



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA
EJECUCIÓN DE LAS TAREAS DE RECUPERACIÓN DE LA
INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA DAÑADA POR SISMOS**

**TRABAJO TERMINAL DE GRADO
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CADENA DE SUMINISTRO**

PRESENTA

JUAN CARLOS ALONSO TORRES

DIRECTOR DE TRABAJO TERMINAL: M. EN I. GASTON VERTIZ CAMARON

TUTOR: M. EN I. JOSÉ CONCEPCIÓN LÓPEZ RIVERA

TUTOR EXTERNO: DR. JENARO NOSEDAL SÁNCHEZ

TOLUCA, MÉXICO, ENERO, 2022

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Definición del problema.....	2
Objetivo general	3
Objetivos particulares.....	3
Pregunta de investigación aplicada	4
Hipótesis.....	4
Justificación.....	4
Alcance	5
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	6
1.1 Desastres y catástrofes.....	6
1.1.2 Fases del desastre	8
1.2 El cinturón de fuego	11
1.2.1 Frecuencia y magnitud de los sismos en México.....	12
1.2.1.2 Clasificación de los sismos según su magnitud	15
1.3 Problema de investigación	19
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.	25
2.1 Revisión de la literatura.....	27
2.2 Logística humanitaria.....	27
2.3 Cadena de suministro humanitaria	28
2.4 DEA	29
2.4.1 Definición de eficiencia.....	32
2.4.2 Tecnología y eficiencia	36
2.4.3 Modelos DEA.....	40
2.5 Método Bootstrap.....	45
2.5.1 Pruebas estadísticas utilizando Bootstrap.....	46
2.6 Pruebas no paramétricas.....	48
2.6.1 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.....	48
2.6.2 Prueba de Kruskal-Wallis.....	49

2.7 KPI's.....	50
2.8 Introducción a la programación con RStudio.....	50
CAPÍTULO 3: PROPUESTA METODOLÓGICA Y APLICACIÓN.....	54
3.1 Recopilación de datos.....	55
3.2 Clasificación de la información.....	58
3.3 Solución de los modelos para cada nivel educativo aplicando RStudio	64
3.4 Aplicación de DEA	65
3.5 Aplicación de Bootstrap y DEA.....	67
3.6 Resultados producto de la información encontrada	69
3.7 Análisis estadístico de DEA.....	75
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
4.1 Resultados	77
4.2 Análisis de eficiencia de escala.....	82
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	85
REFERENCIAS	89
ANEXOS.....	94
Anexo 1: Gráficas de entradas y salidas por nivel educativo asociadas al grupo 2 y 4 ...	94
Anexo 2: Gráficas de la eficiencia de todas las escuelas de los tres niveles educativos asociadas al grupo 2.....	100
Anexo 3: Gráficas de la eficiencia de todas las escuelas de los tres niveles educativos asociadas al grupo 4.....	108
Anexo 4: Retornos a escala de todas las escuelas de los tres niveles educativos asociadas al grupo 2 y 4.....	116
Anexo 5: Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía y por grupo	122
Anexo 6: Rangos de diferencias significativas entre las eficiencias promedio de los tres niveles educativos.....	128

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Fases del desastre.....	8
Figura 1.2 Cinturón de fuego.	12
Figura 1.3 Número de sismos ocurridos en México en el periodo comprendido de 2000 al 2019.	16
Figura 1.4 Sismos casi imperceptibles 2000-2019.....	17
Figura 1.5 Sismos de magnitud intensa 2000-2019.	18
Figura 1.6 Distribución geográfica de las escuelas de nivel kínder, afectadas en CDMX.	20
Figura 1.7 Distribución geográfica de las escuelas de nivel primaria, afectadas en CDMX.	21
Figura 1.8 Distribución geográfica de las escuelas de nivel secundaria, afectadas en CDMX.	22
Figura 1.9 Situación que se tuvo de las instituciones afectadas de nivel básico.....	23
Figura 2.1 Artículos analizados.....	26
Figura 2.2 Clasificación de los artículos revisados.....	26
Figura 2.3 Isocuanta eficiente.	33
Figura 2.4 Isocuanta eficiente.	34
Figura 2.5 Productividad vs eficiencia técnica.....	35
Figura 2.6 Comparación de combinaciones para distintas DMUs.	36
Figura 2.7 Combinaciones de entrada-salida y supuesto de free disposability.....	38
Figura 2.8 Combinaciones de entrada-salida, free disposability y convexidad.	39
Figura 2.9. Creación de script file.....	51
Figura 3.1 Propuesta metodológica y aplicación.	54
Figura 3.8 Escuelas de nivel kínder por alcaldía, afectadas en la CDMX.	59
Figura 3.9 Escuelas de nivel primaria por alcaldía, afectadas en la CDMX.....	60
Figura 3.10 Escuelas de nivel secundaria por alcaldía, afectadas en la CDMX.	61
Figura 3.11 Escuelas de nivel kínder por grupo, afectadas en la CDMX.	62
Figura 3.12 Escuelas de nivel primaria por grupo, afectadas en la CDMX.	63

Figura 3.13 Escuelas de nivel secundaria por grupo, afectadas en la CDMX.	64
Figura 3.14 Desempeño relativo de las escuelas de nivel kínder por alcaldías (grupo 2 y 4).....	69
Figura 3.17 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel kínder, grupo 2).	70
Figura 3.18 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel kínder, grupo 4).	70
Figura 3.15 Desempeño relativo de las escuelas nivel primaria por alcaldías (grupo 2 y 4).....	71
+Figura 3.19 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel primaria, grupo 2).....	72
Figura 3.20 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel primaria, grupo 4).	72
Figura 3.16 Desempeño relativo de las escuelas nivel secundaria por alcaldías (grupo 2 y 4).....	73
Figura 3.21 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel secundaria, grupo 2)....	74
Figura 3.22 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel secundaria, grupo 4)....	74
Figura 4.7 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel kínder).....	80
Figura 4.8 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 4, nivel kínder).....	81
Figura 3.2 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 2, nivel kínder).....	94
Figura 3.3 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 2, nivel primaria).	95
Figura 3.4 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 2, nivel secundaria).....	96
Figura 3.5 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 4, nivel kínder).....	97
Figura 3.6 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 4, nivel primaria).	98
Figura 3.7 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 4, nivel secundaria).....	99
Figura 4.1 Eficiencias de las DMUs - alcaldías - (grupo 2, nivel kínder).....	100
Figura 4.3 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 2, nivel primaria).....	101
Figura 4.5 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 2, nivel secundaria).....	102
Figura 3.23 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 2, nivel kínder).	103
Figura 3.25 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 2, nivel primaria).....	104
Figura 3.27 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 2, nivel secundaria).	105

Figura 4.9 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel primaria).	106
Figura 4.10 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel secundaria).....	107
Figura 4.2 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 4, nivel kínder).....	108
Figura 4.4 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 4, nivel primaria).....	109
Figura 4.6 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 4, nivel secundaria).	110
Figura 3.24 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 4, nivel kínder).	111
Figura 3.26 Eficiencias de las DMUs en Miguel Hidalgo (grupo 4, nivel primaria)....	112
Figura 3.28 Eficiencias de las DMUs en Azcapotzalco (grupo 4, nivel secundaria)....	113
Figura 4.17 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel Primaria).	114
Figura 4.18 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel secundaria).....	115
Figura 4.11 Retornos a escala (grupo 2, nivel kínder).	116
Figura 4.13 Retornos a escala (grupo 2, nivel primaria).....	117
Figura 4.15 Retornos a escala (grupo 2, nivel secundaria).	118
Figura 4.12 Retornos a escala (grupo 4, nivel kínder).	119
Figura 4.14 Retornos a escala (grupo 4, nivel primaria).....	120
Figura 4.16 Retornos a escala (grupo 4, nivel secundaria).	121
Figura 3.29 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel kínder).	122
Figura 3.30 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 4, nivel kínder).	123
Figura 3.31 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel primaria).	124
Figura 3.32 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 4, nivel primaria).	125

Figura 3.33 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel secundaria).....	126
--	-----

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. 1: Marco para la clasificación de los desastres.	6
Tabla 1.2: Impacto de los desastres y de las catástrofes en algunas tareas realizadas para atender la emergencia.	7
Tabla 1.3: Sismos de mayor magnitud en México, de enero de 2016 a 1 de julio de 2020.	14
Tabla 1.4: Clasificación de los sismos según su magnitud.	15
Tabla 1.5: Listado de acrónimos para las 16 alcaldías de la CDMX.	19
Tabla 1.6: Situación que se tuvo de las instituciones.	23
Tabla 2.1: Artículos analizados.	26
Tabla 2.2: Clasificación de artículos revisados.	27
Tabla 2.3: Diferencias entre logística y logística humanitaria.	28
Tabla 2.4: Artículos DEA relacionados con LH.	30
Tabla 3.1: Resumen de datos para escuelas de nivel kínder.	56
Tabla 3.2: Resumen de datos para escuelas de nivel primaria.	57
Tabla 3.3: Resumen de datos para escuelas de nivel secundaria.	58
Tabla 3.4: Estadísticas de prueba y P-valores para las pruebas de hipótesis para nivel básico, grupos 2 y 4.	68
Tabla 3.5: Estadística de prueba y P-valores para pruebas Kruskal-Wallis en nivel básico.	76
Tabla 4.2: Resumen estadístico DEA-VRS, Grupo 4.	79
Tabla 4.3: Número de escuelas que exhiben el IRS por alcaldía.	83
Tabla 4.4: Número de escuelas que exhiben el IRS por alcaldía.	84
Tabla 5.1: Diferencias significativas entre las eficiencias promedio.	128

INTRODUCCIÓN

En Geofísica, subducción se define como el movimiento o hundimiento de las placas litosféricas, actividad que, por la liberación de energía, genera sismos y actividad volcánica. En el Cinturón de Fuego del Pacífico, que abarca gran parte de México, es la región del mundo dónde se ha registrado mayor actividad sísmica.

La Ciudad de México (CDMX) es la entidad más densamente poblada del país (INEGI, 2015) y es una región, debido a su ubicación geográfica, propensa a afectaciones por terremotos. Por lo tanto, es indispensable tener una alta capacidad de respuesta y recuperación ante dichos eventos.

Ante estos eventos, y concretamente en el sismo ocurrido el pasado 19 de septiembre de 2017 en México, el sector educativo quedó gravemente afectado, 41.817% del total de infraestructuras de educación básica (INEGI, censo de escuelas, maestros y alumnos de educación básica y especial 2013, 2014), que a la fecha es un porcentaje importante; mientras que el 16.85% del total de escuelas existentes de educación básica, aún sigue en obras de reconstrucción.

A partir de eventos ocurridos en el pasado reciente, es posible establecer áreas de mejora, y una tarea esencial para dotar a la ciudad de mayor resiliencia, es la evaluación de las tareas post desastre. A partir de dicha valoración se puede estimar un nivel de desempeño asociado a los recursos empleados y los resultados obtenidos, de tal modo que se tengan identificados cursos de acción (actores y tareas) factibles que permitan la recuperación de la manera más eficiente. En este trabajo, utilizando como herramienta de apoyo el software R, se emplea e ilustra el uso de la técnica de Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis, DEA), para evaluar y analizar el desempeño relativo de diversas alcaldías de la CDMX en las tareas de reconstrucción/rehabilitación de las escuelas afectadas por el terremoto ocurrido el 19 de septiembre de 2017, enfocado en las 16 alcaldías que participaron en las tareas post desastre en escuelas, públicas de nivel básico.

El presente trabajo se divide en 4 capítulos, los cuales ayudarán al logro del objetivo general.

Capítulo 1 Antecedentes. En este capítulo se analiza la problemática de los sismos ocurridos durante los últimos años y las implicaciones que éstos conllevan. También se introducen conceptos básicos.

Capítulo 2 Marco teórico. En este apartado se realiza la revisión de la literatura relacionada a la temática de logística humanitaria y aplicación de modelos de DEA en conjunto con las aportaciones de diversos autores.

Capítulo 3 Propuesta metodológica y aplicación. En esta sección se define la metodología, basada en el DEA y validada con el método Bootstrap y pruebas no paramétricas (Prueba de Kruskal-Willis), que será utilizada y aplicada al caso de estudio.

Capítulo 4 Análisis de resultados. En este apartado se presentan los resultados de la investigación y se identifican, a través de análisis estadístico con método Bootstrap e intervalos de confianza, las Unidades de Toma de Decisión (Decision Making Units, DMU) que presentan una mayor eficiencia relativa.

Definición del problema

La frecuencia y la magnitud de los sismos observados en las últimas décadas en México han ocasionado pérdidas materiales en muchos sectores. Uno de estos, es el sector educativo. Estos eventos tienen una alta incertidumbre y son de ocurrencia repentina, lo cual ocasiona que, de llegar a ser un desastre, el nivel de daños sea muy alto.

La situación actual de la infraestructura educativa afectada por los sismos del año 2017, en CDMX, reside en la posible inexistencia de una metodología adecuada que permita eficientar la asignación de tareas en la fase de recuperación ante un sismo.

La deficiencia, en la fase post desastre, de las tareas de recuperación son producto de diversos factores, sin embargo, una de las principales causas de ésta, es la falta de coordinación entre los diversos actores que participan. Posiblemente esto se deba a una falta de alineación de objetivos dentro de la cadena de suministro encargada del despliegue de las acciones de recuperación. Otro posible factor es la distorsión de la información, lo cual repercute en redoblar esfuerzos para algunas estructuras dañadas mientras que por otro lado se desatiende totalmente a otras.

A la luz de esta situación resulta imprescindible la propuesta de una metodología precisa para evaluar el desempeño de los actores que participaron durante las actividades de reconstrucción/rehabilitación de la infraestructura de los centros educativos afectados, a través de la cual se pueda identificar la o las DMUs con un mejor nivel de desempeño.

Objetivo general

Proponer y aplicar una metodología que permita identificar aquellos centros educativos de nivel básico que sufrieron daños ante un sismo y que presentaron una mayor eficiencia relativa en las tareas de reconstrucción/rehabilitación, que permita mejorar la capacidad de respuesta de la autoridad y los distintos actores que participan en la fase de recuperación ante un sismo, para atender lo más pronto posible el daño de la infraestructura del sector de educación básica.

Objetivos particulares

Para lograr lo antes descrito es necesario:

- Buscar información relacionada con edificios escolares afectados por el sismo (reconstrucción/rehabilitación) y su financiamiento por el gobierno.

- Seleccionar una herramienta que permita evaluar el desempeño de las tareas en el post desastre.
- Proponer la metodología que permita identificar los niveles de eficiencia en cada nivel escolar (kínder, primaria y secundaria), entre otras.
- Aplicar la metodología para evaluar el desempeño de la ejecución de tareas post desastre.
- Evaluar el desempeño entre las 16 DMUs.
- Identificar la o las DMUs con mejor desempeño.

Pregunta de investigación aplicada

¿Es posible detectar los planteles de nivel básico, cuyas prácticas fueron las mejores y resultan asequibles para aumentar la potencial resiliencia de la infraestructura de la CDMX ante eventos futuros?

Hipótesis

La propuesta y aplicación de la metodología, permite identificar los planteles que presentaron una mejor eficiencia en las labores de reconstrucción/rehabilitación, de entre aquellos que fueron afectados por un sismo.

Justificación

El presente trabajo de investigación aplicada surge como respuesta al reducido volumen de contribuciones de investigación en el área de coordinación del ámbito multi-agencia de la logística humanitaria (Ceballos-Parra, Sarache y Gómez, 2018).

Una de las repercusiones más críticas, durante la fase de recuperación después de un sismo, es la duplicidad de esfuerzos debido a la falta de asignación de roles (Ceballos-Parra, Sarache y Gómez, 2018). Las condiciones geográficas del país, al pertenecer al cinturón de fuego, nos deja vulnerables a actividad sísmica con mayor frecuencia que en

otras latitudes del mundo. Ante estos eventos, y concretamente en el sismo ocurrido el pasado 19 de septiembre de 2017 en México, el sector educativo quedó gravemente afectado en cuanto a infraestructura se refiere.

En la última década, los sismos en México se han incrementado de manera alarmante. Cifras oficiales del Servicio Sismológico Nacional, revelan que tan solo en los últimos 7 años, han pasado de un promedio de 6 a 47 sismos por día. Debido a esto, es necesario desarrollar una metodología que ayude a generar una evaluación del desempeño en la eficiencia en la ejecución de las tareas realizadas para clasificar la infraestructura educativa que sufrió daño ante un sismo.

Alcance

En el presente trabajo, se considera como caso de estudio las afectaciones ocurridas, por el sismo del pasado 19 de septiembre de 2017, en específico las afectaciones de la infraestructura de nivel educativo básico en la CDMX. Para ello se consideraron 16 Alcandías y 1730 escuelas.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Desastres y catástrofes

De acuerdo con la definición de Van Wassenhove & Pedraza-Martínez (2010), un desastre es la interrupción que afecta la totalidad de un sistema. Así mismo la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC), citada en Gómez Ramírez (2017), definen a un desastre como:

“Un evento repentino y calamitoso que altera seriamente el funcionamiento de una comunidad o sociedad y provoca pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o de la sociedad para hacer frente con sus propios recursos” (p. 9).

Con base en distintos criterios, los desastres pueden ser categorizados por: origen y el tiempo de ocurrencia, entre otras. En la Tabla 1.1 se puede observar una clasificación de tales eventos.

Tabla 1. 1: Marco para la clasificación de los desastres.

		Origen del desastre	
		Natural	Causado por el hombre
Tiempo de ocurrencia	De inicio repentino	Terremoto Tsunami Huracán	Ataque terrorista Golpe de Estado Fuga de productos químicos
	De inicio lento	Hambruna Pobreza	Crisis políticas Crisis de refugiados

Fuente: Gómez Ramírez (2017 p. 9).

Es importante definir de manera clara y precisa la diferencia entre desastre y catástrofe, debido a que las tareas de recuperación estarán en función de la magnitud que adquiera la emergencia.

Según Holguín-Veras, Jaller, & Wachtendorf (2012), en un desastre, los efectos ocasionados por el evento; a pesar del detrimento, en los bienes disponibles, que pueda presentarse, la población local, las organizaciones gubernamentales y humanitarias, son capaces de atender los daños originados por el evento. En contraste, en una catástrofe, la capacidad de respuesta del sector o región comprometida se ve fuertemente deteriorada y en la mayoría de los casos será necesario apelar a ayuda externa, a cualquier escala (regional, nacional o internacional). En la Tabla 1.2 replicada de Gómez Ramírez (2017 p. 10) se ilustra, para su mejor comprensión, el impacto causado por catástrofes y desastres a ciertas tareas post desastre necesarias para responder a la emergencia.

Tabla 1.2: Impacto de los desastres y de las catástrofes en algunas tareas realizadas para atender la emergencia.

Característica	Desastre	Catástrofe
Inventarios de suministros locales	Parcialmente destruido, los suministros sobrevivientes pueden formar parte de la respuesta.	Mayormente destruido, el papel de los suministros locales en la respuesta es mínimo.
Demanda de suministros	Aumenta debido a las necesidades de las empresas, las personas y la respuesta.	Aumentos enormes debido a la magnitud de los impactos.
Cadenas de suministro del sector privado	Parcialmente impactadas pero funcionales. Pueden ayudar en la respuesta.	Destruídas. No pueden ayudar en la respuesta.
Resultado neto	La ayuda local es clave en los primeros días, la ayuda externa trae suministros adicionales.	La ayuda externa es la fuente primaria de suministros.

Fuente: Gómez Ramírez (2017 p. 10).

1.1.2 Fases del desastre

Otro aspecto esencial, es identificar claramente cuáles son las fases de un sismo, de esta forma, se podrá observar de manera precisa el área de oportunidad. La Figura 1.1 nos muestra las fases de un desastre (sismo).



Figura 1.1 Fases del desastre.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ortega (2016).

En la Figura 1.1, los actores que participan en la fase de post desastre son:

- Organizaciones de la sociedad civil (OSC)
- Organizaciones no gubernamentales (ONG)
- Empresas privadas (EP)
- Gobierno (G)

En el caso de estudio que será analizado sólo participó el gobierno de la CDMX.

Las fases de los desastres son, indistintamente del tipo de desastre, antes, durante y después.

Además, el Centro Regional de Información sobre Desastres (CRID) define a las etapas del desastre como:

“Las actividades específicas que se realizan en el antes, durante y después del desastre con el fin de facilitar una mejor definición y organización de las acciones que se deben realizar en todo el proceso.”

El antes

Tiene como objetivo minimizar o evitar daños mayores a la comunidad, la cual está comprendida por las siguientes etapas:

- a) ***Mitigar***: la finalidad de esta etapa es tomar decisiones previas al sismo que permitan minimizar los efectos de éste sobre la sociedad y su entorno, algunas de las acciones que pueden considerarse son: identificar y señalar las zonas y/o puntos de reunión, reforzamiento de estructuras en inmuebles que presenten condiciones incapaces de resistir un evento determinado, etc. El CRID define mitigación como: *“Medidas tomadas con anticipación al desastre, con el ánimo de reducir o eliminar su impacto sobre la sociedad y medio ambiente”*
- b) ***Preparar***: en esta etapa se diseña la planificación y estrategia que dan lugar a las acciones que deben realizarse durante el sismo para minimizar las: *“Actividades diseñadas para minimizar pérdidas de vida y daños, para organizar el traslado temporal de personas y propiedades de un lugar amenazado y facilitarles durante un tiempo rescate, socorro y rehabilitación.”*
- c) ***Alertar***: establecer un sistema en el cual, se proporcione capacitación a la comunidad en general con la finalidad de instruirla respecto a las acciones de respuesta ante un sismo.

