014.15.
- [43] S. H. Park y J. J. Kim, “Quality Engineering Using Robust Design and Analysis”, pp. 3–15, 1997, doi: 10.1007/978-3-642-59268-3_1.
- [44] K. Burr, “Combinatorial Test Techniques : Table-based Automation , Test Generation and Code Coverage”.
- [45] D. E. Shasha, A. Y. Kouranov, L. V Lejay, M. F. Chou, y G. M. Coruzzi, “Using Combinatorial Design to Study Regulation by Multiple Input Signals. A Tool for Parsimony in the Post-Genomics Era”, vol. 127, núm. December, pp. 1590–1594, 2001, doi: 10.1104/pp.010683.1590.
- [46] T. Suárez B., *Química industrial y procesos*, 2004a ed., vol. 2. Mérida, Venezuela, 2014.
- [47] G. Fernández, “Las Reacciones Químicas”, 23 Septiembre, p. 1, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://www.quimicafisica.com/reacciones-quimicas.html>.
- [48] M. Toledo, “Reacciones de síntesis Moléculas importantes para la investigación, la industria y el comercio”. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/mx/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/synthesis-reactions.html#publications.
- [49] J. García Martínez, G. Abellán, A. I. Carrillo, y N. Linares, “Nanomateriales para aplicaciones avanzadas.”, *Actas del Semin. José Antonio García García 04-06*, pp. 1–

- 10, 2006, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/3857>.
- [50] H. Grohskopf, “Factorial Design in th Study of Chemical Reactions”, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 45(6), pp. 1260–1266, 1953.
- [51] D. R. Fox, *Contemporary Methods for Statistical Design and Analysis*. Elsevier Inc., 2016.
- [52] D. R. Kuhn, R. N. Kacker, Y. Lei, G. Locke, y P. Gallagher, “Practical Combinatorial Testing”, *Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 800(142), p. 142, 2010, [En línea]. Disponible en: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-142.pdf>.
- [53] H. Avila-George, J. Torres-Jimenez, V. Hernández, y N. Rangel-Valdez, “A Parallel Algorithm for the Verification of Covering Arrays”, *Pdpta 2011*, pp. 879–885, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2011/PDP8061.pdf>.
- [54] E. Abdala y R. Diez de Medina, *Manual para la evaluacion de impacto en programas de formación para jóvenes*. 2004.
- [55] J. Bruusgaard, “Performance measurement in public and special libraries: similarities and differences”, *International Federation of Library Associations and and Institutions. Conference No 61*. pp. 2631–2635, 1995, [En línea]. Disponible en: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3264404>.
- [56] A. C. Lucioni, “SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE ORO OBTENIDAS POR REDUCCIÓN DE H[AuCl₄]", *J. Clin. Rehabil. Tissue Eng. Res.*, vol. 11, núm. 40, pp. 8196–8200, 2007.
- [57] M. Pris y T. Krzysztof, “Influence of different parameters on wet synthesis of silver nanoparticles Membrane Science & Technology Group”, *Influ. Differ. parameters wet Synth. silver nanoparticles Membr. Sci. Technol. Gr.*, 2008.
- [58] A. F. Cardona, D. D. Cabañas, y A. Zepeda, “Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados , Pb (II) y Zn (II)

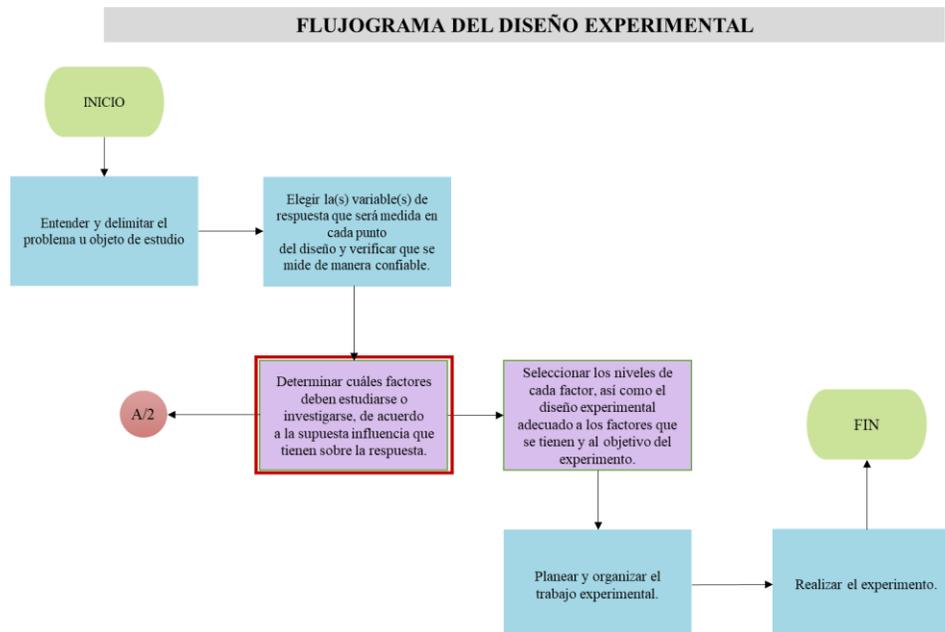
Evaluation of the power of orange peel biosorbent for the removal of heavy metals , Pb (II) and Zn (II)”, *Ingeniería*, vol. 17, núm. 1, pp. 1–9, 2013, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46729718001>.