Durante

Las acciones de respuesta, previamente establecidas en el antes, se deben ejecutar durante el periodo de emergencia o inmediatamente ocurrido el desastre. La colección de etapas que conforman la fase del durante son:

- a) ***Evacuación***: movilización de las personas desde el lugar de riesgo hasta las áreas definidas como zonas de seguridad, ya sea que éstas se encuentren en el mismo piso, pisos contiguos o en el exterior. La evacuación debe ser rápida, ordenada, segura y planificada, no improvisada.
- b) ***Asistencia***: consiste en atender las necesidades urgentes causadas por el evento. Cuando ocurre un desastre, las instituciones participantes brindan refugio, alimento, y servicios de salud y salud mental para atender las necesidades humanas básicas.
- c) ***Búsqueda y rescate***: proceso que consiste en localizar y recobrar a las víctimas de desastres, para que puedan ser asistidos con primeros auxilios y atención médica posiblemente requerida mientras ocurre el desastre.

Después

En esta fase son ejecutadas todas las actividades posteriores al desastre. Verifican daños, en infraestructura, líneas vitales, etc. Estas actividades están conformadas por:

- a) ***Búsqueda***: proceso, posterior al evento, que consiste en localizar y recobrar a las víctimas de desastres, para que puedan ser asistidos con primeros auxilios y atención médica que pueda ser requerida posterior al desastre.
- b) ***Rescate***: conjunto de acciones coordinadas de emergencia realizadas en la zona afectada por un desastre, que consisten en el traslado de una víctima, bajo soporte

vital básico, desde el epicentro de peligro hasta la unidad asistencial idónea para ofrecer atenciones y cuidados suficientes y necesarios.

- c) **Recuperación:** esta fase se divide en rehabilitación (operaciones y decisiones tomadas después del siniestro con la finalidad de restablecer la región afectada, y devolverle sus condiciones de vida normal, y en reconstrucción (Acciones realizadas después del periodo de rehabilitación, para restablecer una región afectada por un desastre. Dichas actividades de post rehabilitación incluirían construcción de viviendas permanentes, restauración total de todos los servicios, entre otros).

1.2 El cinturón de fuego

Los sismos ocurren con gran frecuencia de manera impredecible e inevitable, en muchos lugares del mundo se ha tenido que aprender a vivir con la incertidumbre de cuándo serán devastados por un sismo. En el mundo existe una región que llama mucho la atención debido a su intensa y frecuente actividad de subducción, es el Cinturón de Fuego.

El Cinturón de Fuego o Anillo de Fuego (CENAPRED, 2020), se encuentra ubicado en las costas del Océano Pacífico, caracterizada por concentrar algunas de las zonas de mayor subducción del mundo, ocasionando una actividad sísmica y volcánica frecuente e intensa en el territorio que comprende.

El Cinturón de Fuego cuenta con una extensión de 40,000 km y tiene forma de herradura, tal y como se aprecia en la Figura 1.2. Contiene 452 volcanes lo cual representa más del 75% de los volcanes activos e inactivos del mundo. Aproximadamente el 90% de los terremotos regulares y 80% de los terremotos más intensos se generan a través del Cinturón de Fuego.

Los principales 15 países que se encuentran en esa peligrosa zona son:

Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Estados Unidos y Canadá.



Figura 1.2 Cinturón de fuego.

Fuente: CENAPRED (2020).

1.2.1 Frecuencia y magnitud de los sismos en México

Como se mencionó en el punto anterior, México se encuentra en la región con mayor actividad sísmica del mundo y esto comprueba la frecuencia y la magnitud con la que ocurren los sismos en México.

Cifras oficiales del Servicio Sismológico Nacional (SSN), reporta que del periodo comprendido del 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012 ocurrieron 28,080 sismos; es decir, un promedio de 6 sismos diarios, pero esta frecuencia ha ido aumentando de manera muy alarmante, debido a que del 1 de enero de 2013 al 30 de octubre de 2019 se

registraron 117,722 sismos. Una muestra de los sismos desde el año 2000 al 2019 ocurridos en México, se presentan en la Figura 1.3

En los últimos 5 años han ocurrido 19 sismos de al menos 6 puntos en la escala de Richter.

En la Tabla 1.3 se muestran los sismos más intensos de los últimos 5 años.

Tabla 1.3: Sismos de mayor magnitud en México, de enero de 2016 a 1 de julio de 2020.

Fecha	Hora	Magnitud en escala Richter	Profundidad en km	Localización EPICENTRO
21/01/2016	12:06:58	6.5	10	258 km al OESTE de CIHUATLAN, JAL
15/04/2016	09:11:24	6.1	12	161 km al SUR de CD HIDALGO, CHIS
25/04/2016	02:07:12	6	10.4	104 km al SUROESTE de HUIXTLA, CHIS
27/04/2016	07:51:18	6	20	137 km al SUROESTE de HUIXTLA, CHIS
28/04/2016	20:33:39	6.6	10	837 km al SUROESTE de TECPAN, GRO
08/05/2016	02:33:59	6	7.4	19 km al ESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX
07/06/2016	05:51:36	6.1	8.7	131 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL
14/06/2017	02:29:04	6.9	107.1	19 km al NOROESTE de CD HIDALGO, CHIS
07/09/2017	23:49:17	8.2	45.9	140 km al SUROESTE de PIJIAPAN, CHIS
19/09/2017	13:14:39	7.1	51.1	8 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE
23/09/2017	07:53:04	6.1	22	9 km al SUROESTE de CD IXTEPEC, OAX
19/01/2018	10:17:45	6.3	16.1	77 km al NORESTE de LORETO, BCS
16/02/2018	17:39:39	7.2	16	14 km al SURESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX
19/02/2018	00:56:58	6	10.2	31 km al SURESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX
01/02/2019	10:14:12	6.5	76.2	37 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS
19/11/2019	22:27:06	6.4	9.4	162 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS
04/01/2020	22:40:48	6	83	38 km al SURESTE de UNION HIDALGO, OAX
22/05/2020	03:46:04	6.1	10	200 km al SURESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS
23/06/2020	10:29:03	7.4	22.6	2 km al NORESTE de CRUCECITA, OAX

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de UNAM (2020).

1.2.1.2 Clasificación de los sismos según su magnitud

Tabla 1.4: Clasificación de los sismos según su magnitud.

Intervalo de magnitud	Tipo daño
2.0-3.0 Micro	No son perceptibles.
3.0-3.9 Menor	Perceptibles con poco movimiento y sin daño.
4.0-4.9 Ligera	Perceptibles con movimiento de objetos y rara vez produce daño.
5.0-5.9 Moderada (o Mediana)	Puede causar daños mayores en construcciones débiles o mal construidas.
6.0-6.9 Fuerte	Pueden ser destructivos.
7.0-7.9 Mayor	Pueden ser destructivos en zonas extensas.
8.0-9.9 Gran Magnitud	Catastróficos, provocando destrucción total en zonas cercanas al epicentro.
10 o + Épica	Jamás registrado, puede generar una extinción local.

Fuente: Servicio geológico de Estados Unidos (USGS).

En las Figuras 1.4 y 1.5 se muestra un resumen de los sismos casi imperceptibles y de magnitud intensa respectivamente. Esto con la finalidad de aproximar un comportamiento de los sismos cuya intensidad es de interés para el caso de estudio.

Año	No. De sismos Ocurridos
2000	1052
2001	1344
2002	1688
2003	1323
2004	1346
2005	1210
2006	1355
2007	1528
2008	1955
2009	2301
2010	3462
2011	4272
2012	5244
2013	5361
2014	7608
2015	10496
2016	15547
2017	26363
2018	30193
2019	22510

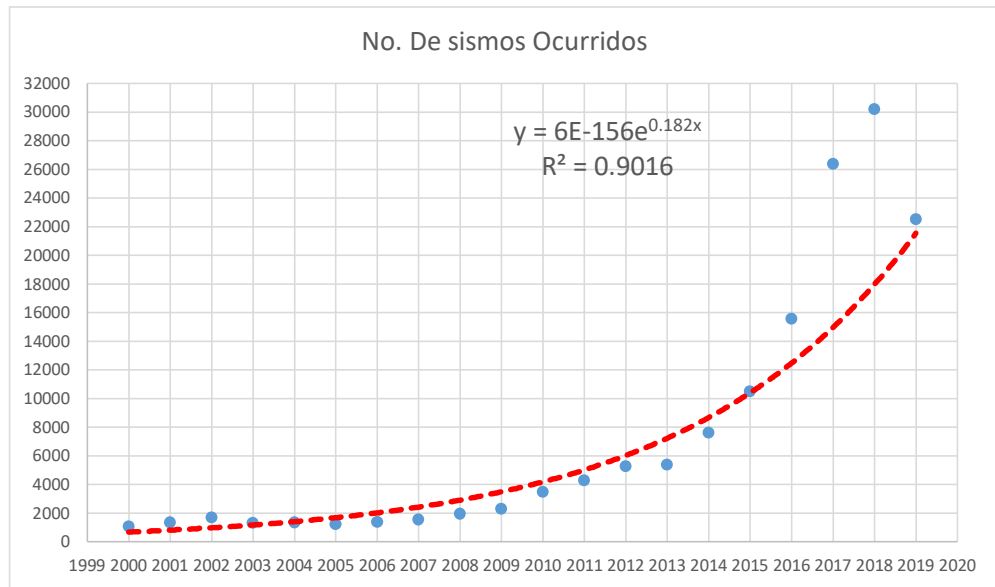


Figura 1.3 Número de sismos ocurridos en México en el periodo comprendido de 2000 al 2019.

Fuente: Elaboración propia con datos del SSN, consultado el 12/11/2019 a las 22:00horas.

AÑO	SISMOS
2000	1022
2001	1297
2002	1644
2003	1301
2004	1310
2005	1193
2006	1336
2007	127
2008	1938
2009	2263
2010	3431
2011	4236
2012	5181
2013	5323
2014	7551
2015	10901
2016	15485
2017	26259
2018	30070
2019	22501

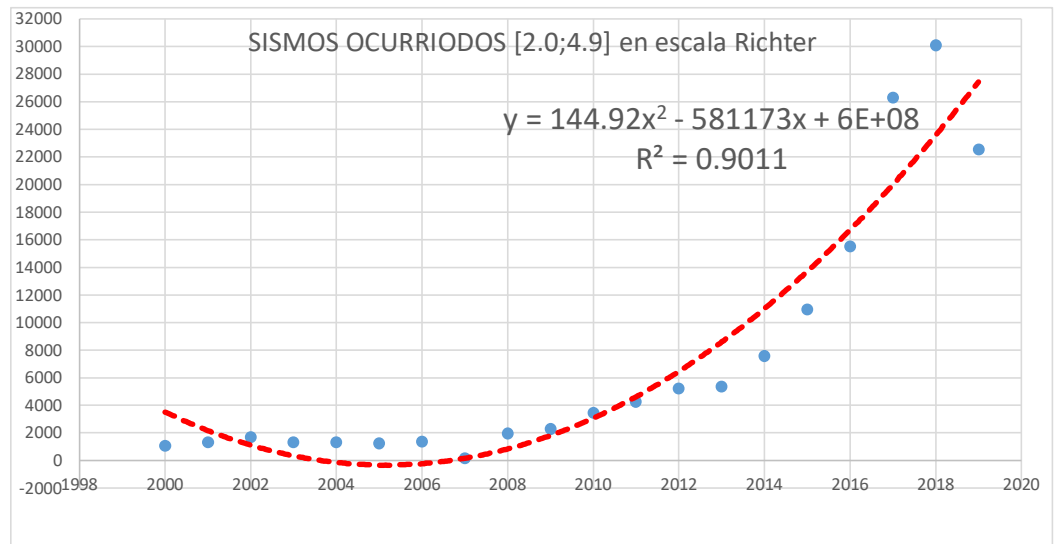


Figura 1.4 Sismos casi imperceptibles 2000-2019.

Fuente: Elaboración propia con datos del SSN, consultado el 12/11/2019 a las 22:00 horas.

AÑO	SISMOS
2000	21
2001	38
2002	44
2003	22
2004	36
2005	17
2006	19
2007	35
2008	17
2009	38
2010	31
2011	32
2012	62
2013	37
2014	50
2015	33
2016	36
2017	84
2018	39
2019	29

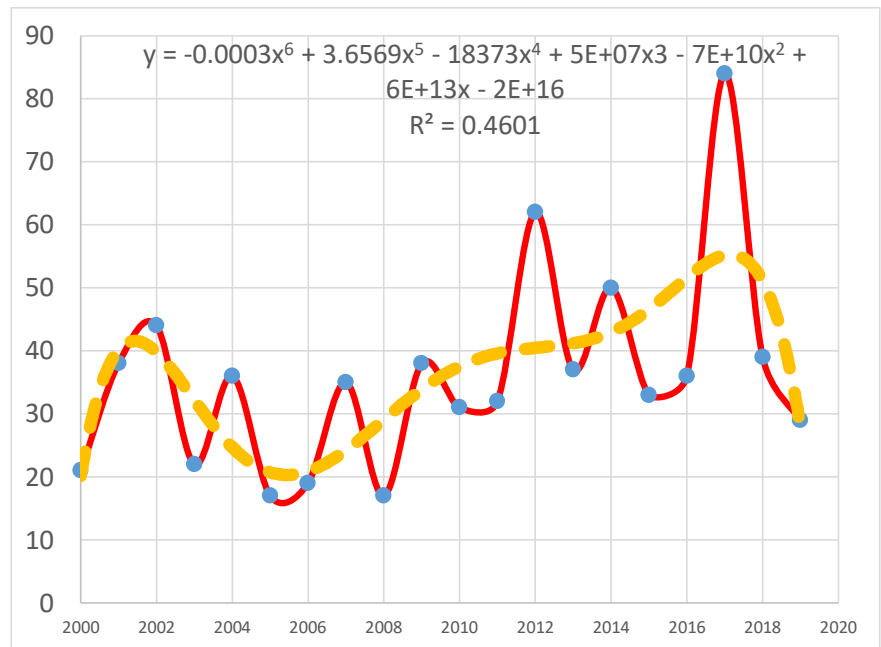


Figura 1.5 Sismos de magnitud intensa 2000-2019.

Fuente: Elaboración propia con datos del SSN consultado el 12/11/2019 a las 22:00horas.

Todos los eventos mostrados en la Tabla 1.3 han tenido sus perjuicios, pero el más devastador, acontecido en el último lustro, es el ocurrido el pasado 19 de septiembre de 2017, que con una magnitud de 7.1 grados en la escala de Richter, devastó, entre otras regiones, la CDMX.

1.3 Problema de investigación

Como se ha hecho mención anteriormente, uno de los sectores afectados por este sismo es el educativo en cuanto a infraestructura se refiere. En las Figuras 1.6, 1.7, y 1.8 se puede observar una distribución de las alcaldías con mayor afectación por el sismo antes descrito, para cada nivel (kínder, primaria y secundaria) respectivamente. El listado de acrónimos, para las 16 alcaldías, se encuentra en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5: Listado de acrónimos para las 16 alcaldías de la CDMX.

Alcaldía	Acrónimo
Álvaro Obregón	A0
Azcapotzalco	AZC
Benito Juárez	BJ
Coyoacán	COY
Cuajimalpa	CUAJI
Cuauhtémoc	CUAU
Gustavo A. Madero	GAM
Iztacalco	IZT
Iztapalapa	IZTAPA
Magdalena Contreras	MC
Miguel Hidalgo	MH
Milpa Alta	MA
Tláhuac	TLA
Tlalpan	TLALPAN
Venustiano Carranza	VC
Xochimilco	XOCH

Fuente: Elaboración propia.

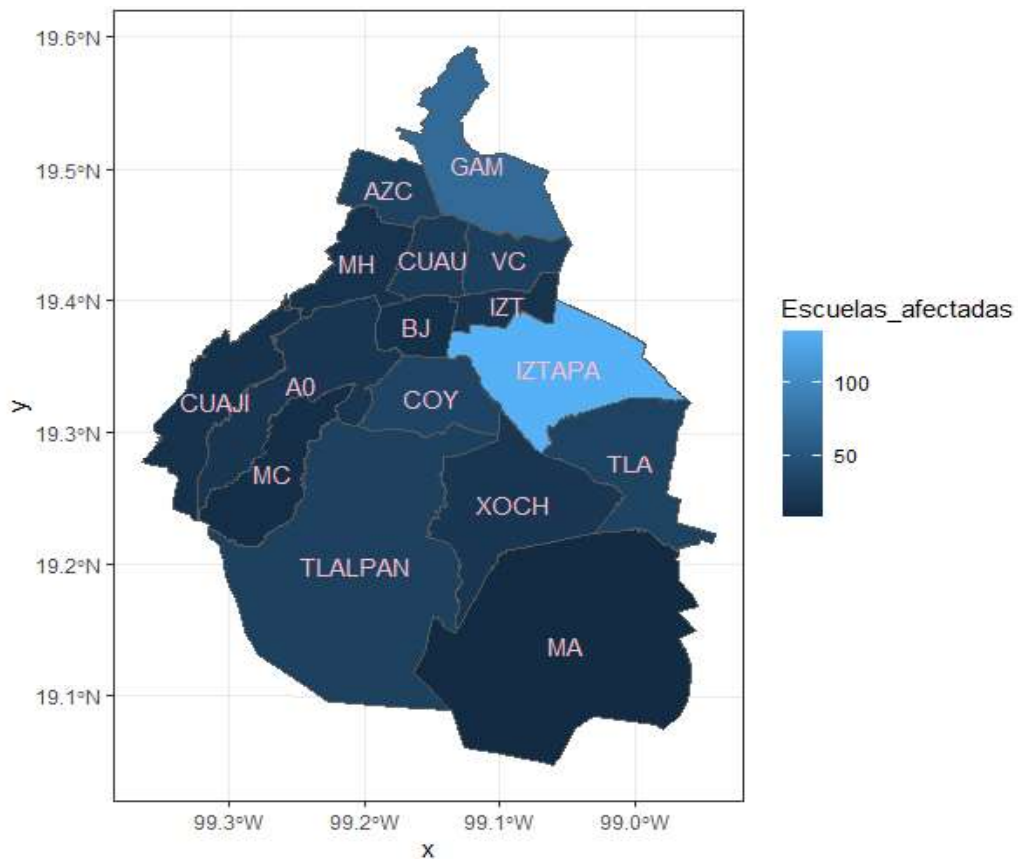


Figura 1.6 Distribución geográfica de las escuelas de nivel kínder, afectadas en CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

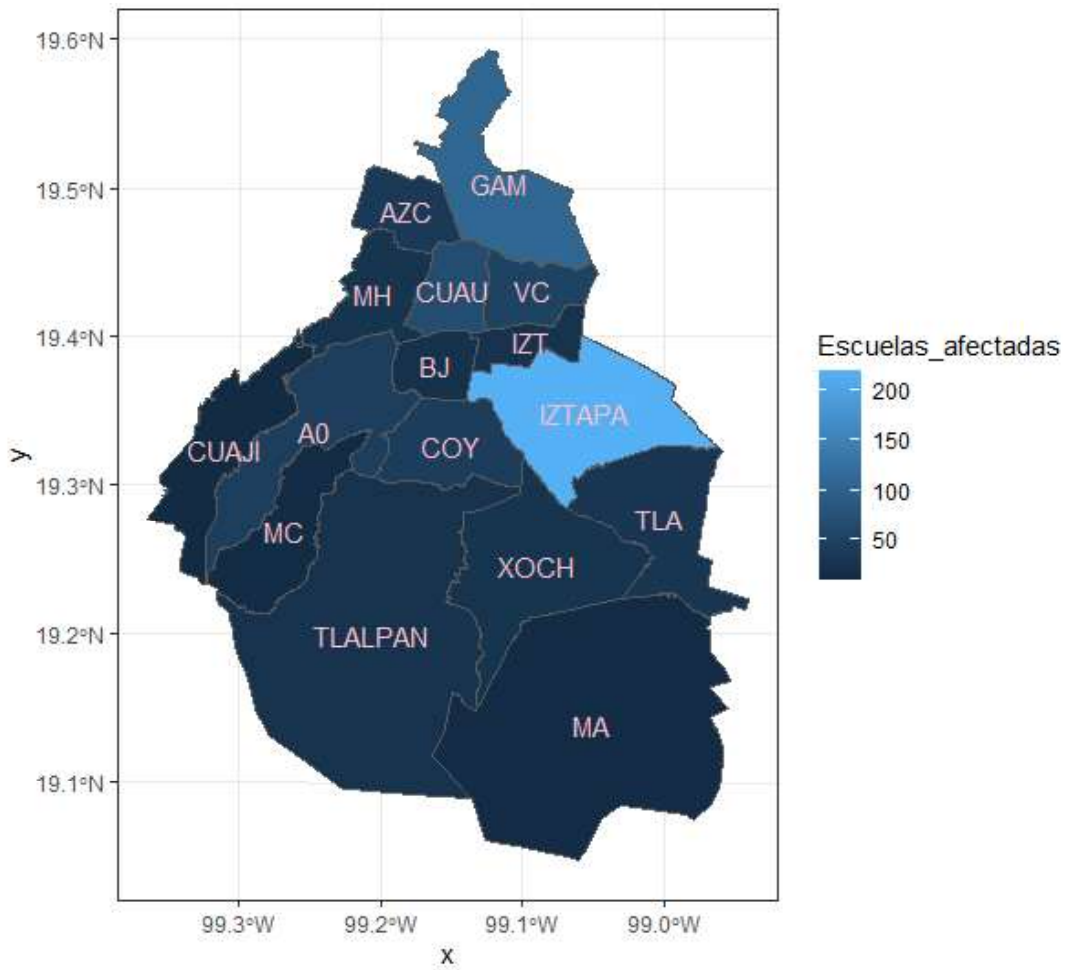


Figura 1.7 Distribución geográfica de las escuelas de nivel primaria, afectadas en CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