Anexos

Anexo A

Flujograma del Diseño Experimental

La figura 40 ilustra los pasos que se requieren llevar a cabo para implementar un diseño experimental, el cual es fundamental en esta investigación, ya que es el eje central de análisis para validar que es posible usar un CA en sustitución de un diseño factorial como un diseño experimental.



Referencia: Humberto, G. P., & De La Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc Graw Hill.

Figura 40 Parte 1. Flujograma del Diseño Experimental

Anexo B

Flujograma de la construcción y aplicación del CA

El anexo B tiene como propósito conceptualizar mediante las figuras 41 y 42 como un CA puede aplicarse como un diseño experimental, en que parte del proceso del DoE interviene y el desarrollo del CA bajo las metodologías de *scratch* y *extend*.

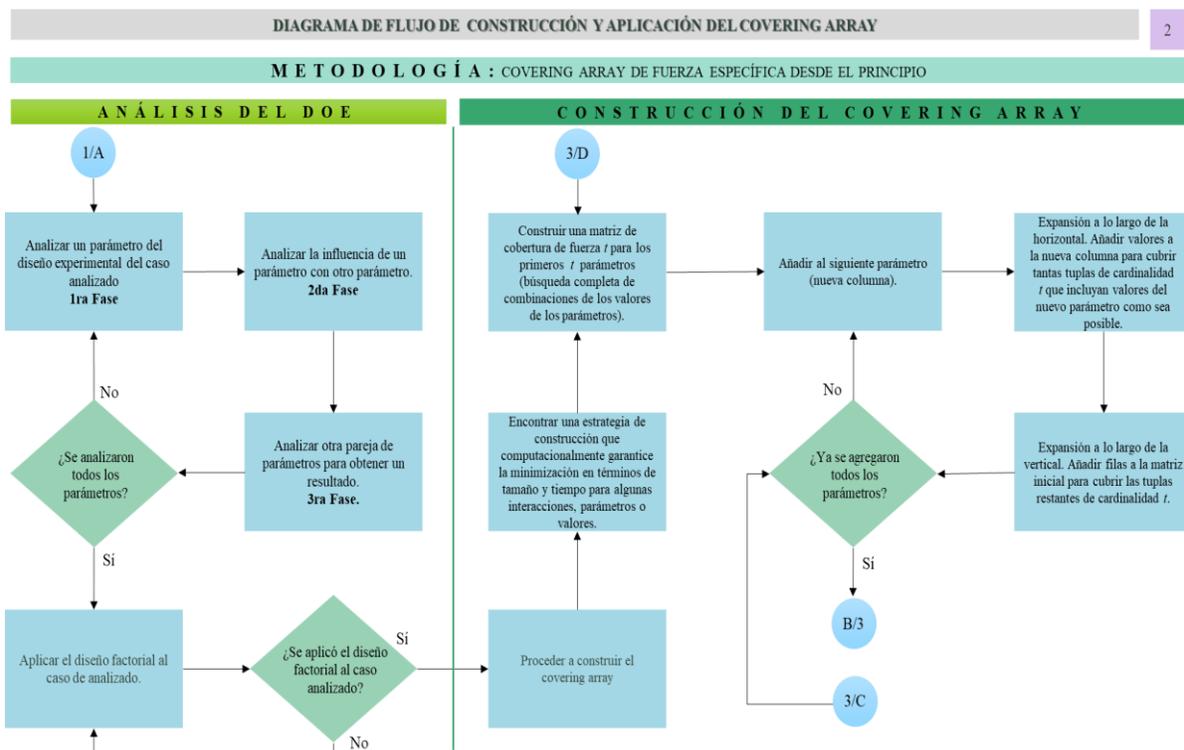


Figura 41 Parte 2. Flujograma de la construcción y aplicación del CA dentro de un DoE

La figura 43 en cambio el proceso para realizar la evaluación de desempeño del CA en comparación con el diseño factorial.

DIAGRAMA DE FLUJO DE CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DEL COVERING ARRAY

3

METODOLOGÍA SISTEMA DE COVERING ARRAYS QUE EVOLUCIONA SUBMÁTRICES PRIMERO Y LUEGO FUERZAS

VALIDACIÓN DEL CA

EVOLUCIÓN DE FUERZAS

ANÁLISIS DEL CA

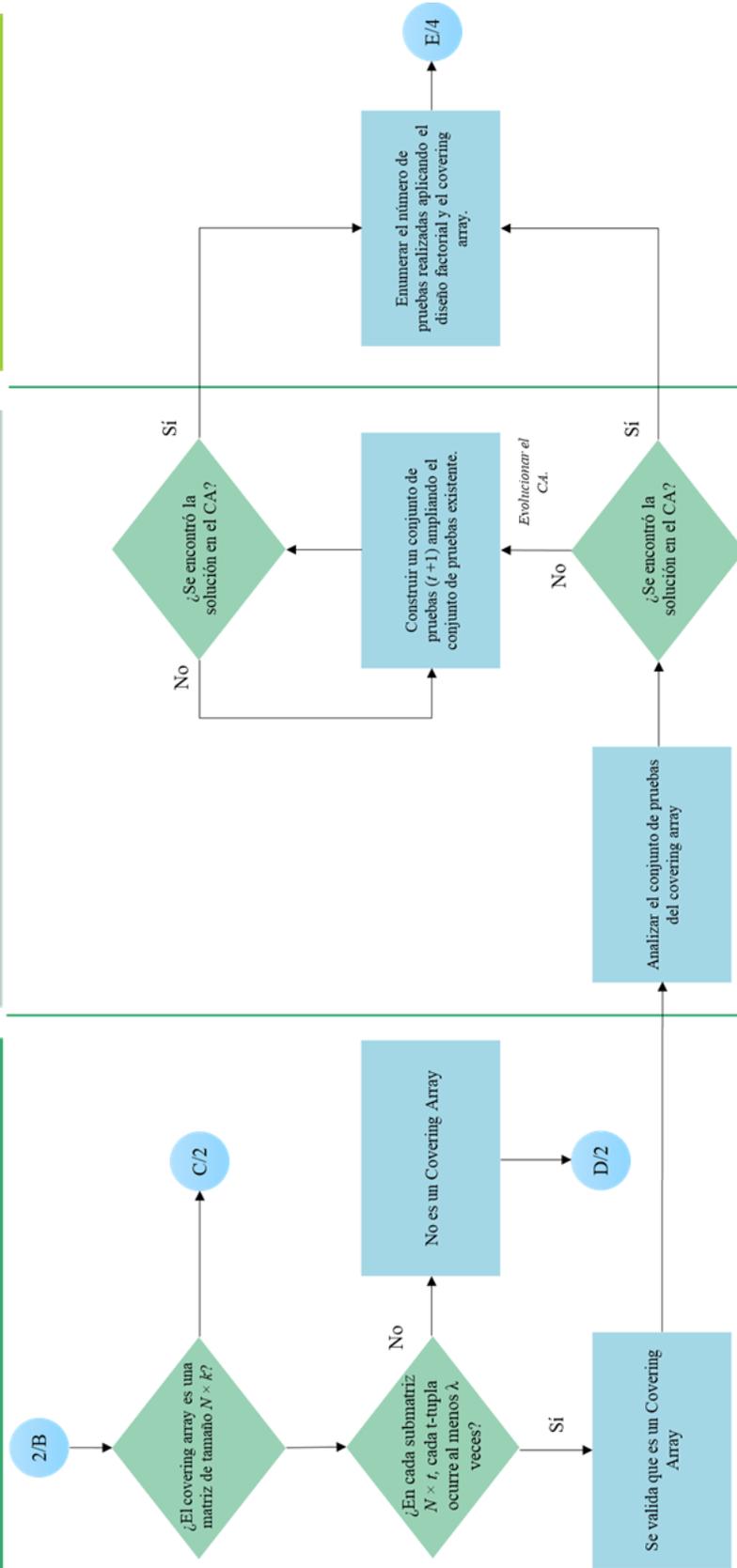


Figura 42 Parte 2. Flujoograma del proceso de validación y evaluación de fuerzas del CA.

DIAGRAMA DE FLUJO DE CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DEL COVERING ARRAY

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL COVERING ARRAY Y EL DISEÑO FACTORIAL

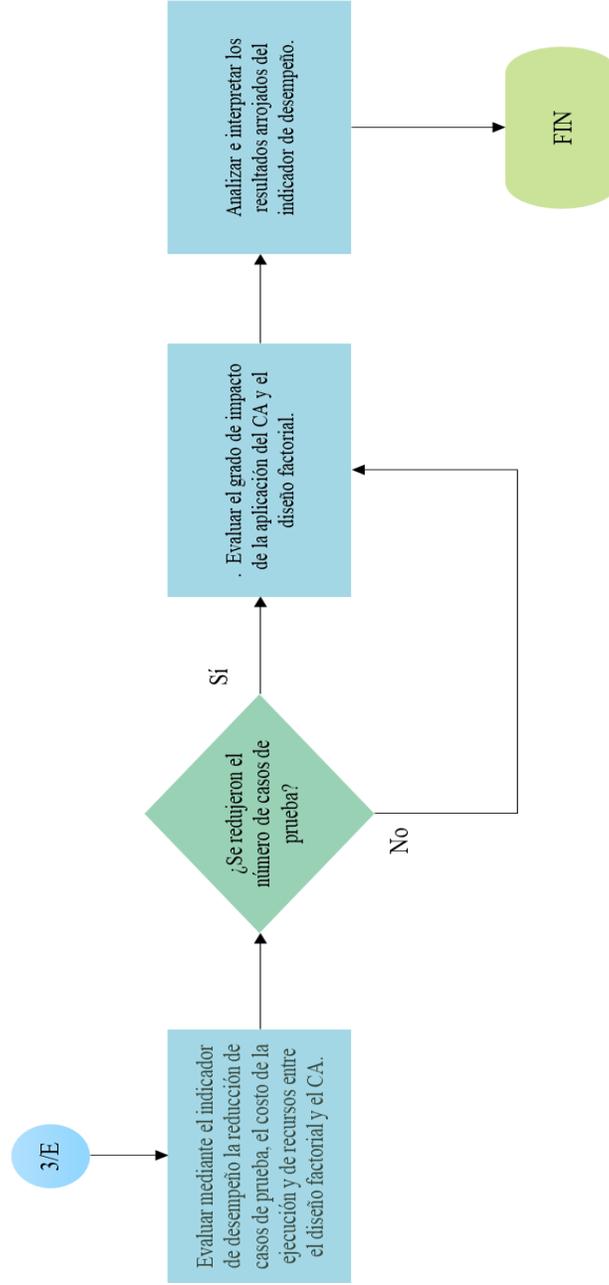


Figura 43 Parte 3. Flujoograma del proceso de evaluación de desempeño del CA y el DF

Anexo C

Resultados del Caso 1 según Corzo [56].