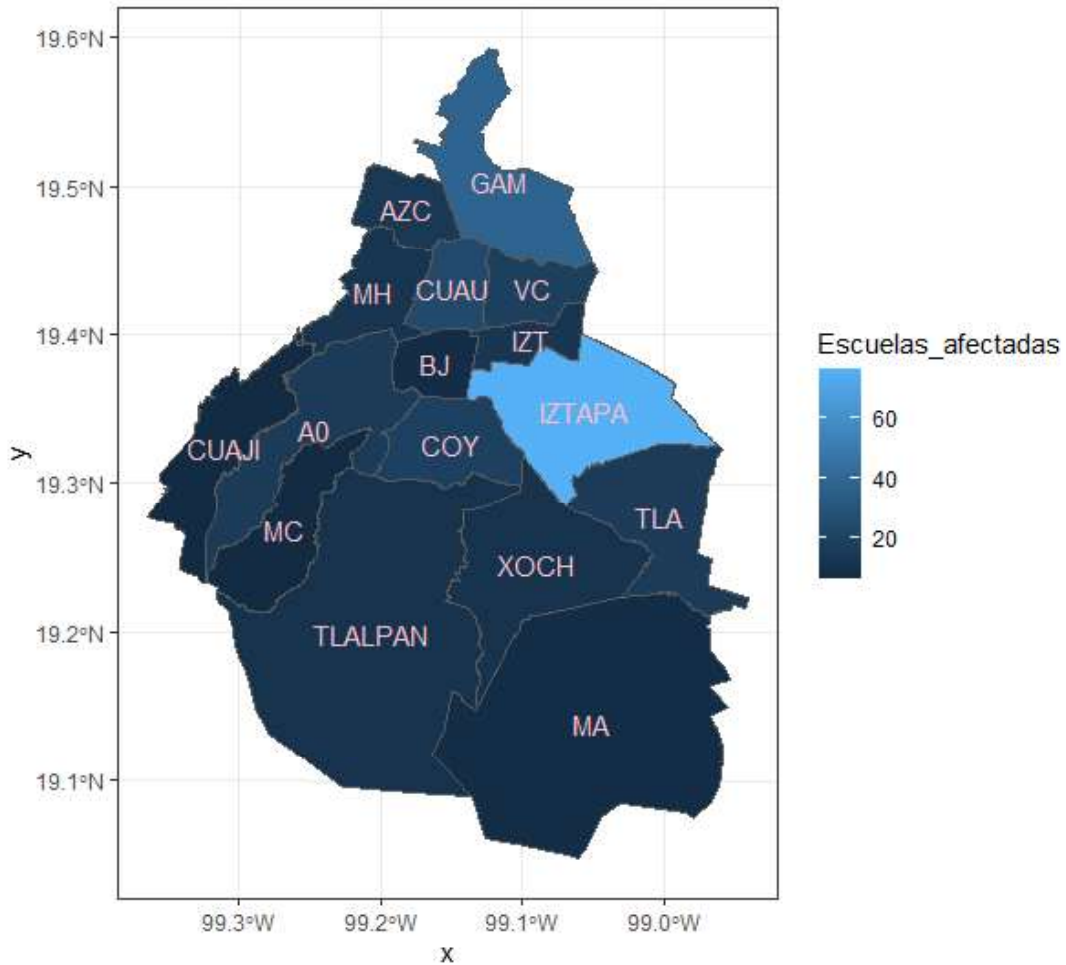


Figura 1.8 Distribución geográfica de las escuelas de nivel secundaria, afectadas en CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

Tan solo en la CDMX el número de escuelas afectadas del sector educativo de nivel básico es muy alto, esta información se resume en la Figura 1.9 (porcentaje) y la Tabla 1.6 (número total), donde se muestra la situación que se tuvo de las instituciones que fueron afectadas.

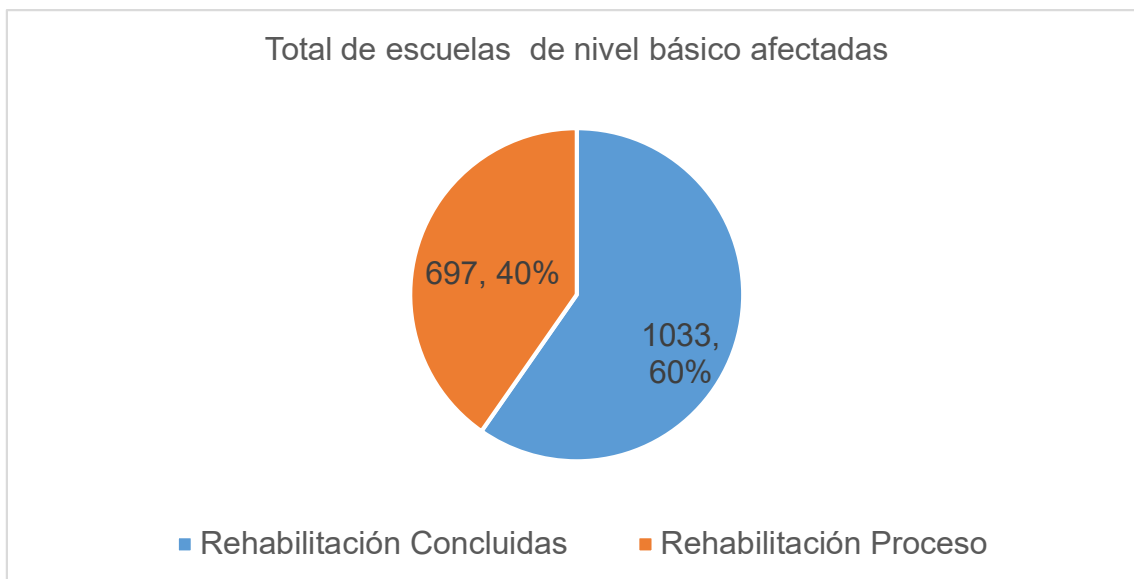


Figura 1.9 Situación que se tuvo de las instituciones afectadas de nivel básico.

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

Tabla 1.6: Situación que se tuvo de las instituciones.

Total de escuelas de nivel básico afectadas	Rehabilitación	
	Concluidas	Proceso
1730	1033	697

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

Claramente se puede observar que, a más de 3 años, aún un porcentaje muy alto se encuentra en proceso de rehabilitación/reconstrucción. Cabe señalar que en el último año no actualizaron los datos en el sitio consultado.

Hasta aquí se muestra un panorama general y de la república mexicana de los sismos y sus niveles de ocurrencia, de lo cual se puede concluir que es necesario estar preparado para la fase de recuperación, debido a que son eventos de ocurrencia súbita. Para lograr mejorar y eficientar las tareas de recuperación en la fase post desastre, es primordial identificar las escuelas que presentaron un mejor desempeño relativo en las tareas de reconstrucción/rehabilitación, de tal manera que permita identificar las acciones con las

cuales se alcanzan los objetivos con los recursos disponibles con un mejor tiempo de respuesta.

Existen metodologías que permiten evaluar el desempeño. El DEA, es una de ellas. Esto se abordará de manera más amplia en el capítulo 2.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se presenta el análisis de la literatura revisada con la finalidad de definir la metodología a utilizar en el desarrollo del proyecto de investigación.

Para mejorar el desempeño de una cadena de suministro, todos los eslabones deben realizar acciones que estén orientadas al objetivo general de la cadena (Chopra & Meindl, 2016).

La logística humanitaria (LH) es un campo de estudio en crecimiento exponencial, en el cual, el número de publicaciones es duplicada cada 1.44 años. Una tasa de crecimiento aproximada identificada es de 61.48% anual (Ceballos-Parra, Sarache y Gómez, 2018).

Existen muy pocas publicaciones en cuanto a la perspectiva de fases del desastre de la LH. Las fases de un desastre siguen un patrón de ciclo de vida, que se rigen por 4 etapas primordiales: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. Una de las repercusiones más críticas, durante la fase de recuperación después de un sismo, es la duplicidad de esfuerzos debido a la falta de asignación de roles (Ceballos-Parra, Sarache y Gómez, 2018). Los investigadores centran su interés en aportar soluciones a las fases de respuesta y de preparación y en contraste la fase de mitigación ha sido poco abordada (Ceballos-Parra, Sarache y Gómez, 2018).

Para ilustrar esto se toma un análisis bibliométrico realizado por Ceballos-Parra, Sarache y Gómez (2018), el cual se puede observar de manera resumida en las Figuras 2.1 y 2.2 y en las Tablas 2.1 y 2.2.

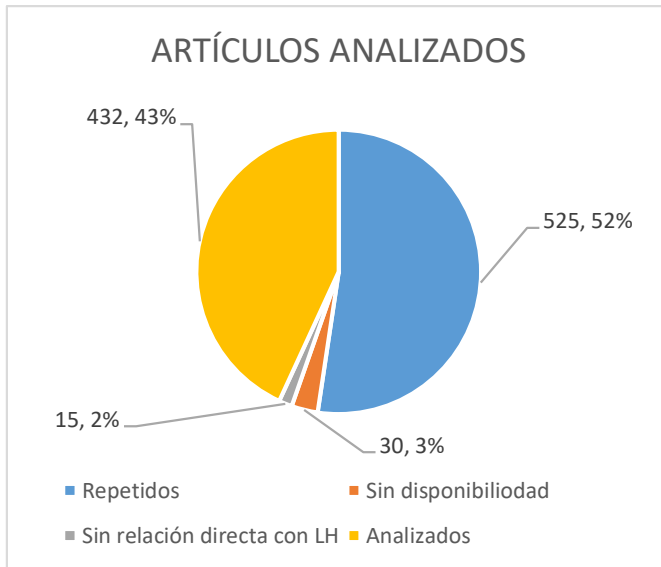


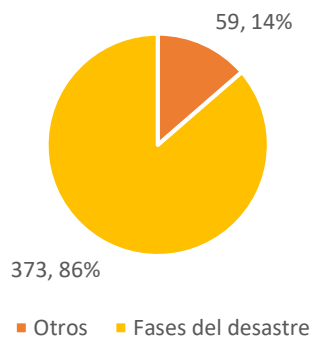
Tabla 2.1: Artículos analizados.

Artículos analizados	Número de artículos
Repetidos	525
Sin disponibilidad	30
Sin relación directa con LH	15
Analizados	432

Figura 2.1 Artículos analizados.

Fuente: elaboración propia con datos de Ceballos-Parra, Sarache y Gómez (2018).

CLASIFICACIÓN DE LOS ARTÍCULOS ANALIZADOS



ARTÍCULOS DE FASES DEL DESASTRE



Figura 2.2 Clasificación de los artículos revisados.

Fuente: Elaboración propia con datos de Ceballos-Parra, Sarache y Gómez (2018).

Tabla 2.2: Clasificación de artículos revisados.

Artículos analizados	Número de artículos	Fases del desastre	Número de artículos
Otros	59	Respuesta	214
Fases del desastre	373	Preparación	94
		Mitigación y recuperación	65

Fuente: elaboración propia con datos de Ceballos-Parra, Sarache y Gómez (2018).

De los 1002 documentos, relacionados con logística humanitaria analizados, solo 65 están dirigidos a la fase de recuperación.

2.1 Revisión de la literatura

En principio, la revisión de la literatura estuvo orientada a la búsqueda del ámbito multi agencia de LH y a las tareas de recuperación en la fase post desastre de un sismo. Sin embargo, después de detectar la importancia de evaluar el desempeño que los actores presentan en la ejecución de las actividades de mitigación, es necesario considerar algunos métodos que nos permitan realizar este análisis. Por tanto, fue conveniente redireccionar la búsqueda para identificar modelos que permitan evaluar el desempeño relativo de unidades productivas homogéneas.

2.2 Logística humanitaria

La LH surge como campo de estudio para combatir la ineficiencia de los diferentes actores en la fase de recuperación de un desastre. La LH se define como el proceso de planificación, implementación y control efectivo y eficiente de los flujos de materiales, productos e información en una cadena de suministro que permita mitigar las necesidades de los afectados en un siniestro (Ramírez, 2017).

Al hablar de logística, generalmente se asocia con el traslado de productos o suministros de un lugar a otro con el fin de ser utilizados por los consumidores que lo esperan, a pesar de este concepto empírico, la logística humanitaria y la logística comercial tienen múltiples diferencias. El principal objetivo de la logística privada es minimizar los costos logísticos (de transporte, almacenamiento, manejo de inventarios, de procesamiento de órdenes), sin sacrificar el servicio al cliente; por el contrario, el objetivo principal de la logística humanitaria es minimizar los costos sociales (el sufrimiento de la población) (LUA, 2015). La Tabla 2.3 muestra las diferencias encontradas entre las 2 logísticas.

Tabla 2.3: Diferencias entre logística y logística humanitaria.

Logística humanitaria	Logística comercial
Función objetivo: Reducir los costos sociales (el sufrimiento de la población).	Función objetivo: reducir los costos logísticos.
El sistema no es bien conocido, es dinámico, cambiante y se lleva a cabo en pocas ocasiones.	El sistema logístico suele ser estable y se trata normalmente de flujos de productos en grandes volúmenes y bastantes repetitivos.
Demanda con variaciones bruscas.	Demanda conocida o predecible.
Interacciones no muy bien estructuradas, realizadas por cientos o miles de decisores.	Los diversos actores logísticos suelen estar estructurados y bajo el control de los decisores del sistema logístico.

Fuente: LUA (2015).

2.3 Cadena de suministro humanitaria

La cadena de suministro humanitaria cuenta con características similares a las de suministro comercial de entre las cuales es posible identificar flujo de materiales, flujo financiero y flujo de información. Al igual que en una cadena de suministro comercial, el manejo de la información es primordial para una buena coordinación en la intervención de ayuda humanitaria, debido a que, dependiendo del grado de intensidad del desastre, se van incorporando ONGs y organismos del gobierno, lo cual genera una difícil coordinación, entre los diferentes actores, y aún más si cada uno de ellos cuenta con diferente información (LUA, 2015).

La iniciativa del Sistema de Gestión de Suministros Humanitarios (SUMA), ha colaborado a ampliar la capacidad regional de respuesta en casos de desastres, es un sistema de manejo de suministros que facilita la recepción, el inventario, la clasificación y la rápida distribución de equipos y suministros humanitarios clave (Organización Panamericana de la Salud, 1999).

2.4 DEA

Todos los procesos productivos (de servicios o bienes) utilizan recursos disponibles para transformar entradas en salidas con la finalidad de satisfacer la demanda del mercado (Restrepo & Villegas, 2013).

Algunas metodologías existentes permiten evaluar el desempeño. La metodología DEA es un método no paramétrico para la estimación de fronteras de producción y la evaluación de eficiencia de las DMUs. En este tipo de análisis se calcula la eficiencia relativa para cada DMU comparando sus entradas (input) contra sus salidas (output) respecto a todas las demás DMUs (Arieu, 2020).

El DEA tiene sus orígenes en la década de los 70's del siglo pasado, cuya base fue dada por Farrell (1957), siendo desarrollada por Charnes, Cooper, & Rhodes (1978).

Según Cooper et al (2006) referenciado por Restrepo & Villegas (2013), la investigación en DEA ha sido productiva, tanto en el ámbito académico como en el aplicado a problemas del mundo real, en la literatura disponible, se cuentan más de 2000 trabajos en diversas áreas, en la Tabla 2.4 se muestran algunos de los trabajos mencionado, los cuales están aplicados a casos de estudio y otros muestran como definir algunos de los parámetros. Por tanto, DEA se ha vuelto una de las áreas de la investigación de operaciones más aceptada, relevante y difundida en ámbitos tales como: medición del desempeño de instituciones educativas, análisis comparativo de procesos logísticos, comparación de sucursales de oficinas regionales de bancos, regulación de servicios públicos, medición de productividad investigativa y docente en departamentos académicos, estudios sectoriales, entre otras.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente se orienta al análisis comparativo de procesos logísticos, debido a que se trata de identificar aquellos centros educativos de nivel básico que se clasifiquen de mayor a menor eficiencia en las tareas de reconstrucción/rehabilitación.

Tabla 2.4: Artículos DEA relacionados con LH.

Autor	Título	Resumen
Üstün, A. K. (2016, Feb 01).	Evaluating İstanbul's disaster resilience capacity by data envelopment analysis.	<p>DEA permite identificar las actividades más eficientes tomando en cuenta el desempeño relativo, así como resaltar las ineficientes, de esta manera las DMUs pueden tomar acciones para mejorar su desempeño, tomando en cuenta la organización, recursos, procesos, etc. de las DMUs más eficientes y así estar mejor preparados para futuros desastres. Los principales propósitos del artículo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la capacidad de respuesta a desastres de Estambul y sus distritos. • Para determinar modelos a seguir (grupo de pares) de unidades ineficientes. • Mostrar cómo deshacerse de las deficiencias de las unidades ineficientes. • Ilustrar cómo utilizar eficazmente los recursos de gestión de desastres en una ciudad propensa a terremotos. • Determinar los niveles de prioridad de los distritos en términos de capacidad de resiliencia ante desastres.
Üstün, A. K., & Barbarosoğlu, G. (2015, Jan 01).	Performance evaluation of Turkish disaster relief management system in 1999 earthquakes using data envelopment analysis.	<p>Este estudio se centra en la aplicación de la DEA a la gestión de desastres y analiza específicamente la fase de respuesta durante los terremotos de 1999 en Marmara y Düzce. Los principales propósitos del artículo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar los conceptos y principios de DEA y desarrollar una estrategia de modelado de DEA que produzca modelos más precisos basados en la estructura de gestión de respuesta a desastres realizada para los terremotos de Marmara y Düzce.

		<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la eficiencia relativa de las organizaciones y unidades que componen el sistema de gestión de respuesta a desastres para las actividades realizadas tras los terremotos de Marmara y Düzce. • Determinar los valores objetivo de entradas y salidas para las unidades ineficientes del sistema. • Superar las limitaciones del modelo DEA ilimitado original utilizando el modelo acotado y explorar las diferencias entre los modelos DEA acotado y no acotado.
<p>Martín, J., & Román, C. (2001, 05).</p>	<p>An application of DEA to measure the efficiency of Spanish airports prior to privatization.</p>	<p>La elección de un modelo DEA depende de algunos supuestos con respecto al conjunto de datos que se utilizará y de algunos resultados anteriores sobre la industria que se estudiará. El conjunto de datos tiene que describir las actividades de las unidades de la mejor manera posible. Es especialmente importante tener alguna idea sobre los rendimientos hipotéticos a escala que existen en la industria. Este conocimiento va a determinar el retorno constante de la superficie de envolvente a escala CRS o el retorno variable a escala VRS del modelo.</p> <p>Hay tres orientaciones básicas: entrada, salida y salida/entrada. Una orientación de entrada se enfoca en la disminución proporcional del vector de entrada, la orientación de salida ajusta el aumento proporcional del vector de salida y la orientación de salida/entrada no discrimina la importancia del posible aumento de salida o disminución de la entrada.</p> <p>Las unidades implicadas en el estudio determinan la selección de la orientación, y es muy importante tener en cuenta cuáles son las posibilidades reales de los directivos. En la condición de estructura-conducta-resultado el investigador debe intentar establecer cuál es la conducta de los agentes y la estructura del mercado para determinar una posible orientación del modelo.</p>

<p>Fernández Santos, Y., & Flórez López, R. (2006).</p>	<p>Aplicación del modelo DEA en la gestión pública. Un análisis de la eficiencia de las capitales de provincia españolas.</p>	<p>El DEA es una herramienta adecuada para la evaluación comparativa de desempeño de las entidades que conforman el sector público, esto se debe a la facilidad que los inputs y los outputs son calculados para este tipo de entidades.</p>
---	---	--

Fuente: elaboración propia.

2.4.1 Definición de eficiencia

Del trabajo de Farrell (1957), quien proporciona una “medida satisfactoria de eficiencia productiva” que considera todos los Inputs (recursos empleados), surge como una extensión a éste la metodología DEA.

Eficiencia técnica

Tal como lo explica Coll Serrano & Blasco Blasco (2006), considerando cuatro DMUs (A, B, C y D) cada una de las cuales genera un único Output (y) a partir dos Inputs (x_1 y x_2). Gráficamente cada punto (\bullet) representa las coordenadas del cociente de los inputs entre el único output (x_1/y , x_2/y) observado para cada una de las referidas DMUs. En la Figura 2.3 observamos que la isocuanta unidad de las DMUs está dada por la curva II' , tal que las DMUs que se encuentran por encima de la misma resultan ineficientes.