El anexo C mediante la figura 44 muestra los resultados obtenidos durante la experimentación de Corzo [56], los cuales fueron la base para el análisis de los resultados con la combinación ganadora en el diseño factorial y el CA; de esta manera se validan que los resultados sean los correctos.

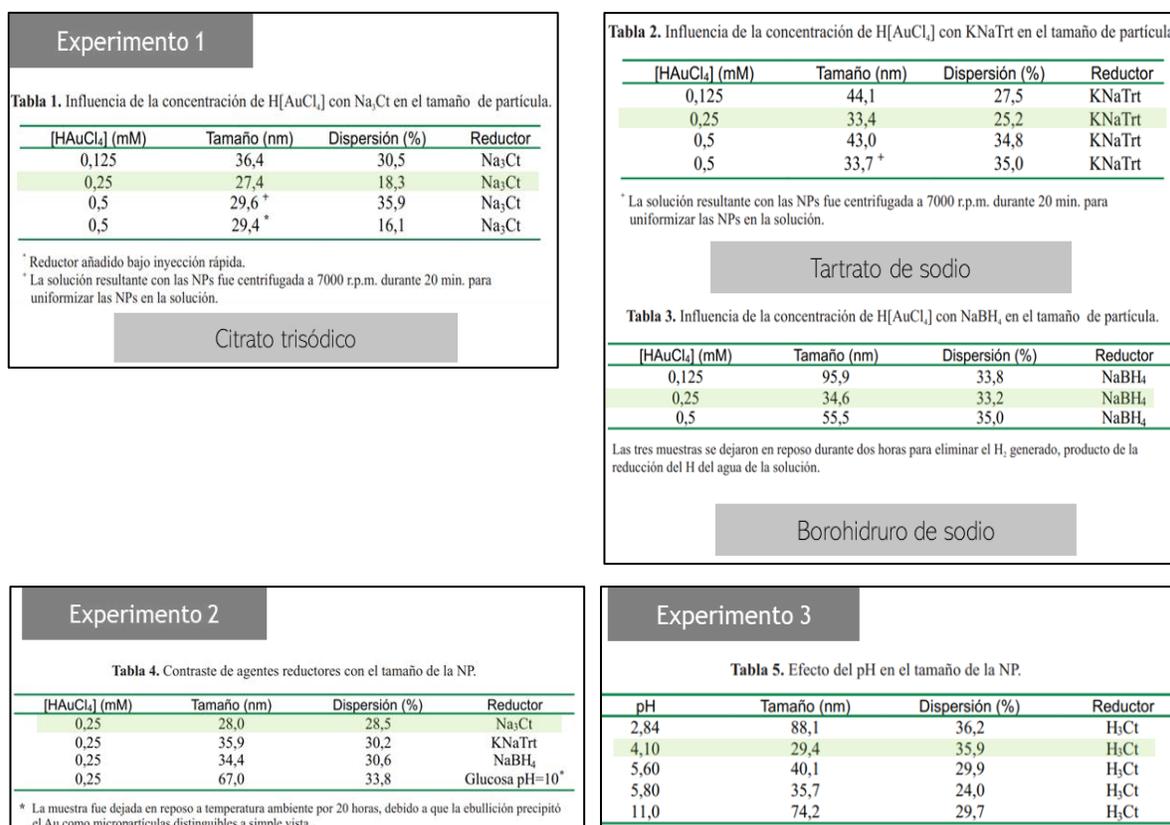


Figura 44 Resultados del Caso 1 según Corzo [56].

Anexo D

Tiempos de construcción de CA para Caso 1

Para llevar a cabo la construcción de los CAs se hizo uso de la herramienta ACTS, y en las figuras de la 45 a la 48 se muestra el tiempo de construcción por cada CA del caso 1.