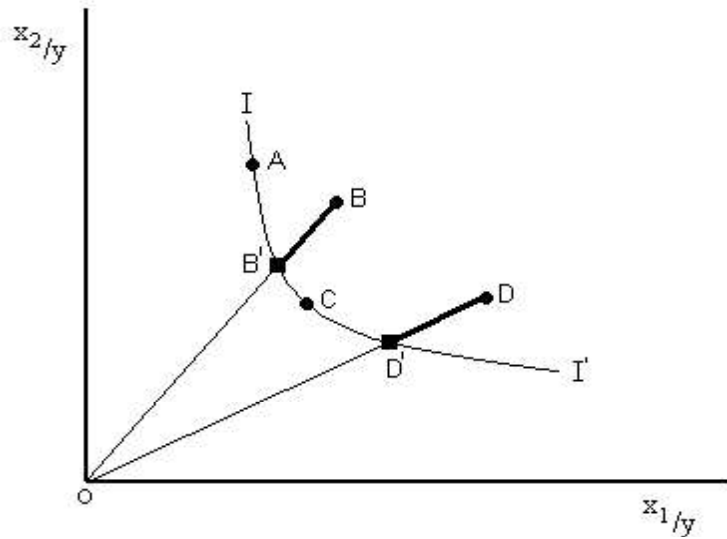


Figura 2.3 Isocuanta eficiente.

Fuente: Coll Serrano & Blasco Blasco (2006).

Por tanto, para la eficiencia técnica de B, expresión 2.1, se tiene:

$$\text{Eficiencia Técnica de B} = ET_B = \frac{OB'}{OB} \quad 2.1$$

Con base en la manera de definir la eficiencia técnica, ésta solo puede tomar valores entre 0 y 1. Si la DMU evaluada tiende a 0, significa que se encuentra más alejada de la isocuanta eficiente y, por tanto, es una unidad deficiente. En contraste, las DMUs con eficiencias técnicas cercanas a la unidad tienden a la isocuanta eficiente.

Una isocuanta muestra las combinaciones de K (cantidad de capital) y L (trabajo) que producen una determinada cantidad de un bien o servicio. Matemáticamente, una isocuanta está dada por:

$$f(K, L) = q_0 \quad 2.2$$

La forma de una isocuanta dependerá del tipo de bien o servicio que estamos analizando. La forma de la isocuanta también está relacionada con los términos relación marginal de sustitución técnica (RMST) y los rendimientos a escala (Policonomics, 2020).

Eficiencia precio (o asignativa)

La eficiencia precio (asignativa) se define como, la capacidad de la DMU para emplear los distintos Inputs en proporciones óptimas, dados sus precios relativos. En la Figura 2.4, la línea de isocosto está dada por PP'. La pendiente de la recta de isocosto representa la relación entre los precios de los Inputs x_1 y x_2 .

A y C presentan eficiencia técnica pero solo C presenta eficiencia técnica y de precios.

La eficiencia precio (o asignativa) está dada por la relación entre el radio vector que va desde el origen hasta el punto proyectado sobre la línea de isocostos eficiente de la DMU considerada y la longitud del segmento de recta que parte del origen hasta el punto localizado sobre la isocuanta eficiente de la DMU evaluada. Así, para la DMU A la eficiencia precio puede escribirse, expresión 2.3, como:

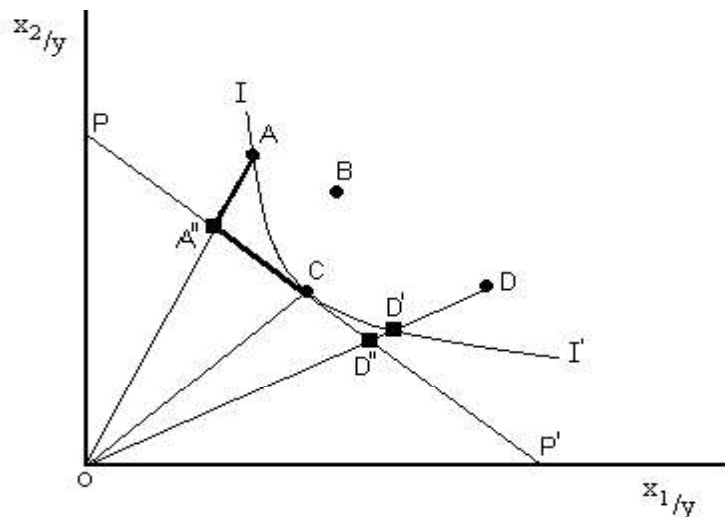


Figura 2.4 Isocuanta eficiente.

Fuente: Coll Serrano & Blasco Blasco (2006).

$$\text{Eficiencia Precio} = EP_A = \frac{OA''}{OA} \quad 2.3$$

En la Figura 2.5, obtenida de Coll Serrano & Blasco Blasco (2006), las DMU B y C presentan eficiencia técnica puesto que ambas se encuentran en la frontera de eficiencia, mientras que, claramente, la A es ineficiente al operar por debajo de ésta. Por otro lado, la productividad de una DMU, entendida como producto medio (productividad media de un factor), se puede calcular como la pendiente de la recta que parte del origen y concluye en el punto por el cual está representado.

Por tanto, una DMU puede ser técnicamente eficiente pero aún podría mejorar su productividad al explotar economías de escala.

2.4.2 Tecnología y eficiencia

Como se ha mencionado, al realizar las comparaciones de las combinaciones de inputs-outputs de las diferentes DMUs, de manera implícita hacemos válido el supuesto de que podemos escalar hacia arriba o hacia abajo los inputs y los outputs de una manera arbitraria; es decir, asumimos rendimientos constantes a escala, en la Figura 2.6 se puede observar esto.

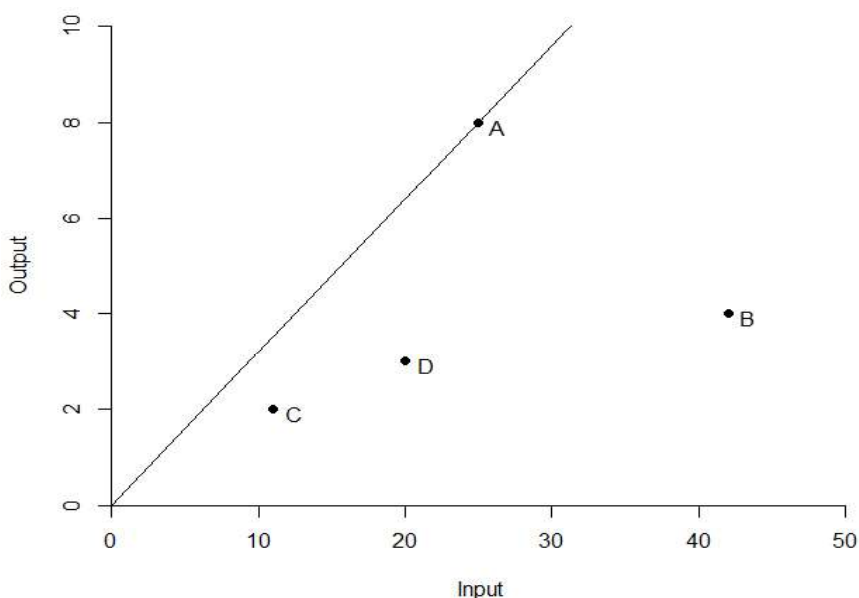


Figura 2.6 Comparación de combinaciones para distintas DMUs.

Fuente: elaboración propia a partir de Bogetoft & Otto (2011).

Ahora buscaremos una definición de eficiencia E con la misma interpretación que hasta el momento le hemos dado, pero sin el supuesto antes mencionado.

Tomaremos la definición de eficiencia de input como una combinación de entrada-salida (x, y) , como el factor E más pequeño con el cual al multiplicar el input x por el factor E aun pueda producir el output y , es decir:

$$E(x, y) = \min \{e/ \text{ex puede producir } y\}$$

Otra manera de ver a E es con la posibilidad de que al multiplicar $(1-E)x$ de un input, todavía pueda ser capaz de producir la misma output y .

Es necesario saber sobre la tecnología (Bogetoft & Otto, 2011), para poder determinar si puede o no un input x producir un output y . Por tal motivo, es necesario introducir el concepto de *conjunto de tecnología*.

El *conjunto tecnológico* T , es el conjunto de combinaciones de input y output tal que el input pueda realmente producir el output, es decir:

$$T = \{(x, y)/x \text{ puede producir } y\}.$$

Uno de los principales inconvenientes en la evaluación comparativa (benchmarking) es estimar cómo se ve el conjunto de tecnología inicial con algunas observaciones reales de input y output de varias DMUs. Si el conjunto tecnológico inicial no presenta ruido en los datos, se considera como el mínimo que contiene todas las combinaciones de las observaciones, lo cual indica que lo que se ha producido es factible de producir. Sin embargo, esta tecnología no es factible de utilizar en análisis futuros, esto se debe a que cada nueva observación podría generar un nuevo punto o elemento fuera del conjunto tecnológico y de esta manera lo modificaría. Por lo tanto, no resulta conveniente hacer mucho en términos de modelar la tecnología. Queremos un conjunto de tecnología derivado de las observaciones

de tal manera que no toda nueva observación nos lleve a expandirlo. Para cumplir con esto, haremos supuestos sobre el conjunto de tecnología.

Libre disponibilidad (*Free disposability*): este supuesto consiste en que si una combinación de input-output es una producción factible en la cual el input es el mayor de todos los posibles inputs y el output es el menor posible, entonces cualquier otro punto del conjunto tecnológico es factible para producir sin modificar a este último, tal como se presenta en la Figura 2.7 considerando 6 observaciones.

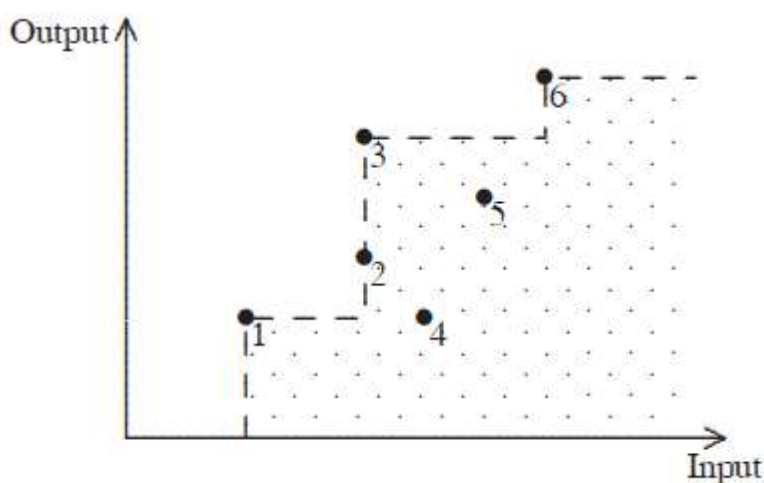


Figura 2.7 Combinaciones de entrada-salida y supuesto de free disposability.

Fuente: Bogetoft & Otto (2011).

Convexidad: si 2 combinaciones distintas de input-output son producciones factibles, entonces cualquier mezcla de las 2 combinaciones también es una producción factible. A esta combinación se le conoce como el *supuesto de convexidad*, es decir el conjunto es un conjunto convexo. Si se consideran las 6 observaciones del punto anterior y además los supuestos de libre disponibilidad y de convexidad, entonces el conjunto tecnológico se vería como se muestra en la Figura 2.8

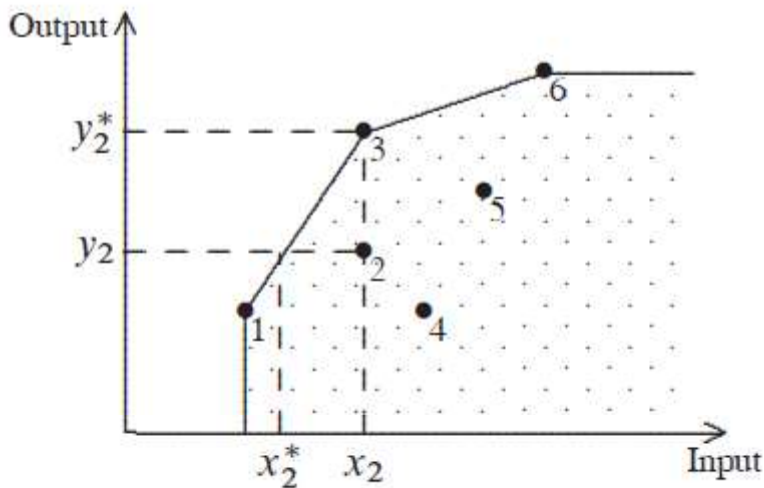


Figura 2.8 Combinaciones de entrada-salida, free disposability y convexidad.

Fuente: Bogetoft & Otto (2011).

Cuando analizamos los indicadores claves de desempeño (Key Performance Indicator, KPI), se compara una DMU con la mejor DMU. Por otra parte, con un conjunto tecnológico estimado, comparamos una DMU con lo que es factible producir dado ese conjunto tecnológico, es decir, compararemos la DMU con la frontera de eficiencia.

En la figura 2.8, podemos observar que la frontera de eficiencia está conformada por las DMUs 1, 3 y 6 y, por tanto, podemos comparar cualquier combinación de input-output dentro del conjunto tecnológico con una combinación convexa de esas DMUs.

Pongamos como ejemplo la DMU representada con el número 2. Podemos observar claramente que es un punto que pertenece a la tecnología estimada y que es posible producir el output y_2 con solo una fracción del input x_2 , es decir, con x_2^* . Por tanto, la eficiencia E para la DMU 2 es:

$$E = \frac{x_2^*}{x_2} \quad 2.6$$

De lo cual se tiene que:

$$x_2^* = Ex_2 \quad 2.7$$

Cuando realizamos la comparación de la DMU 2 con la frontera de eficiencia, en realidad lo que estamos haciendo es una comparación con una combinación convexa de las DMUs 1 y

3. Nótese que ahora se tiene una definición de eficiencia similar a la eficiencia técnica, pero sin el supuesto de rendimientos constantes a escala.

Un análisis similar ocurre para calcular la eficiencia de output, del cual obtenemos que:

$$F = \frac{y_2^*}{y_2} \quad 2.8$$

De lo cual se tiene que:

$$y_2^* = Fy_2 \quad 2.9$$

2.4.3 Modelos DEA

CCR-DEA en forma fraccional

En DEA, la eficiencia técnica (relativa) de cada una de las DMUs, se define como el cociente entre la suma ponderada de los Outputs y la suma ponderada de los Inputs (Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006).

Por lo tanto, el modelo CCR está dado por:

$$\text{Max}_{u,v} h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}}$$

Sujeto a

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1$$

$$u_r, v_i \geq 0$$

Donde:

1. Se consideran j DMUs (j=1,2, ..., n).
2. X_{ij} ($X_{ij} \geq 0$) cantidad de Input i (i=1, 2, ..., m) consumidos por la j-ésima DMU.
3. X_{i0} cantidad de Input i consumido por la DMU que es evaluada.
4. Y_{rj} ($Y_{rj} \geq 0$) cantidad r de Output (r=1, 2, ..., s) producidos por la j-ésima DMU.
5. Y_{r0} cantidad de Output obtenido por la DMU que es evaluada, DMU.

6. U_r ($r = 1, 2, \dots, s$) y V_i ($i = 1, 2, \dots, m$) pesos (o multiplicadores) de los Outputs e Inputs respectivamente.

En cuanto u^* y v^* deben considerarse que éstos discrepan entre DMU, debido a que el modelo debe ser resuelto para cada una de las n DMU.

El inconveniente de este modelo es que si (u^*, v^*) es solución factible entonces (Bu^*, Bv^*) representa un conjunto infinito de soluciones factibles, donde B es un escalar no negativo (Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006).

Otro inconveniente, tal vez el más importante, es que el modelo CCR solo considera rendimientos a escala constante y como es mencionado en Toloo (2012) esto es muy poco probable que suceda en la realidad.

Por lo tanto, Toloo (2012) propone los siguientes modelos para considerar rendimientos a escala variables:

Modelo 1

$$M^* = \min M$$

Sujeto a

$$M - d_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - u_0 - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j - \beta_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n d_j = n - 1$$

$$0 \leq \beta_j \leq 1, \quad d_j \in \{0, 1\} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

M, u_0 irrestrictas

$$v_i \geq \varepsilon^* \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad u_r \geq \varepsilon^* \quad r = 1, 2, \dots, s$$

Donde:

1. Se consideran j DMUs ($j=1, 2, \dots, n$).
2. X_{ij} ($X_{ij} \geq 0$) cantidad de Input i ($i=1, 2, \dots, m$) consumidos por DMU $_j$.
3. X_{i0} cantidad de Input i consumido por la DMU $_0$.
4. Y_{rj} ($Y_{rj} \geq 0$) cantidad r de Output ($r = 1, 2, \dots, s$) producidos por DMU $_j$.
5. Y_{r0} cantidad de Output obtenido por la DMU $_0$.
6. U_r ($r = 1, 2, \dots, s$) y V_i ($i = 1, 2, \dots, m$) pesos (o multiplicadores) de los Outputs e Inputs.
7. β_j variable binaria
8. d_j como variable binaria, representa la variable de desviación de la DMU $_j$.
9. ε^* valor infinitesimal no arquimediano para evitar que los pesos sean iguales a cero.

Para asegurar que haya al menos una DMU eficiente, basado en la definición de eficiencia de BCC (Banker, Charnes y Cooper, 1984) en la literatura de la DEA (Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006), DMU $_j$ es una DMU eficiente de BCC, si y solo si existe al menos un conjunto común de pesos óptimos $u^* > 0$ y $v^* > 0$ tal que $u^*y_j - u^*x_j - v^*x_j = 0$. Considerando las restricciones del modelo 1, DMU $_j$ será eficiente si y solo si $d^*_j - \beta^*_j = 0$ y, por lo tanto, $d^*_j - \beta^*_j$ es la desviación de DMU $_j$.

Bajo esta premisa tendríamos que suponer que d_j es la desviación para que exista una única DMU más eficiente, lo cual es falso debido a que una variable binaria no puede considerarse como la desviación de la eficiencia (Toloo, 2012), y este es el principal inconveniente del modelo (1). Por lo tanto, fue propuesto un nuevo modelo, denominado modelo 2.

Modelo 2

Toloo (2012) propone el siguiente modelo de LP integrado básico para encontrar DMUs candidatas a ser la mejor unidad eficiente en BCC:

$$Z_2^* = \min d_{max}$$

Sujeto a

$$d_{max} - d_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - u_0 - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$d_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$v_i \geq \varepsilon^* \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$u_r \geq \varepsilon^* \quad i = 1, 2, \dots, s$$

En donde la ε^* se puede calcular con la expresión siguiente:

$$\varepsilon^* = \frac{1}{\max \{ \sum_{i=1}^m x_{ij} : j=1, 2, \dots, n \}} \quad 2.10$$

En donde m representan las entradas, las X_{ij} representan las m variables; y con base en ellas, se puede calcular el valor óptimo de épsilon (ε^*).

Y las demás variables y parámetros son los mismos del modelo 1.

Sin embargo, el modelo (2) no encuentra una sola DMU, sino que nos da un conjunto de candidatas a ser la mejor DMU eficiente en BCC. Definiendo las restricciones adecuadas al modelo (2), podría encontrar solo una DMU eficiente en BCC.

Debido a que en el modelo (2), no sólo se encuentra una DMU eficiente, Toloo propuso el siguiente nuevo modelo integrado MIP-DEA para determinar la unidad más eficiente:

Modelo 3

$$Z_3^* = \min d_{max}$$

Sujeto a

$$d_{max} - d_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - u_0 - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + d_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n \theta_j = n - 1$$

$$d_j \leq M\theta_j \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\theta_j \leq Nd_j \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$d_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\theta_j \in \{0, 1\} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$v_i \geq \varepsilon^* \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$u_r \geq \varepsilon^* \quad i = 1, 2, \dots, s$$

Donde:

M y N son números suficientemente grandes. De hecho, M se sugiere que sea cualquier número entero positivo que sea mayor o igual que la solución óptima del modelo 2.

$$d_j = \begin{cases} 0 & \text{si } \theta_j = 0 \\ > 0 & \text{si } \theta_j = 1 \end{cases}$$

El resto de las variables y parámetros son los mismos del modelo 1.

2.5 Método Bootstrap

Existen datos para los cuales resulta difícil o imposible estimar distribuciones de algunas estadísticas, cuando el tamaño de muestra es pequeño o cuando su análisis analítico no es viable. Para cuando se presenta este caso, Efron (1979), introduce la metodología Bootstrap. Según Efron & Tibshirani (1994), Bootstrap, como Jackknife (Álvarez 2000), son métodos que utilizan el remuestreo para inferir la distribución muestral del estadístico o sus propiedades. Bootstrap parte del principio de sustitución y la aproximación numérica. Sea F la función de distribución de una variable poblacional X para estudiar alguna variable aleatoria de interés $R = R(X, F)$, de donde obtenemos una muestra aleatoria $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$. Del principio de sustitución se puede obtener un estadístico con la misma forma funcional, pero bajo el supuesto que la muestra aleatoria funciona como una nueva población y la distribución de probabilidad F , que es desconocida, será reemplazada por la función de distribución empírica estimada con base en la muestra, es decir, ahora el estadístico será $\hat{R} = (\vec{X}, F_n)$.