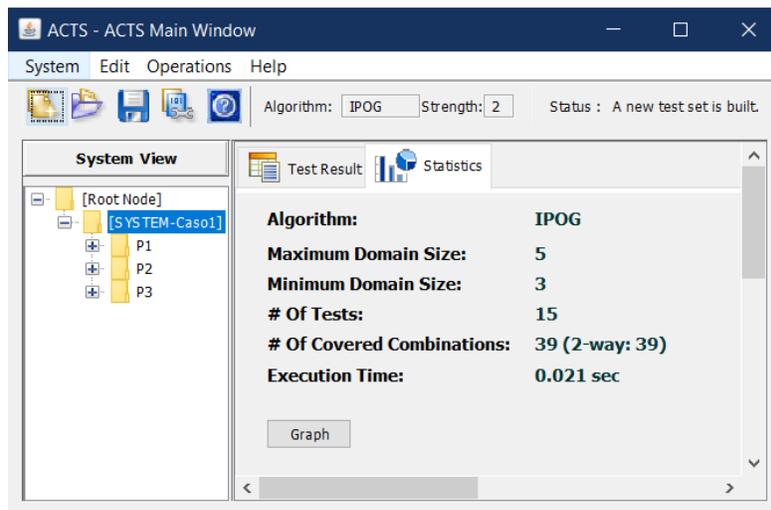


Figura 45 Construcción CA(15; 3, 5, 2) *scratch* mediante ACTS

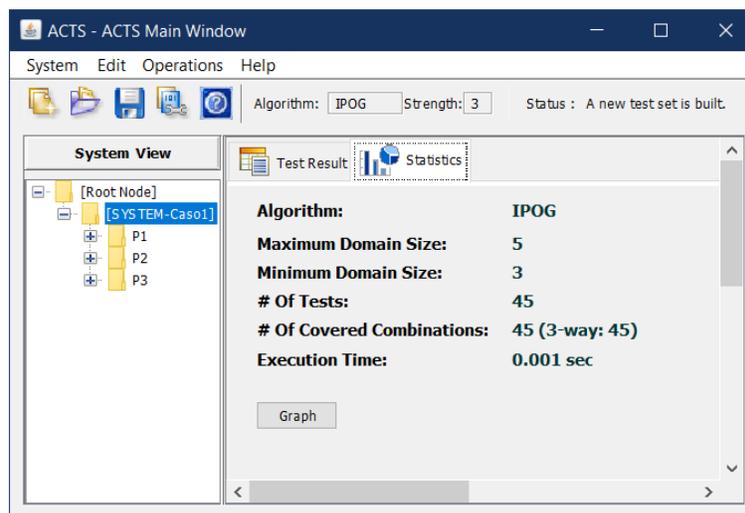


Figura 46 Construcción CA(45; 3, 5, 3) *scratch* mediante ACTS

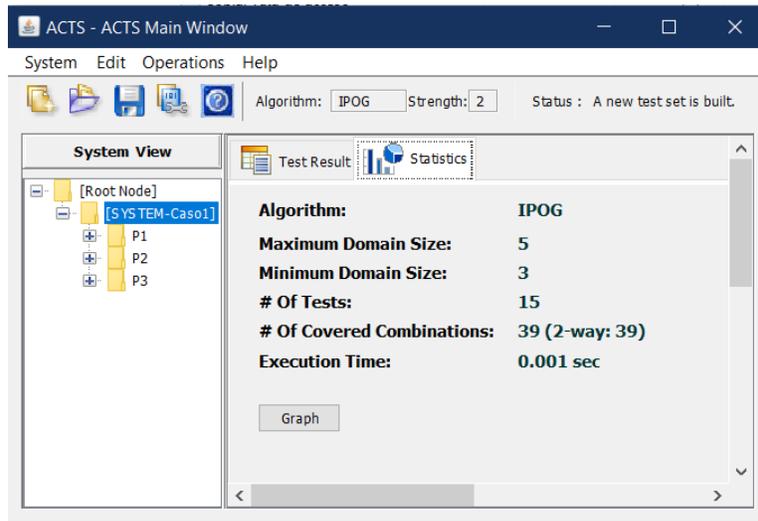


Figura 47 Construcción $CA(15; 3, 5, 2)$ *extend* mediante ACTS

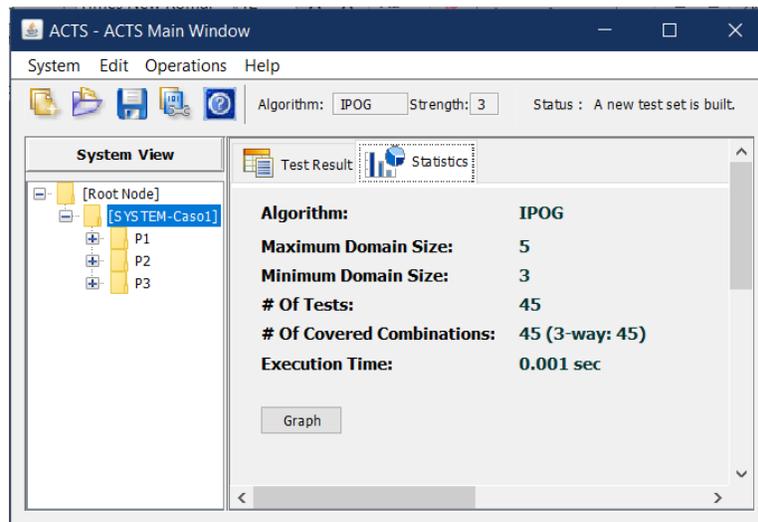


Figura 48 Construcción $CA(45; 3, 5, 3)$ *extend* mediante ACTS

Las figuras 45 y 46 muestran el tiempo de construcción del CA bajo el método *scratch* y las figuras 47 y 48 con *extend*, para ambos casos se utilizó la herramienta ACTS.

Anexo E

Tiempos de construcción de CA para Caso 2

La figura 49 y 50 muestra la construcción de los CAs para el caso 2 mediante ACTS bajo la