De lo antes descrito (distribución empírica de la muestra) es posible calcular artificialmente un conjunto de muestras \vec{X}^* de observaciones independientes e idénticamente distribuidas de tamaño m (que no necesariamente coinciden con el tamaño inicial). Por tanto, cada réplica Bootstrap \vec{X}^* está conformada, en parte, con algunos valores de la muestra original, los cuales han sido extraídos equiprobablemente del muestreo con reemplazo.

De acuerdo con Bogetoft & Otto (2011) Bootstrap es un método general basado en computadora para calcular la precisión de estimaciones estadísticas. La idea básica del Bootstrap es obtener muestras a partir de observaciones con reemplazo de un conjunto de datos y, por tanto, obtener un nuevo conjunto aleatorio de datos del mismo tamaño que el original. Partiendo de este conjunto de datos, se pueden calcular las estadísticas de interés, llamadas réplicas. El proceso se repite hasta crear una muestra de réplicas. Con base en esta muestra, se pueden obtener conclusiones sobre la distribución de los datos en los cuales se tiene interés.

En general el *algoritmo de Bootstrap* puede describirse como:

1. Seleccione B muestras independientes de Bootstrap x^1, x^2, \dots, x^B , es decir, obtener una muestra con remplazo sacada de su conjunto de datos.
2. Calcular la estimación para cada muestra Bootstrap:
$$t(x^b) \quad (b = 1, \dots, B)$$
3. Estimar el error estándar utilizando el error estándar muestral de las B réplicas.

$$\hat{S}_B = \sqrt{\frac{1}{B-1} \sum_{b=1}^B (t(x^b) - \bar{t})^2} \quad 2.11$$

Donde:

$$\bar{t} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B t(x^b) \quad 2.12$$

La idea del método Bootstrap es que si la distribución empírica x^b corresponde a la distribución real x , entonces la distribución empírica de $t(x^b)$ corresponderá a la distribución real $t(x)$. esto significa que se puede utilizar la distribución empírica $t(x^b)$ sin conocer la distribución real $t(x)$. Por tanto, cuando sea de interés la varianza de la mediana, $t(x)$, la cual es difícil o imposible de calcular, simplemente se utiliza la varianza de la mediana empírica de Bootstrap.

2.5.1 Pruebas estadísticas utilizando Bootstrap

Para probar si el conjunto tecnológico T , del cual se obtienen las observaciones, exhibe rendimientos constantes a escala (Constant Returns to Scale, CRS), es necesario utilizar una prueba de hipótesis.

Formalmente se probará la hipótesis nula (H_0) que el conjunto tecnológico T presenta rendimientos constantes a escala, frente a la hipótesis alternativa (H_1) que es de rendimientos variables a escala (Variable Returns to Scale, VRS) (Bogetoft & Otto, 2011).

$H_0: T \text{ es CRS}$

$H_1: T \text{ es VRS}$

Si la hipótesis nula es verdadera, entonces las eficiencias calculadas de la tecnología VRS son las mismas que las calculadas de la tecnología CRS. Por el contrario, si la hipótesis nula es falsa, entonces al menos una de las eficiencias será diferente, es decir la eficiencia de CRS será menor que la de VRS. De acuerdo con Bogetoft & Otto (2011), una manera para examinar esto es observar si la eficiencia de escala (SE) es igual a 1 para todas las DMUs, lo cual significa que la tecnología es CRS, pero si al menos una DMU es menor que 1, entonces significa que el conjunto tecnológico es VRS. Para un conjunto dado de K DMUs, se debe rechazar la hipótesis nula si al menos una de las SE estimadas tiene un valor menor que 1.

$$SE^k = \frac{E_{CRS}^k}{E_{VRS}^k} \quad (k = 1, \dots, K) \quad 2.13$$

En lugar de considerar de manera individual las eficiencias de escala, podría ser analizado el siguiente estadístico de prueba:

$$S = \frac{\sum_{k=1}^K E_{CRS}^k}{\sum_{k=1}^K E_{VRS}^k} \quad 2.14$$

Sin embargo, como la relación entre la tecnología y las eficiencias de escala es una incógnita debemos rechazar la hipótesis nula si al menos una SE presenta un valor significativamente menor que 1, es decir si una de las SE estimadas es menor que un valor crítico. El problema de esta prueba es calcular este valor crítico.

Si la hipótesis nula es verdadera, entonces S aun será cercana a 1, pero si H_1 es verdadera entonces $S < 1$. Por tanto se debe buscar ese valor crítico para el estadístico S ; si es más pequeño que este valor, entonces rechazamos H_0 . Por tanto se busca un valor crítico c_α , que determine si rechazamos la hipótesis nula si $S < c_\alpha$ y $\Pr(S < c_\alpha \text{ bajo } H_0) = \alpha$ donde α es el tamaño de la prueba, normalmente al 5%, es decir $\alpha = 0.05$, lo cual representa la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera.

Desafortunadamente, la distribución de S bajo H_0 es desconocida y, por tanto, no es posible calcular de manera directa el valor de c_α . Una manera de resolver el problema producido por la ausencia de la distribución de probabilidad del estadístico de prueba bajo la hipótesis nula (H_0), es generar una distribución empírica a través de un método Bootstrap.

2.6 Pruebas no paramétricas

Las pruebas no paramétricas, también conocidas como de distribución libre (distribution free), son aquellas que no asumen, para los datos, una distribución de probabilidad. En la mayoría de los casos, los resultados estadísticos se basan en el ordenamiento, recuento, remuestreo, etc. Por tanto, son fáciles de comprender.

Cuando desconocemos la distribución de los datos y además el número de observaciones es pequeño ($n < 30$), entonces es válido no aceptar los supuestos de normalidad y utilizar pruebas no paramétricas. Para más detalle consulte (Conover, 1999) y (scientific european federation osteopaths, 2021).

2.6.1 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Existen diferentes pruebas para determinar si existen diferencia entre el rango promedio de 2 muestras, una de ellas es la de Wilcoxon, la cual es una prueba no paramétrica que se utiliza como alternativa a la prueba t de Student, cuando no es válido el supuesto de normalidad en las muestras observadas (scientific european federation osteopaths, 2021). La prueba de rangos con signo de Wilcoxon es una prueba no paramétrica de 2 muestras relacionadas, por esta razón no es necesaria una distribución de probabilidad. Se utiliza cuando la variable subyacente es continua, pero se desconoce la distribución de probabilidad.

El objetivo de la prueba es determinar si los valores de n pares de observaciones (x_i, y_i) son o no iguales, es decir, probar la hipótesis nula H_0 de que los valores no presentan evidencia estadística para determinar que son diferentes contra la hipótesis alternativa H_1 , que sí lo son.

2.6.2 Prueba de Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis, de acuerdo con Joaquín Amat Rodrigo (2016), es la alternativa no paramétrica de la prueba ANOVA. Es una extensión de la prueba Wilcoxon para 3 o más grupos de observaciones.

Debido a su condición de prueba no paramétrica, Kruskal-Wallis no asume normalidad en los datos. Por tanto, se trata de una prueba que utiliza rangos para probar la hipótesis nula H_0 de que k muestras han sido obtenidas de una misma población, contra la hipótesis alternativa H_1 de que la localización de al menos dos distribuciones difiere.

H_0 : Todas las muestras provienen de la misma población (distribución)

H_1 : Al menos una muestra proviene de una población con una distribución distinta

Consideremos k muestras cada una con n observaciones. Si todas las observaciones son ordenadas de menor a mayor y se le asigna a cada una de ellas su rango, cuando se calcule la suma de rangos para cada una de los k muestras (R_i) es válido suponer que, bajo la premisa de la hipótesis nula, todos los grupos presenten valores similares. La estadística de prueba H está dado por:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad 2.15$$

Donde:

k : Número de muestras

n_i : Puntaje de la muestra i

N : Puntaje más alto de los i puntajes

R_i : Suma de los rangos para la muestra i

Condiciones

- Las muestras comparadas no necesariamente provienen de una distribución normal.
- Las muestras son aleatorias e independientes entre sí.

- Homocedasticidad: dado que la hipótesis nula trabaja bajo el supuesto de que de una única población son obtenidos todos los grupos y que, por tanto, tienen las mismas medianas, resulta imprescindible que todos los grupos tengan la misma dispersión.
- Misma distribución para todos los grupos: la distribución de las muestras no tiene que ser alguna en específico, pero si igual en todas.

2.7 KPI's

Los KPI's, son herramientas que proveen datos cuantitativos a través de los cuales se puede evaluar el desempeño general de un proyecto, programa o institución en pos de la población u objeto de su intervención, basado en sus objetivos estratégicos y su misión. Los KPI's establecen una relación entre dos o más variables, que, al ser contrastados con periodos anteriores, productos similares o metas concretas, permiten determinar los logros y avances de las instituciones y/o programas (DIRECCIÓN GENERAL DEL PRESUPUESTO PÚBLICO,lima, 2010). Con base en lo antes expuesto el KPI que será considerado, es el costo de reconstrucción/rehabilitación por alumno beneficiado.

2.8 Introducción a la programación con RStudio

El software R, de acuerdo con Bell (2020), es un lenguaje de programación así como un entorno utilizado en el análisis de datos, en la estadística computacional y en la investigación científica. R se encuentra entre los mejores lenguajes de programación para investigaciones, análisis de datos, estadística, etc. La utilización de R sirve para recuperar, limpiar, analizar, visualizar y presentar datos. Algunas razones tras el creciente uso de R son que cuenta con una interfaz amigable para el usuario y una sintaxis más expresiva.

En R se interpreta en lugar de compilar. Esto significa que R tiene interprete. R es un software de distribución libre bajo la General Public License (GPL) y está disponible para diversos sistemas operativos, entre los cuales se encuentra, Windows. Fue desarrollado por Ross Ihaka y Robert Gentleman en la en la universidad de Auckland en Nueva Zelanda en el año 1993.

Una vez que se ha elegido R como herramienta de trabajo se procede a realizar la descarga del software, lo cual se puede realizar en el siguiente URL:

<https://cran.r-project.org/bin/windows/base/> . En donde se debe seleccionar el archivo que corresponda al sistema operativo con el que el usuario cuenta.

Una vez que ha sido instalado R en el sistema, es posible que sea necesario instalar packages para realizar tareas específicas (por ejemplo y para nuestro caso Benchmarking) que cada usuario requiera.

La instalación de los packages puede realizarse desde la consola con el siguiente comando: `install.packages("name_packages")`. Por ejemplo, `install.packages("Benchmarking")`. El package puede ser instalado y agregado a tu entorno personalizado de trabajo.

R script file

Para desarrollar un proyecto es recomendable utilizar un R script file, en el que se puede escribir código R y ejecutarlo. El nombre del script deberá terminar con una extensión, `.r`, lo que significa que es un archivo de R. Para crear el script únicamente se da clic en el ícono File ubicado en la esquina superior izquierda de la consola y seleccionar New script, como se muestra en la Figura 2.9.

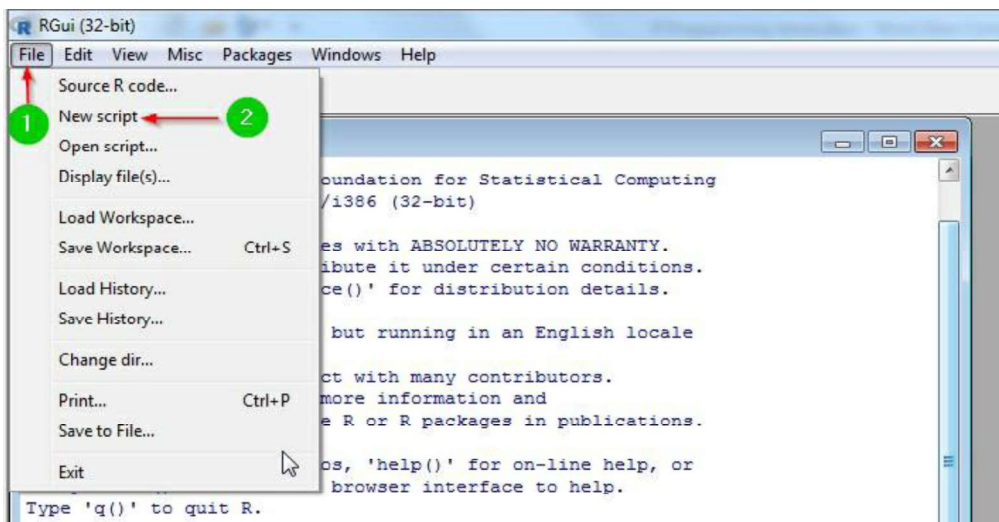


Figura 2.9. Creación de script file.

Fuente: Bell (2020).

R es una excelente opción para estadística y análisis de datos. Basta con instalar los packages necesarios en nuestra computadora para poder escribir y correr los códigos de R, estos códigos de R pueden ser ejecutados desde la consola o creando un script y ejecutarlos desde allí.

Otra herramienta muy útil es el complemento RStudio, el cual es una interfaz más amistosa con el usuario. Se puede obtener en el siguiente enlace:

<https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/> .

Las funciones anteriormente descritas son las mismas, pero en un entorno más fácil de utilizar por el usuario. A continuación, se proporcionan algunos códigos básicos ejecutables en RStudio.

Para importar una base de datos a RStudio se puede realizar de la siguiente manera:

```
primaria=read.table(file="./costos-primaria.txt",header=TRUE,sep="\t");  
names(primaria);  
attach(primaria);
```

Para poder identificar e iniciar un análisis de datos, se puede renombrar a las variables de la siguiente manera:

```
status=factor(estatus_reconstruccion,labels=c("in progress","finished"));  
damage=factor(tipo_dano,labels=c("minor","partial","total"));  
muni=factor(municipio,labels=c("Alvaro Obregon","Azcapotzalco","Benito  
Juarez","Coyoacan","Cuajimalpa","Cuauhtemoc","Gustavo A.  
Madero","Iztacalco","Iztapalapa","Magadela Contreras","Miguel Hidalgo","Milpa  
Alta","Tlahuac","Tlalpan","Venustiano Carranza","Xochimilco"));
```

Para ilustrar el uso de packages en tareas específicas se muestra un comando para utilizar DEA-CRS y DEA-VRS, y utilizando las siguientes líneas de código es posible ejecutar ese análisis.

```
###CRS  
library(Benchmarking)  
dea.crs<-dea(Costo.3,X3_alumnos,RTS="crs");  
eff.crs<-dea.crs$eff;  
#####VRS  
library(Benchmarking)  
dea.crs<-dea(Costo.3,X3_alumnos,RTS="vrs");  
eff.crs<-dea.crs$eff;
```

Lo anterior ha mostrado una breve introducción al entorno de RStudio y su programación. Sin embargo, se puede consultar Bell (2020) y Bogetoft & Otto (2011) para tener un mejor conocimiento del uso del software.

Hasta aquí se ha revisado la literatura que es elemental para el desarrollo y aplicación de la metodología, propuesta en este trabajo, la cual permitirá alcanzar tanto objetivo el general como los particulares. En el siguiente capítulo será aplicada la teoría aquí presentada.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA METODOLÓGICA Y APLICACIÓN.

En el siguiente apartado se desarrolla y aplica la metodología a través de la cual se espera obtener como resultado la clasificación de las alcaldías con un mejor desempeño en las actividades de reconstrucción/rehabilitación, para que se puedan identificar las unidades más eficientes y por ende identificar los actores y métodos que permiten una ejecución con una mejor eficiencia, de las tareas post desastre. Para lograrlo es necesario definir la secuencia de pasos a seguir, mostrada en la figura 3.1.

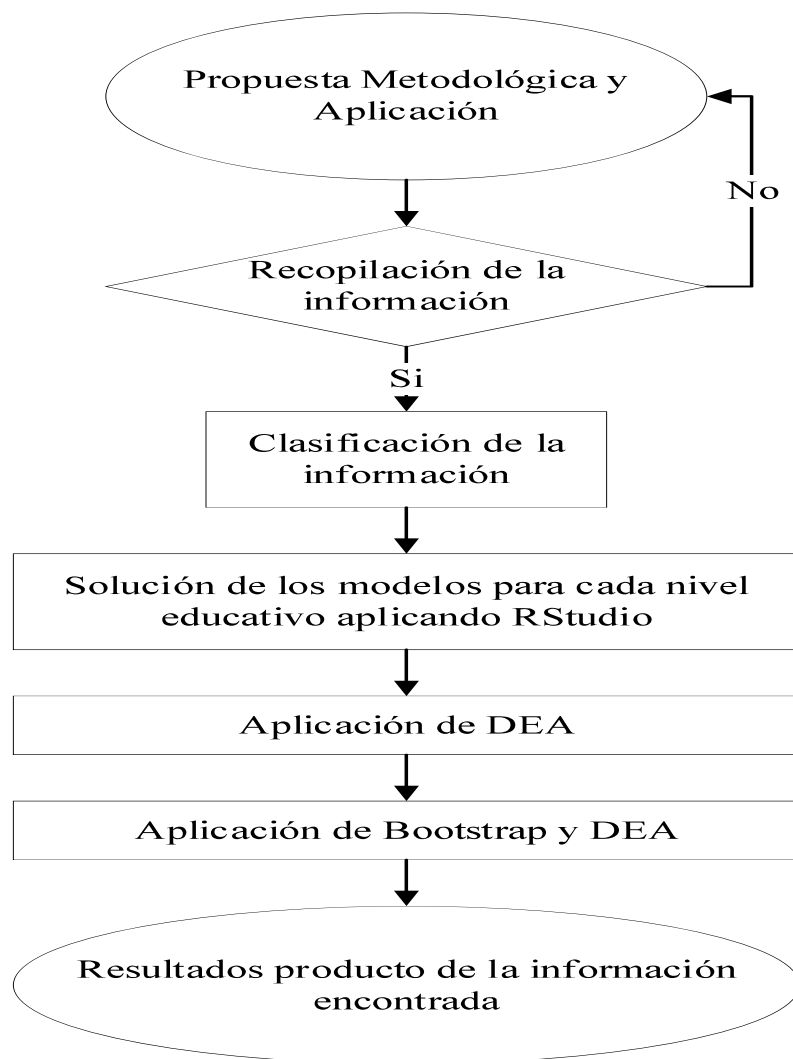


Figura 3.1 Propuesta metodológica y aplicación.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que todos los cálculos realizados, tanto de modelos DEA como de las pruebas no paramétricas, son realizados con el soporte del software RStudio.

3.1 Recopilación de datos

Como ya ha sido mencionado, todos los procesos productivos (de servicios o bienes) utilizan recursos disponibles para transformar entradas en salidas con la finalidad de satisfacer la demanda del mercado (Restrepo & Villegas, 2013), que para nuestro caso en específico resultan ser, los montos asignados y la matrícula de alumnos beneficiada, respectivamente.

De la base de datos obtenida de mejora tu escuela [escuela.org](http://reconstruccion.mejoratuescuela.org) <http://reconstruccion.mejoratuescuela.org>, la cual está conformada por la totalidad de escuelas de todos los niveles, públicas y privadas del país, únicamente se consideran los datos de nivel básico del sector público en la CDMX. El tamaño de la muestra es de 505, 742 y 296 observaciones para cada nivel (kínder, primaria y secundaria) respectivamente.

El conjunto de datos recabados, al que se hace referencia, se encuentra en el enlace antes mencionado, donde se encuentra el sitio web con la información detallada. En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se puede observar un resumen de esta información.

Tabla 3.1: Resumen de datos para escuelas de nivel kínder.

Alcaldía	KINDER						
	Total de escuelas	Concluidas			En rehabilitación		
		menor	parcial	total	menor	parcial	total
Álvaro Obregón	52	22	5	0	8	17	0
Azcapotzalco	34	11	11	0	5	7	0
Benito Juárez	14	7	2	0	2	3	0
Coyoacán	41	16	8	0	6	11	0
Cuajimalpa	15	3	5	0	2	5	0
Cuauhtémoc	28	13	6	0	3	6	0
Gustavo A. Madero	80	40	13	0	11	16	0
Iztacalco	18	8	5	0	3	2	0
Iztapalapa	139	77	15	1	12	34	0
Magdalena Contreras	12	7	1	0	2	2	0
Miguel Hidalgo	17	11	3	0	2	1	0
Milpa Alta	7	5	0	0	2	0	0
Tláhuac	40	7	11	1	12	9	0
Tlalpan	32	19	10	0	2	1	0
Venustiano Carranza	31	15	5	0	8	3	0
Xochimilco	25	7	7	0	2	9	0
Total general	585	268	107	2	82	126	0

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

Tabla 3.2: Resumen de datos para escuelas de nivel primaria.

Alcaldía	PRIMARIA						
	Total de escuelas	Concluidas			En rehabilitación		
		menor	parcial	total	menor	parcial	total
Álvaro Obregón	45	21	7	0	9	7	1
Azcapotzalco	38	20	3	0	5	10	0
Benito Juárez	25	10	3	0	3	9	0
Coyoacán	47	23	2	0	9	13	0
Cuajimalpa	11	6	0	0	4	1	0
Cuauhtémoc	71	22	15	0	16	17	1
Gustavo A. Madero	121	52	8	1	13	47	0
Iztacalco	27	15	1	0	2	9	0
Iztapalapa	225	115	27	0	8	75	0
Magdalena Contreras	18	4	3	0	3	8	0
Miguel Hidalgo	28	16	7	0	0	5	0
Milpa Alta	11	7	1	0	2	1	0
Tláhuac	31	6	7	0	4	14	0
Tlalpan	26	13	4	0	1	8	0
Venustiano Carranza	51	25	9	0	5	12	0
Xochimilco	31	11	5	0	3	12	0
Total general	806	366	102	1	87	248	2

Fuente: Elaboración propia con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

Tabla 3.3: Resumen de datos para escuelas de nivel secundaria.