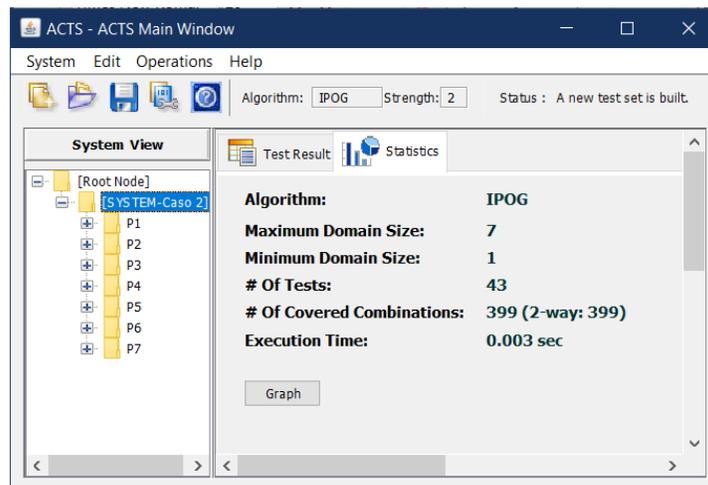


Figura 49 Construcción CA(43; 7,7,2) *scratch* mediante ACTS

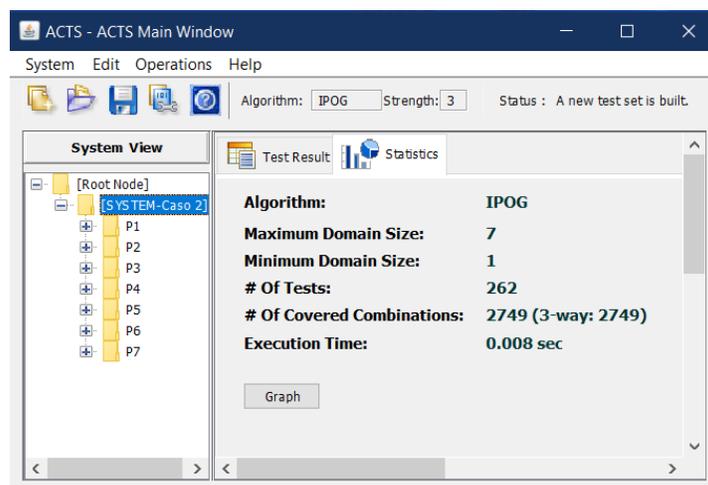


Figura 50 Construcción CA(262; 7,7,3) *scratch* mediante ACTS

modalidad *Scratch* y con fuerzas de 2 y 3. En la figura 51 y 52 se puede observar el tiempo de construcción de un CA aplicando *extend* con valor de t en 2 y en 3. Se puede apreciar que para un covering array con $N = 43$ se tomó 0.001 sec, y para $N = 265$ 0.011 sec.

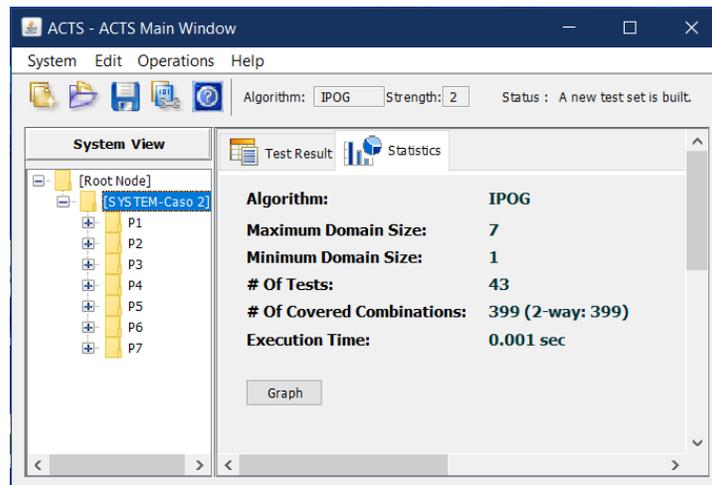


Figura 51 Construcción CA(43; 7, 7, 2) *extend* mediante ACTS

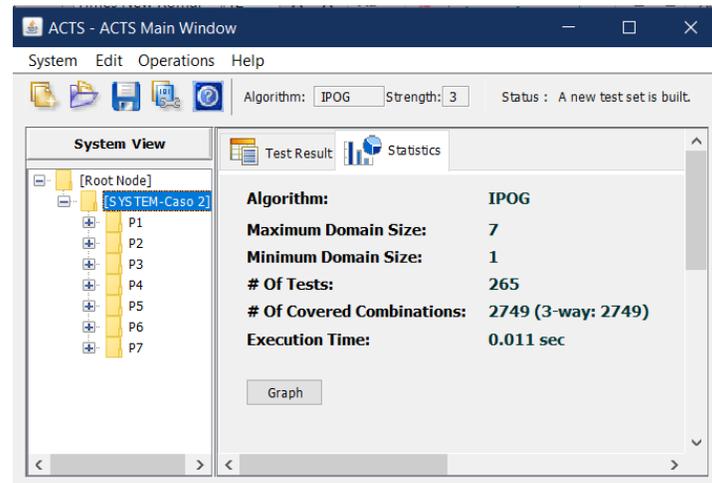


Figura 52 Construcción CA(265; 7, 7, 3) *extend* mediante ACTS

Anexo F

Tiempos de construcción de CA para Caso 3

Para el caso 3 se evaluó el bajo las siguientes condiciones: con 2 metodologías (*scratch* y *extend*), considerando los metales (Pb y Zn) con CA por separado y juntos en un mismo CA

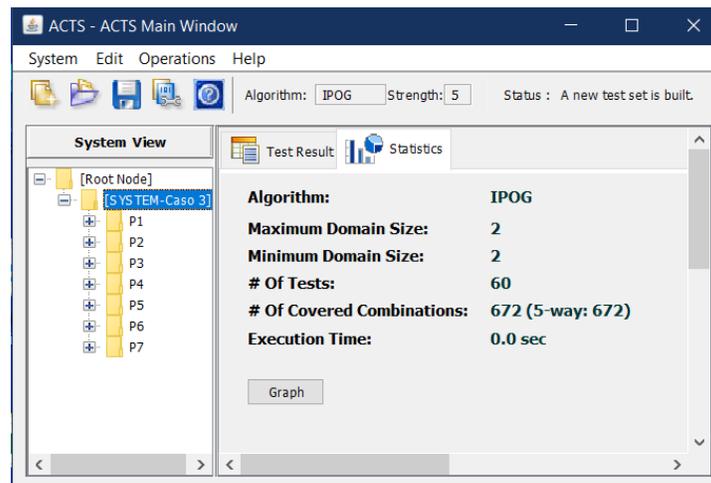


Figura 53 Construcción CA(60; 7,2,5) *scratch* mediante ACTS para Pb y Zn

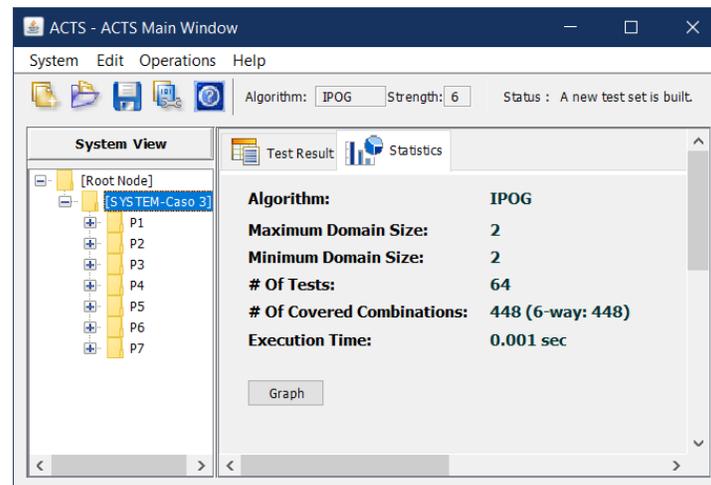


Figura 54 Construcción CA(64; 7,2,6) *scratch* mediante ACTS para Pb y Zn

y con fuerza de 5 y 6. Las figuras 53, 54, 55 y 56 se realizaron considerando 7 parámetros con fuerza de 5 y 6 y bajo los métodos *scratch* y *extend* respectivamente y construyendo una matriz por cada metal.

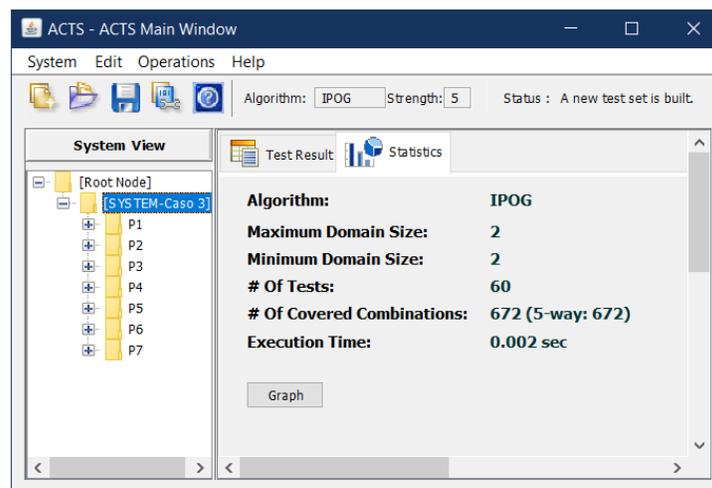


Figura 55 Construcción CA(60; 7,2,5) *extend* mediante ACTS para Pb y Zn

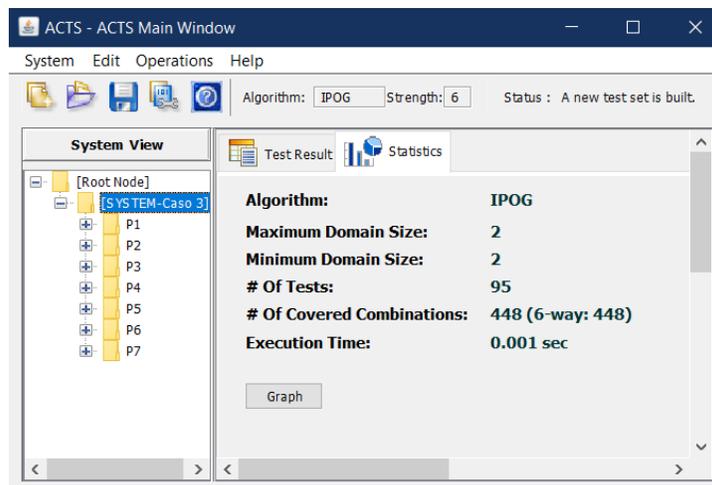


Figura 56 Construcción CA(95; 7,2,6) *extend* mediante ACTS para Pb y Zn

Las figuras 57, 58, 59 y 60 se realizaron considerando 8 parámetros (considerando Pb y Zn como parámetros) con fuerza de 5 y 6 y bajo los métodos *scratch* y *extend* respectivamente y construyendo una matriz por cada metal.