Alcaldía	Secundaria						
	Total de escuelas	Concluidas			En rehabilitación		
		menor	parcial	total	menor	parcial	total
Álvaro Obregón	18	5	2	0	1	10	0
Azcapotzalco	19	6	2	0	4	7	0
Benito Juárez	9	5	1	0	1	2	0
Coyoacán	22	5	2	0	2	12	1
Cuajimalpa	7	3	1	0	0	3	0
Cuauhtémoc	28	15	2	0	5	6	0
Gustavo A. Madero	45	21	5	0	6	13	0
Iztacalco	16	7	0	0	2	7	0
Iztapalapa	81	42	8	1	1	29	0
Magdalena Contreras	6	3	0	0	1	0	2
Miguel Hidalgo	13	7	0	0	1	5	0
Milpa Alta	8	5	3	0	0	0	0
Tláhuac	18	6	4	0	2	6	0
Tlalpan	17	6	0	0	1	10	0
Venustiano Carranza	18	9	3	0	1	5	0
Xochimilco	14	8	0	0	2	4	0
Total general	339	153	33	1	30	119	3

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

3.2 Clasificación de la información

Tomando en cuenta que el DEA considera unidades homogéneas de producción, debemos definir grupos, por nivel (kínder, primaria y secundaria), para evitar sesgos. Un análisis exploratorio de los datos muestra que las escuelas que sufrieron un daño menor necesitan montos de dinero más pequeños para sus tareas de rehabilitación, lo cual resulta en una mayor eficiencia. En las Figuras 3.2, 3.3., 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, de la sección de anexos, puede observarse el costo vs alumnos beneficiados, por nivel (kínder, primaria y secundaria) y por grupo (2 y 4). Un argumento similar aplica para el estatus en las actividades de reconstrucción/rehabilitación (en progreso o concluida). Debido a esta razón, los grupos se

definen considerando el tipo de daño y el estatus de reconstrucción/rehabilitación, obteniéndose 6 grupos para cada nivel, siendo: 1) menor y en progreso; 2) menor y concluido; 3) parcial y en progreso; 4) parcial y concluido; 5) total y en progreso y 6) total y concluido. En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se muestra el número de escuelas de nivel básico afectadas por alcaldías.

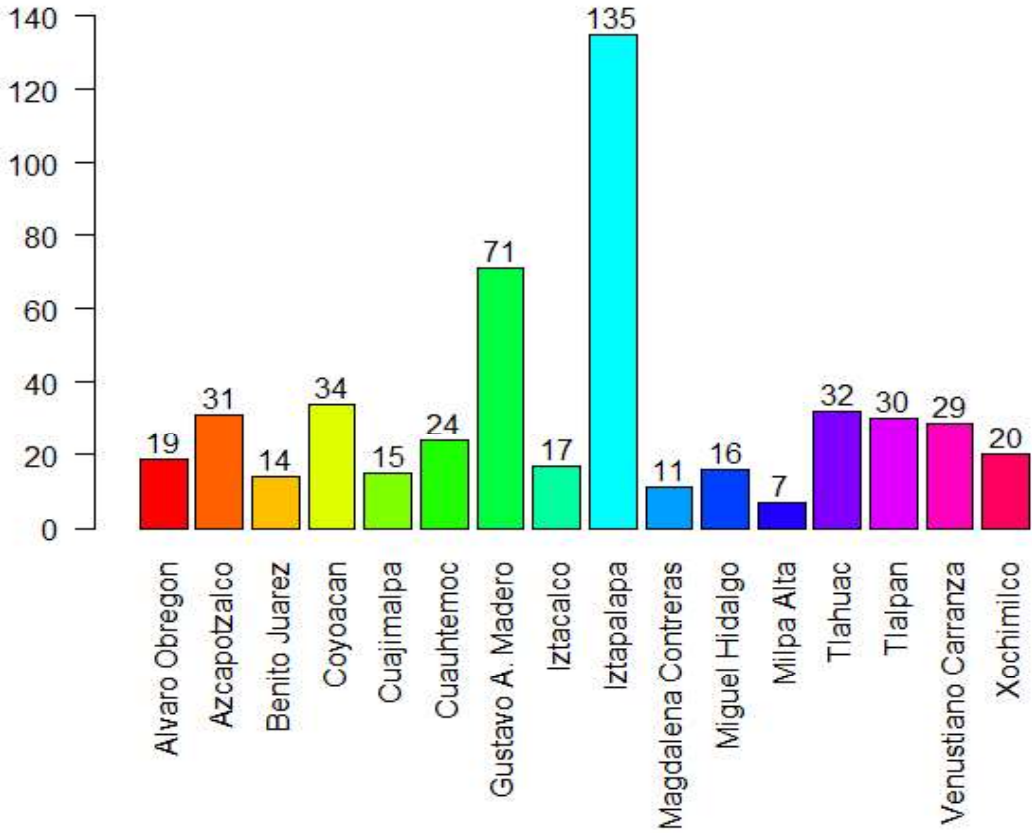


Figura 3.8 Escuelas de nivel kínder por alcaldía, afectadas en la CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

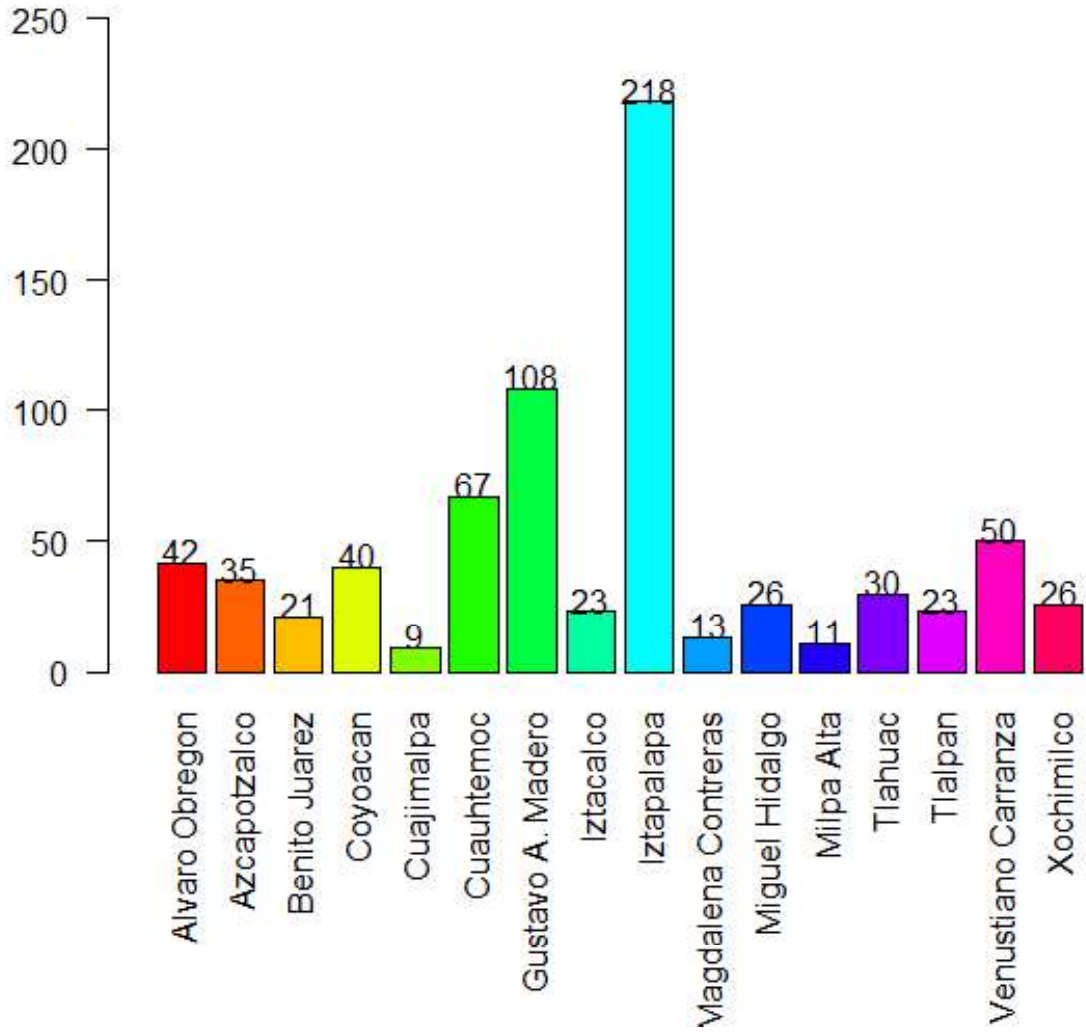


Figura 3.9 Escuelas de nivel primaria por alcaldía, afectadas en la CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

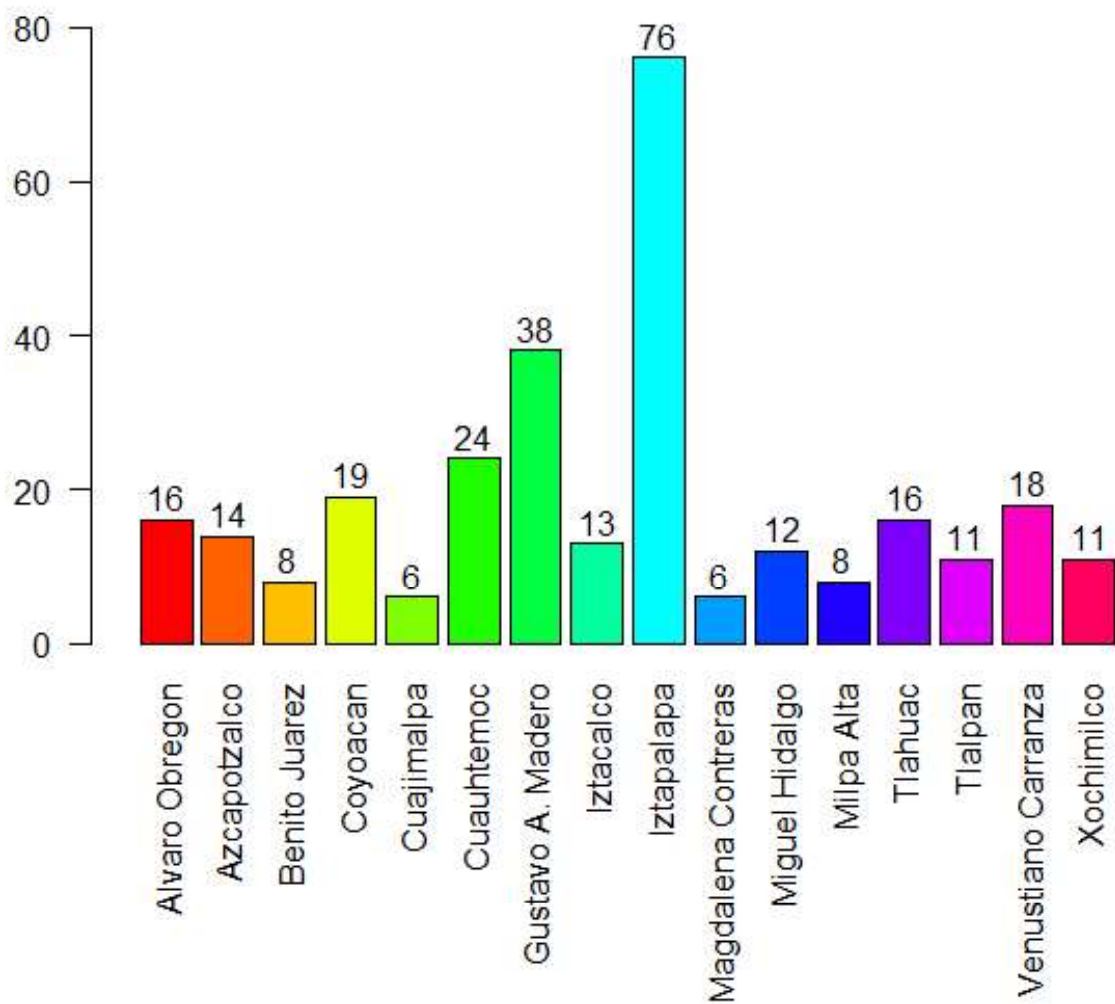


Figura 3.10 Escuelas de nivel secundaria por alcaldía, afectadas en la CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

En las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se muestra el número de escuelas de nivel básico afectadas por grupo para kínder, primaria y secundaria respectivamente.

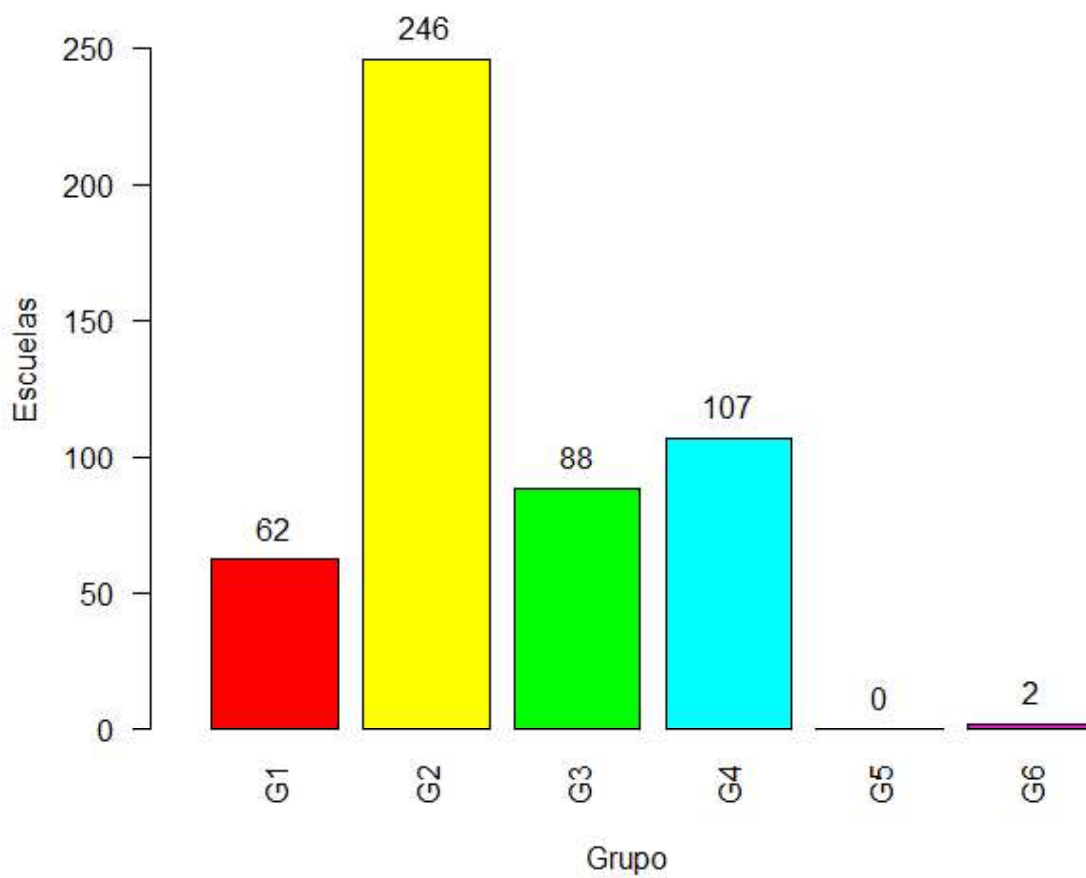


Figura 3.11 Escuelas de nivel kínder por grupo, afectadas en la CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

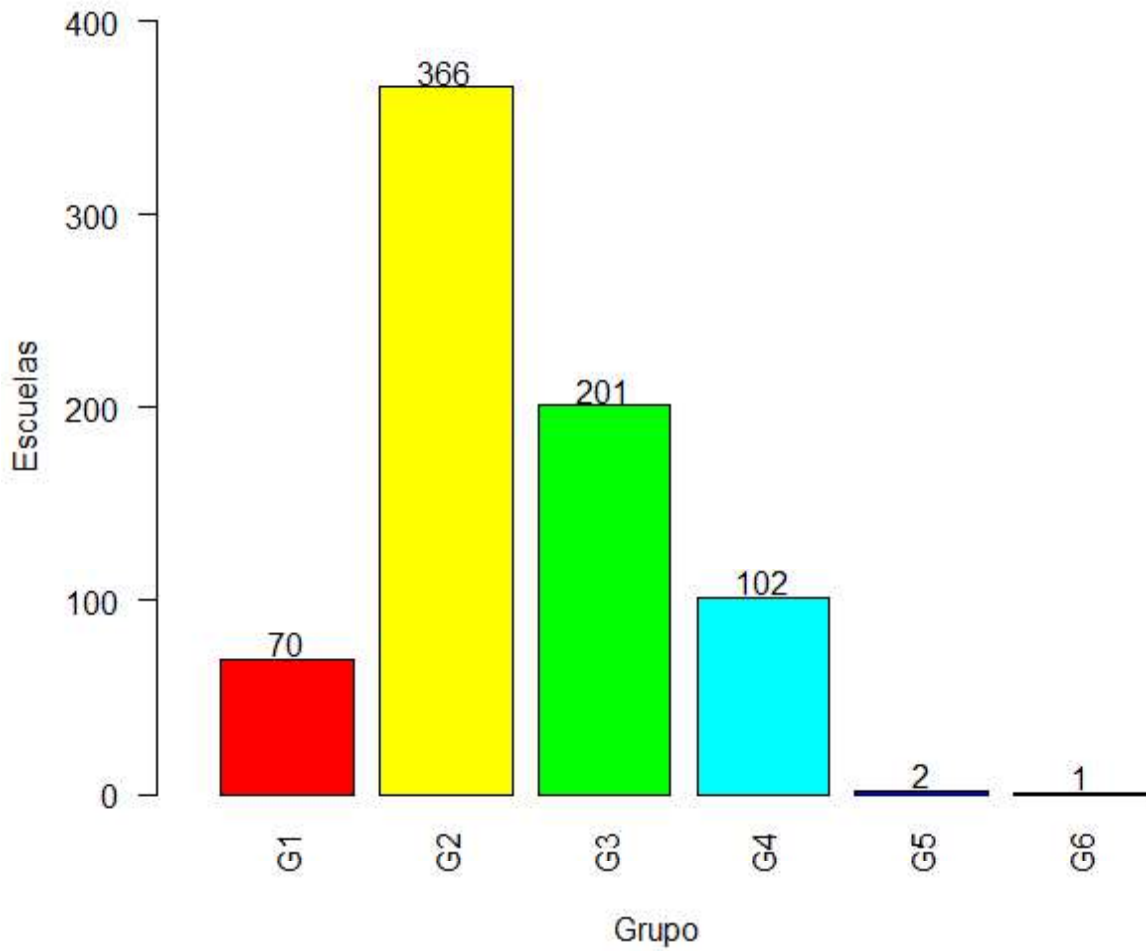


Figura 3.12 Escuelas de nivel primaria por grupo, afectadas en la CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

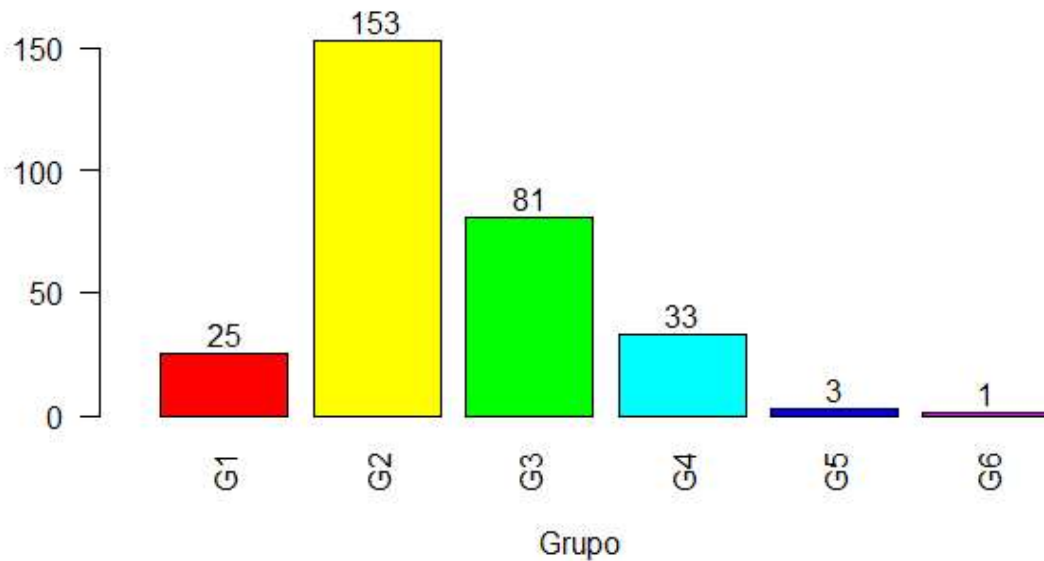


Figura 3.13 Escuelas de nivel secundaria por grupo, afectadas en la CDMX.

Fuente: Elaboración propia con datos de con datos de privado, MAPA DE RECONSTRUCCIÓN ESCOLAR (2020).

Como datos de entrada para el modelo contamos con un input (costo total de reconstrucción/rehabilitación) y un output (total de alumnos beneficiados en las actividades de reconstrucción/rehabilitación).