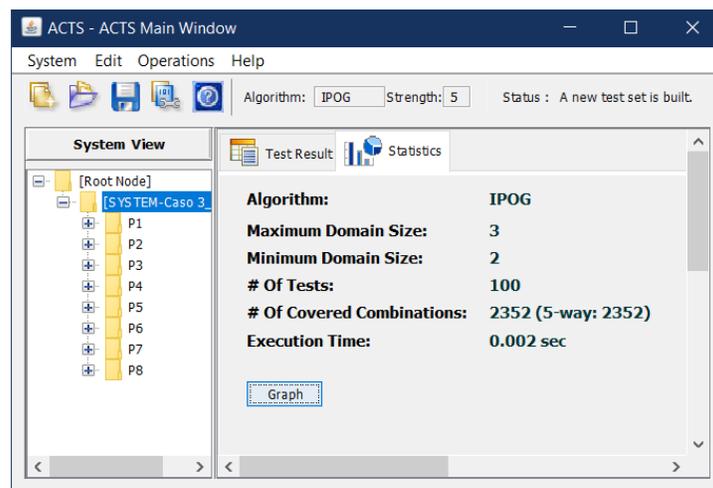


Figura 57 Construcción CA(100; 8,3,5) *scratch* mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto

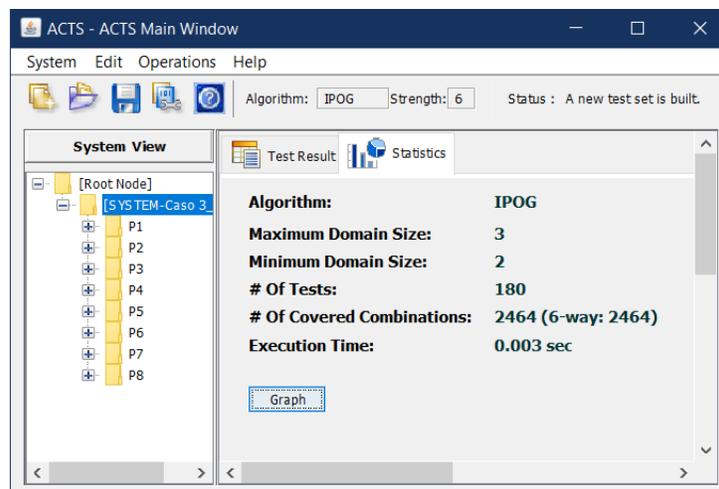


Figura 58 Construcción CA(180; 8,3,6) *scratch* mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto

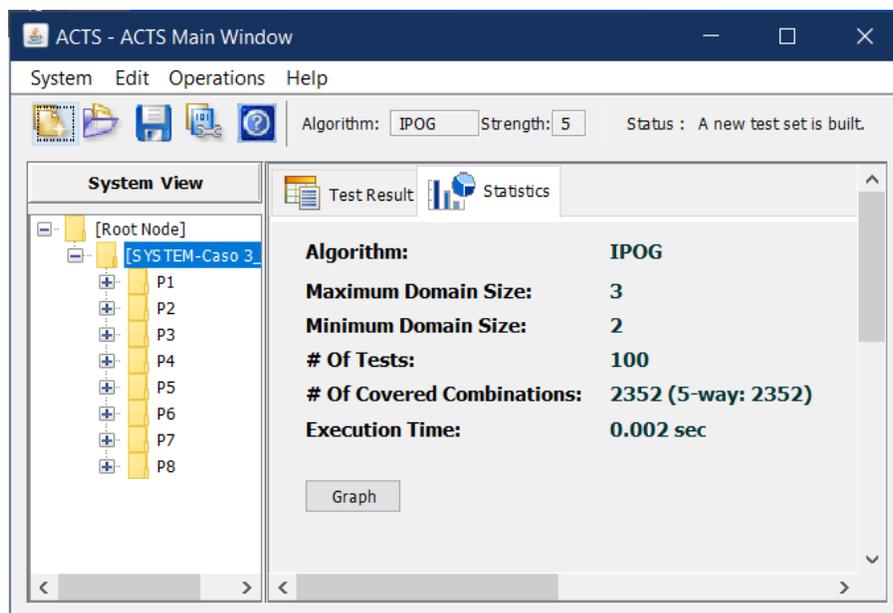


Figura 59 Construcción CA(100; 8,3,5) extend mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto

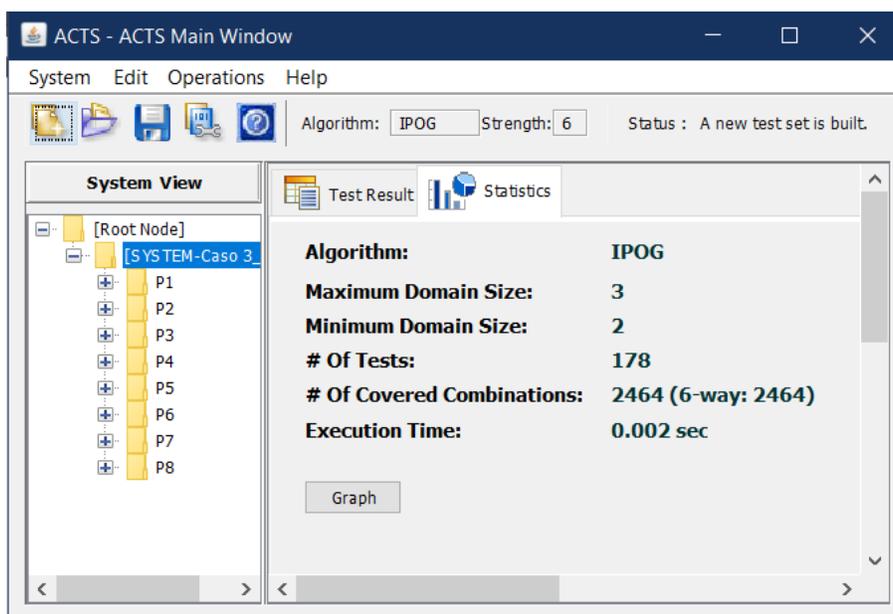


Figura 60 Construcción CA(178; 8,3,6) extend mediante ACTS para Pb y Zn en conjunto