De las estadísticas mostradas se puede definir, al menos, un KPI, que al mismo tiempo se pueda utilizar como la entrada y salida que alimenten el modelo.

3.3 Solución de los modelos para cada nivel educativo aplicando RStudio

Un modelo DEA puede resolverse utilizando alguno de los múltiples modelos de programación lineal desarrollados en la literatura revisada. Sin embargo, esto puede volverse complicado sino se cuenta con los fundamentos matemáticos necesarios. Por tanto, es conveniente aprovechar los desarrollos actuales en software, de los cuales existen diversos que facilitan los cálculos al momento de aplicar el DEA (Bogetoft & Otto, 2011). Para nuestro caso utilizaremos el software RStudio, debido a que cuenta con una librería

precargada (Benchmarking), la cual permite aplicar el modelo DEA de manera sencilla y rápida, y además es de distribución libre.

3.4 Aplicación de DEA

El objetivo de la metodología DEA es evaluar la eficiencia relativa entre un conjunto de DMUs. Entiéndase por DMUs como las unidades que son evaluadas con el DEA o sistemas (S_j) de producción de bienes o servicios homogéneos entre sí. Para el caso donde m entradas transforman s salidas, entonces, si m y s son iguales a 1, es decir, una entrada y una salida, la eficiencia relativa para cada sistema j puede evaluarse con la expresión 3.1, como la simple relación 1 a 1 (Villarreal, 2017), es decir:

$$\text{eficiencia } S_j = \frac{\text{salida}_j}{\text{entrada}_j} \text{ para } j = 1, \dots, n \quad 3.1$$

Tomado de Villarreal (2017)

Cuando se requieren evaluar n sistemas con $m \neq s \neq 1$, entonces la expresión de la eficiencia debería determinarse como el cociente de la suma ponderada de las salidas entre la suma ponderada de las entradas. En tal situación hay que definir los pesos de cada salida y cada entrada definidos como u_r y v_i respectivamente. Estos pesos, asociados a las salidas y entradas, pueden asignarse por criterios técnicos, en general subjetivos, y una vez que se han fijado pueden ser utilizados para evaluar la eficiencia relativa de todas las unidades o sistemas (Villarreal, 2017).

Para la evaluación comparativa de desempeño, en este trabajo se emplea el DEA, metodología que es un procedimiento no paramétrico, que utiliza una técnica de programación lineal para evaluar la eficiencia relativa de un conjunto de unidades productivas homogéneas. (Restrepo & Villegas, 2013).

Todos los procesos productivos (de servicios o bienes) consumen recursos para transformar entradas en salidas con el objetivo de satisfacer la demanda del mercado (Restrepo & Villegas, 2013).

Como se detalla en la sección de revisión de la literatura, existen metodologías que permiten evaluar el desempeño de la capacidad productiva. La metodología DEA es un método para la estimación de fronteras de producción y la evaluación de eficiencia de DMUs.

Sin embargo, al existir variantes del DEA, es preciso identificar cual es el mejor modelo aplicable al caso de estudio, considerando la información disponible. Por lo anterior, se puede enlistar una metodología para aplicarla y así poder determinar la DMU más eficiente relativamente a un conjunto de éstas.

Paso 1: Identificar el modelo DEA

Identificar el modelo DEA que mejor se ajuste a las necesidades del problema, pero sobre todo aquel que mejor se ajuste con la información disponible.

Paso 2: Definición de parámetros y variables

Una vez seleccionado el modelo, se procede a definir los parámetros y variables de decisión.

Paso 3: Aplicación del modelo

Anteriormente se ha descrito que existen variantes de DEA por ejemplo el CCR propuesto por Charnes, Cooper, & Rhodes (1978), el cual solo considera rendimientos a escala constante, siendo muy poco probable observar en un caso real (Toloo, 2012). Por lo anterior, se propone utilizar un modelo DEA que considere rendimientos a escala variables (VRS) el cual se puede escribir como:

$$\text{Min}_{\theta, \lambda} Z_0 = \theta$$

s.t

$$Y\lambda \geq Y_0$$

$$\theta X_0 \geq Y\lambda$$

$$\lambda \geq 0$$

Dónde:

1. λ es el vector ($n \times 1$) de pesos o intensidades,

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \end{pmatrix}. \text{ Así } \lambda \text{ es la intensidad de la DMU } j$$

2. θ denota la puntuación de eficiencia (técnica) de la Unidad0.
3. De manera complementaria, en este modelo, podrían agregarse las holguras:

$$S_r^+ : \text{output}$$

$$S_i^- : \text{input}$$

En donde sí:

$S_r^+ > 0$, entonces se puede aumentar la salida en la cantidad dada por S_r^+

$S_i^- > 0$, entonces se puede disminuir la entrada en la cantidad dada por S_i^-

Si $\theta^* = 1 \Rightarrow DMU_0$ es eficiente.

(Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006)

3.5 Aplicación de Bootstrap y DEA

Dado que los edificios escolares varían en tamaño, existe un interés en investigar la eficiencia de escala. Los puntajes de eficiencia de escala son obtenidos al dividir los puntajes de CRS entre VRS. Para obtener más detalles sobre los modelos de arranque y DEA, consulte (Simar & Wilson, 1998) y (Simar & Wilson, 2000).

Previo a encontrar los puntajes de eficiencia de escala, se aplica una prueba de hipótesis en la cual se prueba si el conjunto de tecnología T , de donde obtuvimos nuestras muestras, presenta un comportamiento CRS.

$$H_0: T \text{ is CRS vs } H_1: T \text{ is VRS}$$

Si no se rechaza la hipótesis nula, no se tiene suficiente evidencia estadística para afirmar que las eficiencias calculadas VRS y CRS son diferentes. En lugar de considerar las eficiencias de escala individual, el estadístico de prueba utilizado fue:

$$S^1 = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N \frac{E_{CRS}^k}{E_{VRS}^k} \quad 3.2$$

En donde N representa el número total de DMUs consideradas. El valor P para esta prueba de hipótesis fue obtenida de una distribución Bootstrap de S^1 bajo H_0 , para ello fueron utilizadas 10000 réplicas.

En la Tabla 3.4 se observa el tamaño de muestra, valores del estadístico S^1 observados y los P-valores para las escuelas de nivel básico, grupos 2 y 4. Para evitar supuestos de distribución, se utiliza Bootstrap para hacer las pruebas de hipótesis.

Tabla 3.4: Estadísticas de prueba y P-valores para las pruebas de hipótesis para nivel básico, grupos 2 y 4.

	Grupo 2			Grupo4		
	Kínder	Primaria	Secundaria	Kínder	Primaria	Secundaria
Tamaño de la muestra (N)	246	366	153	107	102	33
Estadística de prueba	0.5441	0.6662	0.4285	0.5601	0.6266	0.7219
P-valor	0	0.0019	0	0.0824	0.3005	0.2992

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que la relación entre la tecnología y las eficiencias de escala es una incógnita, por tanto debemos rechazar la hipótesis nula si al menos una SE presenta un valor significativamente menor que 1, es decir, se rechaza la hipótesis nula si $S < c_\alpha$. De lo anterior se puede afirmar que existe suficiente evidencia estadística para decir que es mejor supuesto rechazar la hipótesis nula para kínder, primaria y secundaria del grupo 2.

3.6 Resultados producto de la información encontrada

Al tener una muestra pequeña de casos por cada alcaldía (incluso nulos) se produce un sesgo muy grande en la medición del rendimiento de cada alcaldía a nivel agregado. Por este motivo no se consideraron los grupos 5 y 6. Por otra parte, los grupos 1 y 3 al no haber concluido las tareas de reconstrucción/rehabilitación, se dejan de lado. Por tanto, únicamente se consideran los grupos 2 y 4. En las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 se muestra el desempeño relativo de los grupos 2 y 4 por nivel educativo (kínder, primaria y secundaria) respectivamente. Adicionalmente una distribución geográfica del desempeño promedio por alcaldías es mostrada en mapas de la CDMX, Figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22.

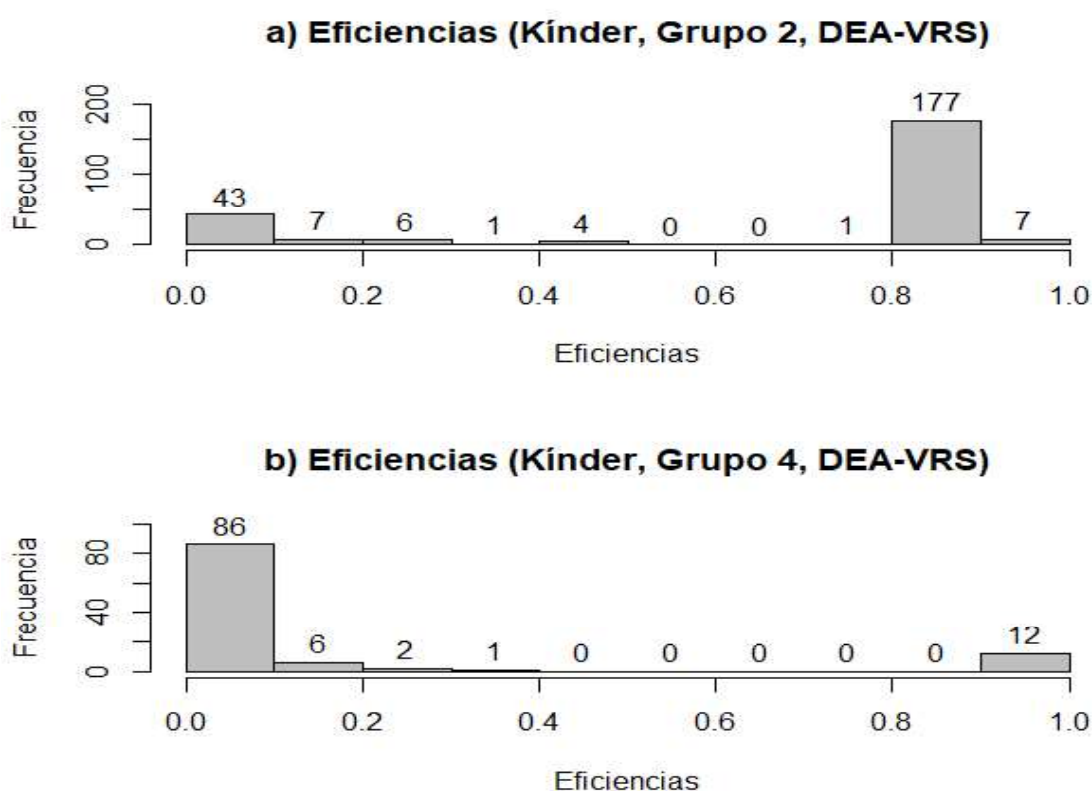


Figura 3.14 Desempeño relativo de las escuelas de nivel kínder por alcaldías (grupo 2 y 4).

Fuente: Elaboración propia.

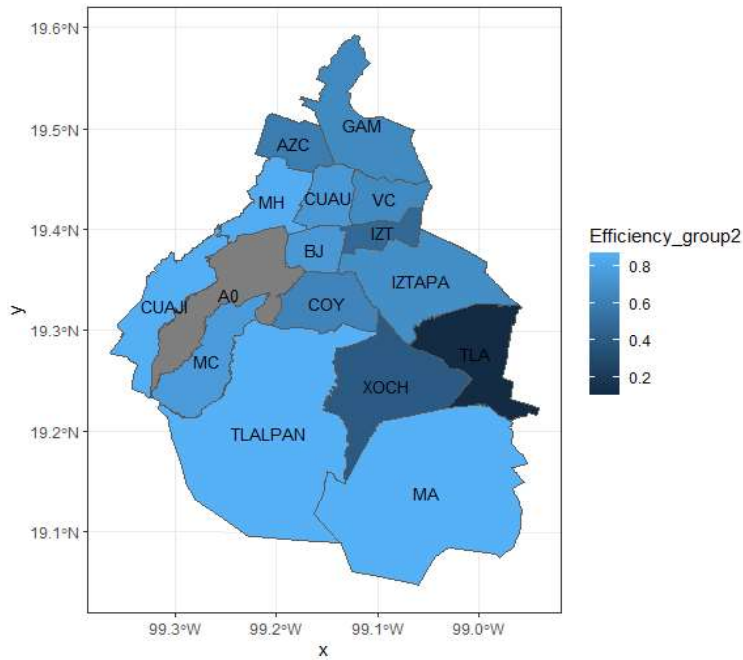


Figura 3.17 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel kínder, grupo 2).

Fuente: Elaboración propia.

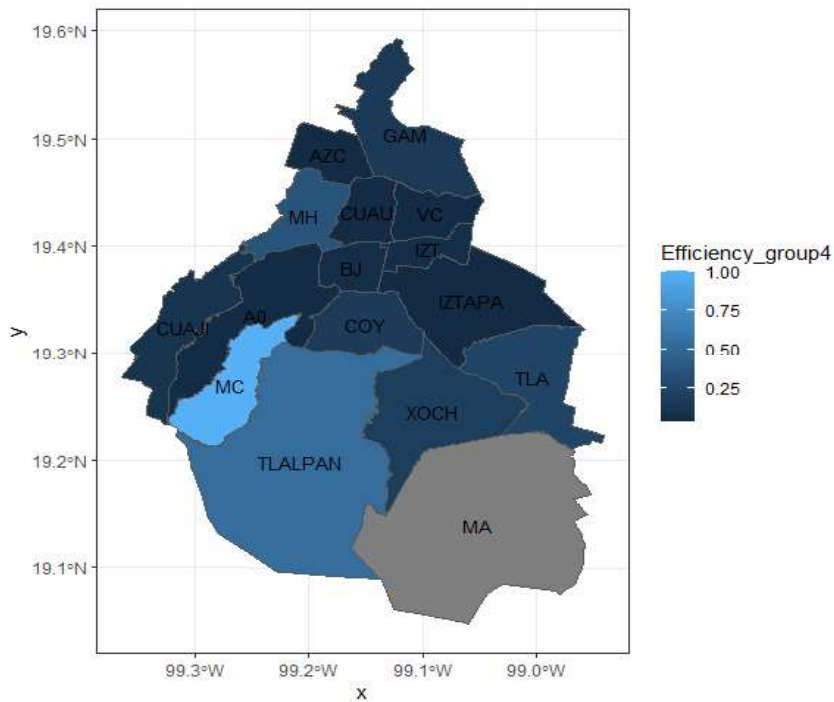


Figura 3.18 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel kínder, grupo 4).

Fuente: Elaboración propia.

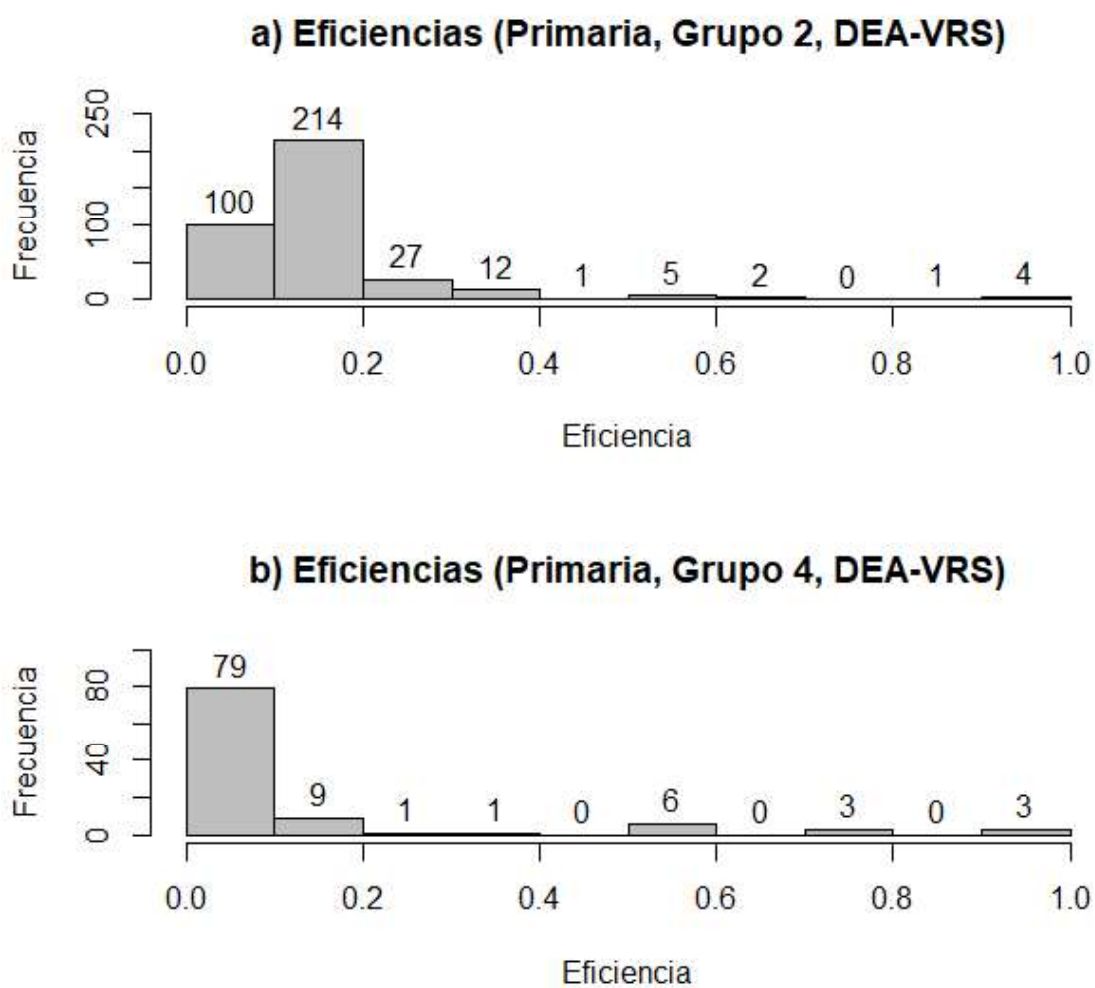


Figura 3.15 Desempeño relativo de las escuelas nivel primaria por alcaldías (grupo 2 y 4).

Fuente: Elaboración propia.

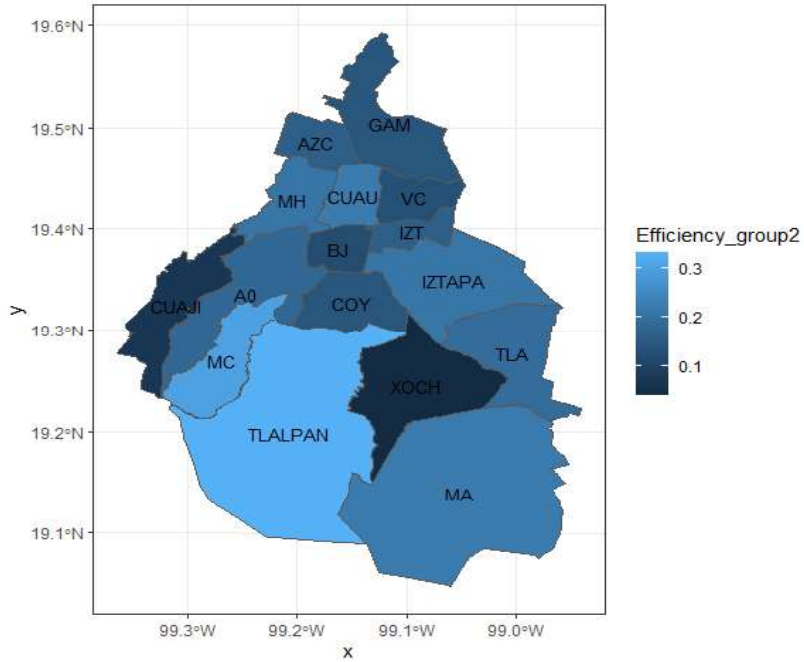


Figura 3.19 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel primaria, grupo 2).

Fuente: Elaboración propia.

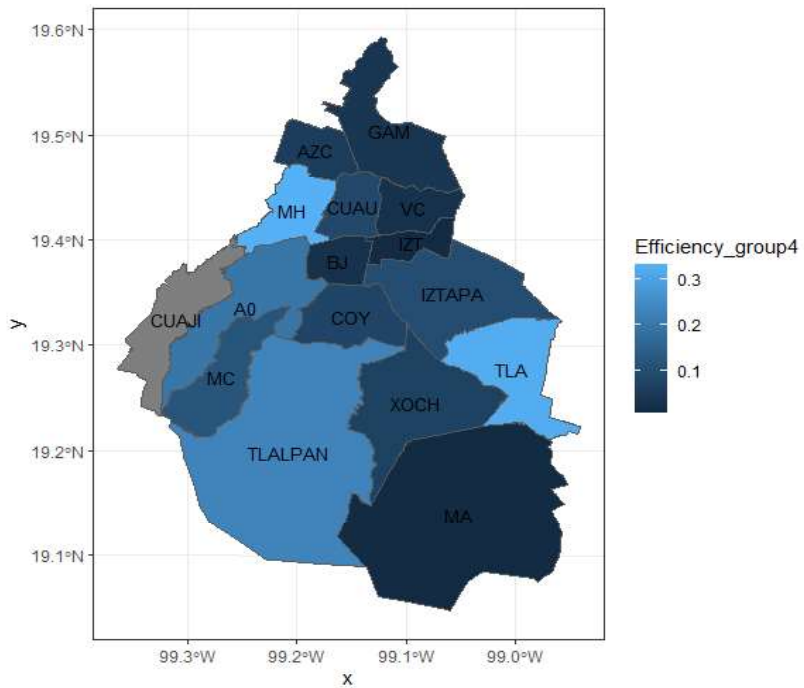


Figura 3.20 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel primaria, grupo 4).

Fuente: Elaboración propia.

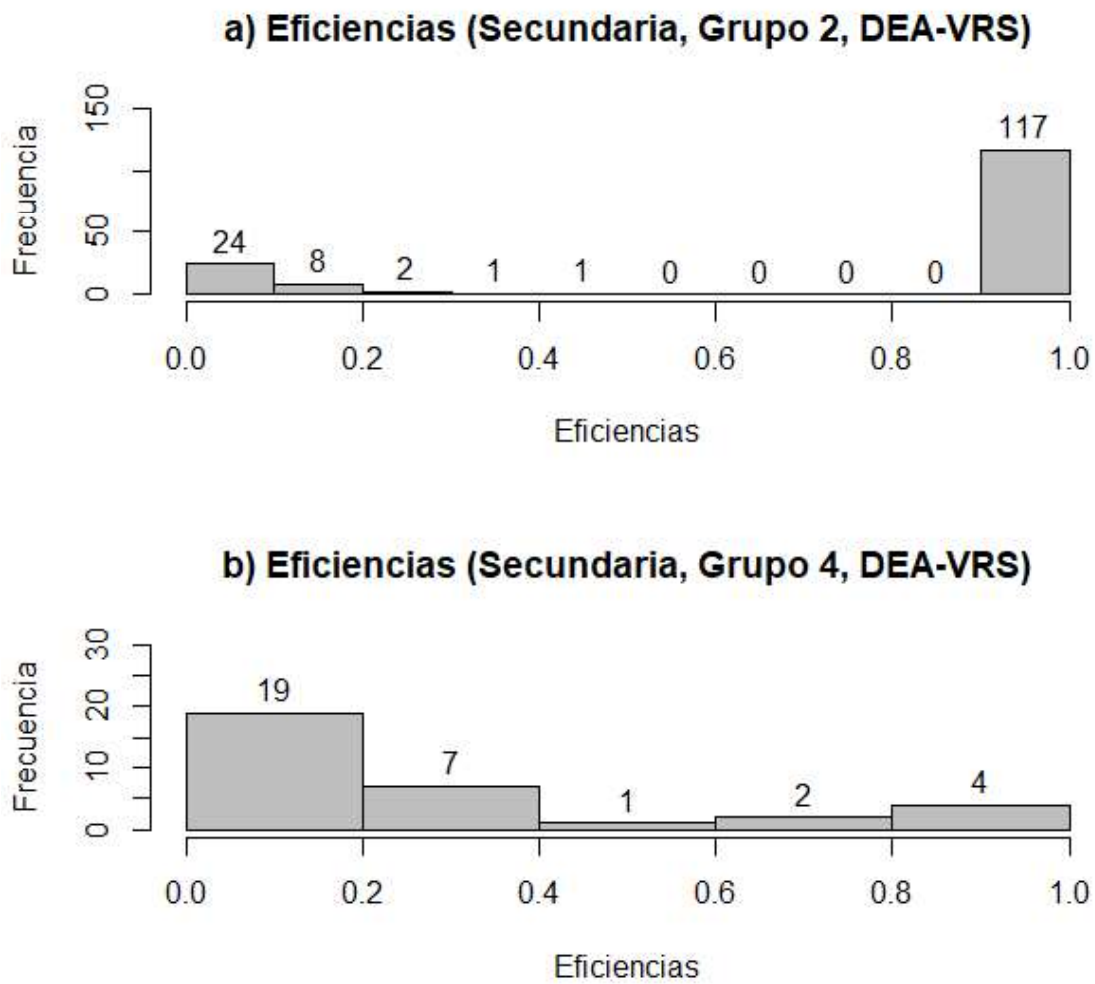


Figura 3.16 Desempeño relativo de las escuelas nivel secundaria por alcaldías (grupo 2 y 4).

Fuente: Elaboración propia.

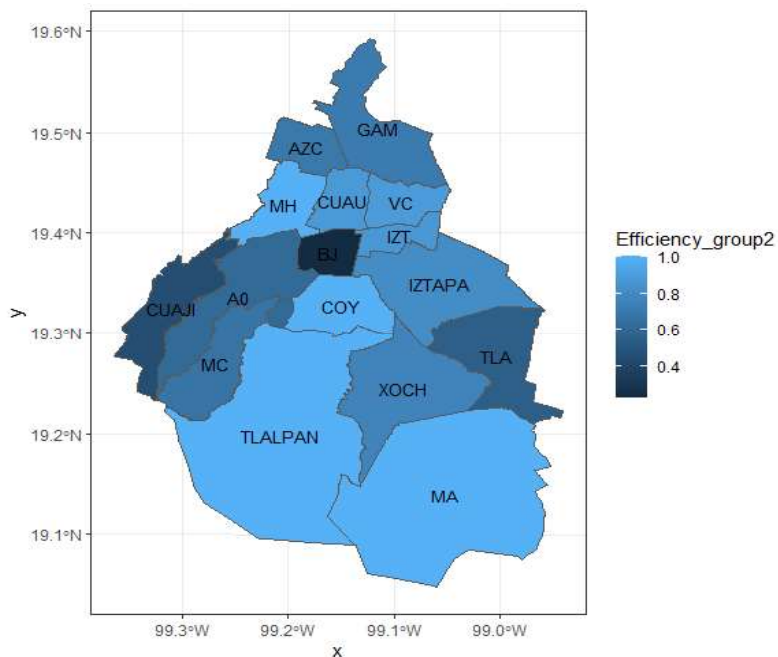


Figura 3.21 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel secundaria, grupo 2).

Fuente: Elaboración propia.

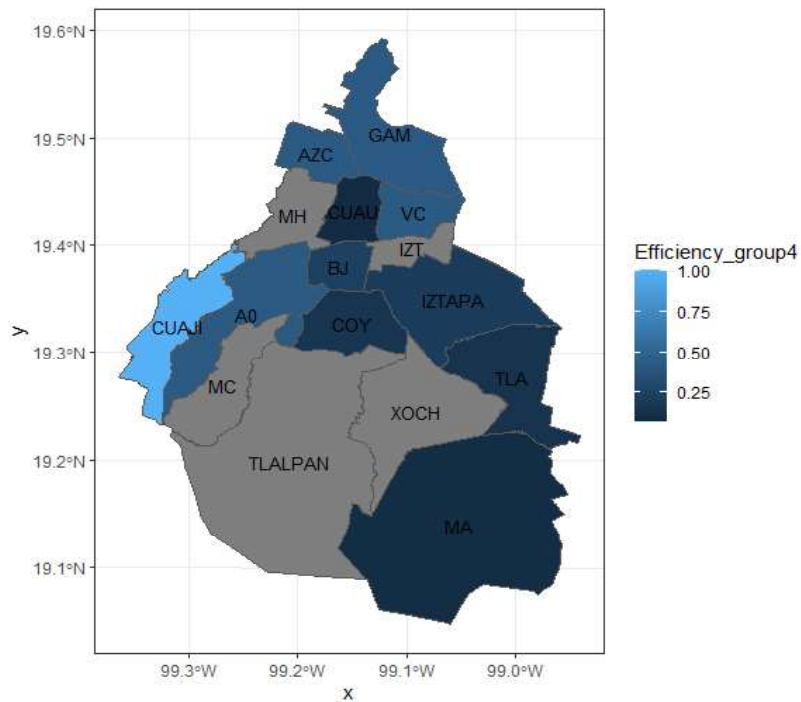


Figura 3.22 Desempeño relativo promedio por alcaldías (nivel secundaria, grupo 4).

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Análisis estadístico de DEA

El objetivo final fue comparar el desempeño relativo de las alcaldías. Se argumenta que, para hacer una comparación más justa, necesitamos grupos más homogéneos, esto nos llevó a formar 6 grupos utilizando como parámetros el nivel de daño y el estatus de reconstrucción/rehabilitación, de los cuales únicamente analizamos los grupos 2 y 4. Primeramente calculamos las eficiencias para cada grupo, esto se realizó para evitar sesgos en las eficiencias. El siguiente paso consiste en comparar el desempeño entre alcaldías, 6 comparaciones por separado se llevaron a cabo, una para cada grupo y por nivel (kínder, primarias y secundaria). Una prueba no paramétrica basada en las posiciones, la prueba Kruskal-Wallis, fue utilizada para probar si existen diferencias significativas entre las eficiencias de las 16 alcaldías. Para más detalles sobre esta prueba, consulte (Kruskal & Wallis, 1952) y (Hollander & Wolfe, 1999). La Tabla 3.5 muestra los resultados de H_0 vs H_1 (H_0 : Todas las muestras provienen de la misma población -distribución- H_1 : Al menos una muestra proviene de una población con una distribución distinta), para los 3 niveles y los 2 grupos. Basado en el tamaño de los P-valores, hay una fuerte evidencia para inferir que existe una diferencia en las eficiencias entre las alcaldías para el grupo 2, tanto en kínder como en primaria. Nuevamente, basado en los P-valores de esta prueba, identificamos que, para el nivel kínder del grupo 4, encontramos evidencia para afirmar que existe una diferencia entre las eficiencias de las alcaldías. Sin embargo, no así para el caso de primarias pertenecientes al mismo grupo. Por otro lado, en el caso de escuelas secundarias en ambos grupos no existe evidencia para afirmar que haya una diferencia entre las eficiencias de las alcaldías.

Ahora que se ha determinado que existe una diferencia entre las eficiencias de las alcaldías para algunos casos (en el grupo 2 para kínder y primaria y en el grupo 4 para kínder), resulta necesario identificar cual(es) alcaldía(s) es o son la(s) más eficiente(s), a través de lo cual se podría aumentar la potencial resiliencia (tiempo de recuperación) o disminuir costos de reconstrucción/rehabilitación en las demás alcaldías. Las estimaciones puntuales de eficiencia calculadas a partir de DEA pueden verse afectadas por la variación del muestreo o

por algún otro aspecto estocástico del proceso de reconstrucción/rehabilitación. Por tanto, resulta conveniente estimar intervalos de confianza alrededor de los puntos eficientes calculados. Bootstrap es un método estadístico general basado en computadora para calcular la precisión de las estimaciones estadísticas; este método proporciona una forma de analizar la sensibilidad de las puntuaciones de eficiencia en relación con las variaciones de muestreo. Las Figuras 3.23 y 3.24 son el resultado de aplicar este método a escuelas de una alcaldía (Tlalpan, grupo 2 y 4 para kínder). Resultados similares, para escuelas de 2 alcaldías (Tlalpan para nivel primaria grupo 2, y Miguel Hidalgo para nivel secundaria y grupo 2), pueden ser observados en las figuras 3.25 y 3.27 ubicadas en el apartado de anexos, mientras que para el grupo 4, los resultados pueden ser observados en las Figuras 3.26 y 3.28 para primaria y secundaria respectivamente. Para otro ejemplo de la aplicación del enfoque Bootstrap DEA, ver (Hawdon, 2003). Finalmente, una descripción gráfica del impacto financiero para cada nivel y grupo está dada en las Figuras 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 y 3.34, dónde el número de estudiantes beneficiados resultado de invertir un millón de pesos mexicanos puede ser observado.

Tabla 3.5: Estadística de prueba y P-valores para pruebas Kruskal-Wallis en nivel básico.

	Grupo 2			Grupo 4		
	Kínder	Primaria	Secundaria	Kínder	Primaria	Secundaria
Estadística de prueba	41.6197	83.0733	24.8958	31.7234	12.599	11.3299
P-valor	3.2345×10^{-5}	1.9067×10^{-11}	0.0514	0.0044	0.5583	0.3324

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 3.5, se puede inferir, con base en los P-valores, que existe una diferencia en la eficiencia entre las alcaldías para los tres niveles del grupo 2 y únicamente para kínder del grupo 4.

En esta sección se ha desarrollado y aplicado una metodología que permitió encontrar las DMUs más eficientes. En la siguiente sección, los resultados producto de este capítulo son analizados con mayor detalle.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se ha mencionado, los resultados obtenidos permiten identificar las DMUs más eficientes por nivel académico (kínder, primaria y secundaria). En esta sección se realiza un análisis a los resultados obtenidos, el cual permitirá hacer la identificación concreta de las DMUs descritas anteriormente.

4.1 Resultados

Una pequeña muestra de casos para cada alcaldía (incluso los individuales) conduce a un sesgo muy grande en la medición del desempeño de cada alcaldía a nivel agregado. Por este motivo, no se consideró el grupo 6, mientras que los grupos 1, 3 y 5, que no completaron las tareas de reconstrucción/rehabilitación, quedan fuera. Por tanto, solo se tienen en cuenta los grupos 2 y 4.

Con la aplicación de un modelo DEA se obtuvo un panorama sobre el desempeño relativo de las unidades productivas que participaron en las actividades de reconstrucción/rehabilitación de las escuelas de nivel básico en las alcaldías de la CDMX, lo cual permite identificar las unidades más eficientes y por ende se podría identificar los actores y métodos que permiten una ejecución con una mejor eficiencia, de las tareas post desastre. Esto conlleva a atender lo más pronto posible el daño de la infraestructura del sector de educación básica, o bien haciendo el despliegue, de actividades, más eficiente y por lo tanto se logre el mayor aprovechamiento de los recursos escasos disponibles para tal fin. Dicha identificación se basa en el análisis del desempeño real, registrado para un evento reciente en la región de interés. Por lo que se considera factible la reproducción de dichos cursos de acción.

En la Tabla 4.1 se muestran los resúmenes numéricos de las estimaciones de DEA-VRS para cada escuela de nivel básico (kínder, primaria y secundaria) que sufrió un daño clasificado como menor y su rehabilitación fue concluida (grupo 2). La eficiencia media muestral es aproximadamente 67.5%, 17.7282% y 78.6752% para kínder, primaria y secundaria

respectivamente. De acuerdo con la definición de eficiencia de Farrell, esta implica que algunas escuelas (debido a la falta de información de superficie total de reconstrucción/rehabilitación y considerando la misma cantidad de alumnos, se asume que escuelas de matrícula similar son de dimensiones equivalentes), fueron rehabilitadas con un 67.5%, 17.7282% y 78.6752% del costo de sus pares para kínder, primaria y secundaria respectivamente. Una de cada cuatro escuelas tiene una eficiencia por debajo del 74% y 5.3676% para kínder y primaria respectivamente. La mediana es de 85.4% y 19.8% (kínder y primaria, respectivamente), lo cual implica que el 50% de las escuelas tienen una eficiencia mayor a éstas. Note que las escuelas de nivel secundaria quedaron excluidas de este análisis, la razón para ello es que no hay evidencia para afirmar que existe una diferencia entre las eficiencias de las alcaldías para este nivel en el grupo 2. La frontera de eficiencia para el grupo 2 está conformada por 3 y 4 escuelas para kínder y primaria respectivamente, las cuales son las DMUs más eficientes para este grupo. Nuevamente tenemos el mismo argumento para excluir las escuelas secundarias. La Figura 4.1, ubicada en la parte de los anexos, proporciona una representación gráfica, por alcaldía, de las eficiencias DEA-VRS para las DMUs en nivel kínder del grupo 2, la representación correspondiente para el nivel primaria y secundaria se pueden observar en las Figuras 4.3 y 4.5 respectivamente. En la Tabla 4.2 se muestra información similar, pero para daños parciales y rehabilitaciones que han sido concluidas (grupo 4). La frontera de eficiencia ahora está conformada por 12, 3 y 4 escuelas para kínder, primaria y secundaria respectivamente, las cuales representan a las más eficientes de su grupo y nivel. En la sección de anexos, las Figuras 4.2, 4.4 y 4.6 proporcionan una representación gráfica, por alcaldía, de las eficiencias DEA-VRS para las DMUs del grupo 4 para los tres niveles (kínder, primaria y secundaria respectivamente).

Tabla 4.1: Resumen estadístico DEA-VRS, Grupo 2.

	Resumen estadístico de las estimaciones de DEA (%)		
Nivel	Kínder	Primaria	Secundaria
Mínimo	1.65	0.37	0.4724
Primer cuartil	74	5.3676	100
Mediana	85.4	19.8	100
Media	67.5	17.7282	78.6752
Tercer cuartil	85.4	19.8	100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2: Resumen estadístico DEA-VRS, Grupo 4.

	Resumen estadístico de las estimaciones de DEA (%)		
Nivel	Kínder	Primaria	Secundaria
Mínimo	0.416	0.3668	0.7335
Primer cuartil	2.5	1.8196	5
Mediana	5.62	3.0899	14.6092
Media	16.2	12.4765	27.986
Tercer cuartil	6.63	6.4239	31.6391

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.7 presenta intervalos de confianza Bootstrap del 95% para las diferencias entre las eficiencias promedio Tlalpan y otras alcaldías para kínder y grupo 2. De esos intervalos de confianza tenemos que Tlalpan tiene una eficiencia promedio comparable con Cuajimalpa, Iztapalapa y Milpa Alta (note que los intervalos de confianza contienen cero). Por otro lado, la eficiencia promedio de Tlalpan es superior al resto de las de más alcaldías, excepto Álvaro Obregón en la cual no hay DMUs para este grupo. Las diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia promedio oscilan entre el 2% y el 80% aproximadamente con la diferencia más pequeña entre Tlalpan y Miguel Hidalgo y la más grande entre Tlalpan y Tláhuac. La Figura 4.8 muestra un análisis similar, pero refiriéndose al grupo 4. En este caso, no existe evidencia estadística para afirmar que existe diferencia entre las eficiencias

promedio de Tlalpan y Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo y Xochimilco. Las diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia promedio oscilan entre el 25% y el 50% aproximadamente, con la diferencia más pequeña entre Tlalpan y Tláhuac y la más grande entre Tlalpan e Iztapalapa.

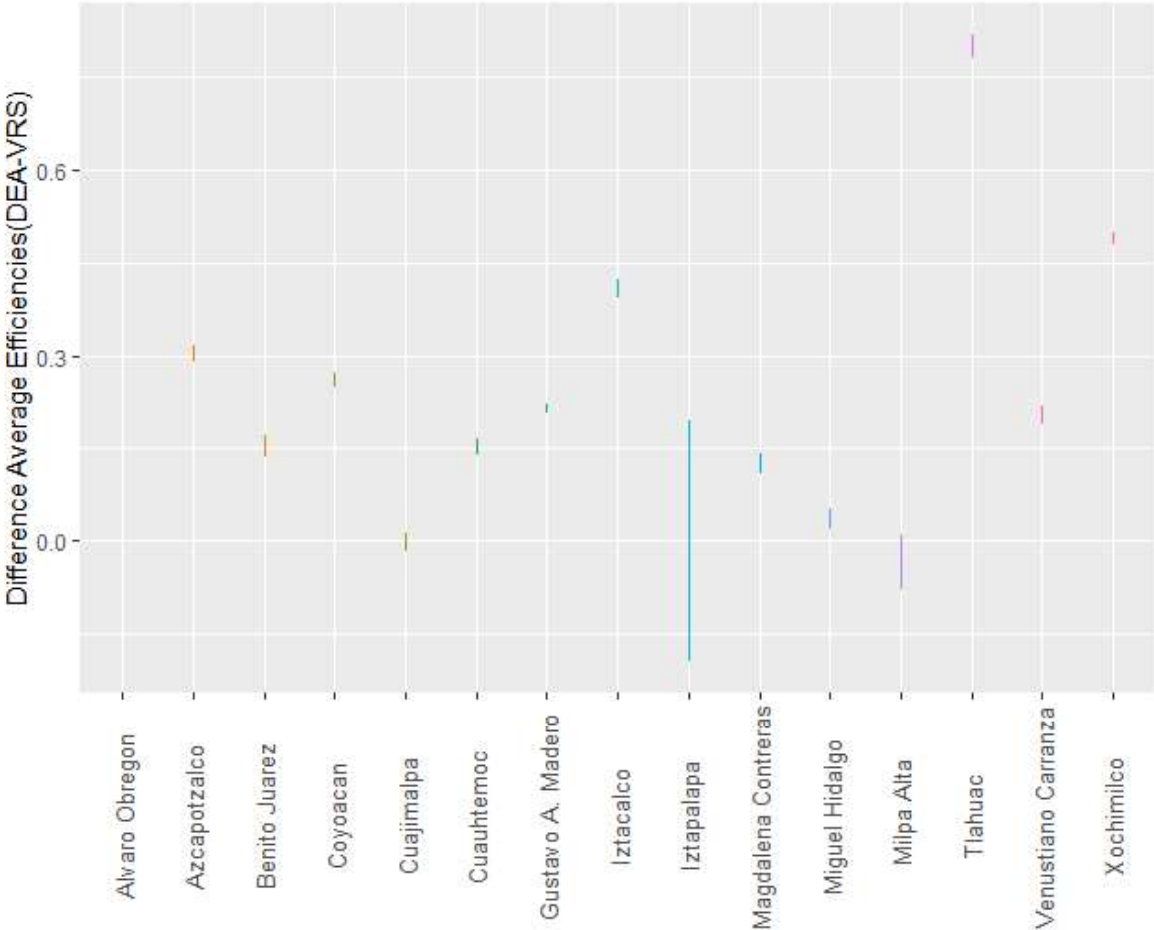


Figura 4.7 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

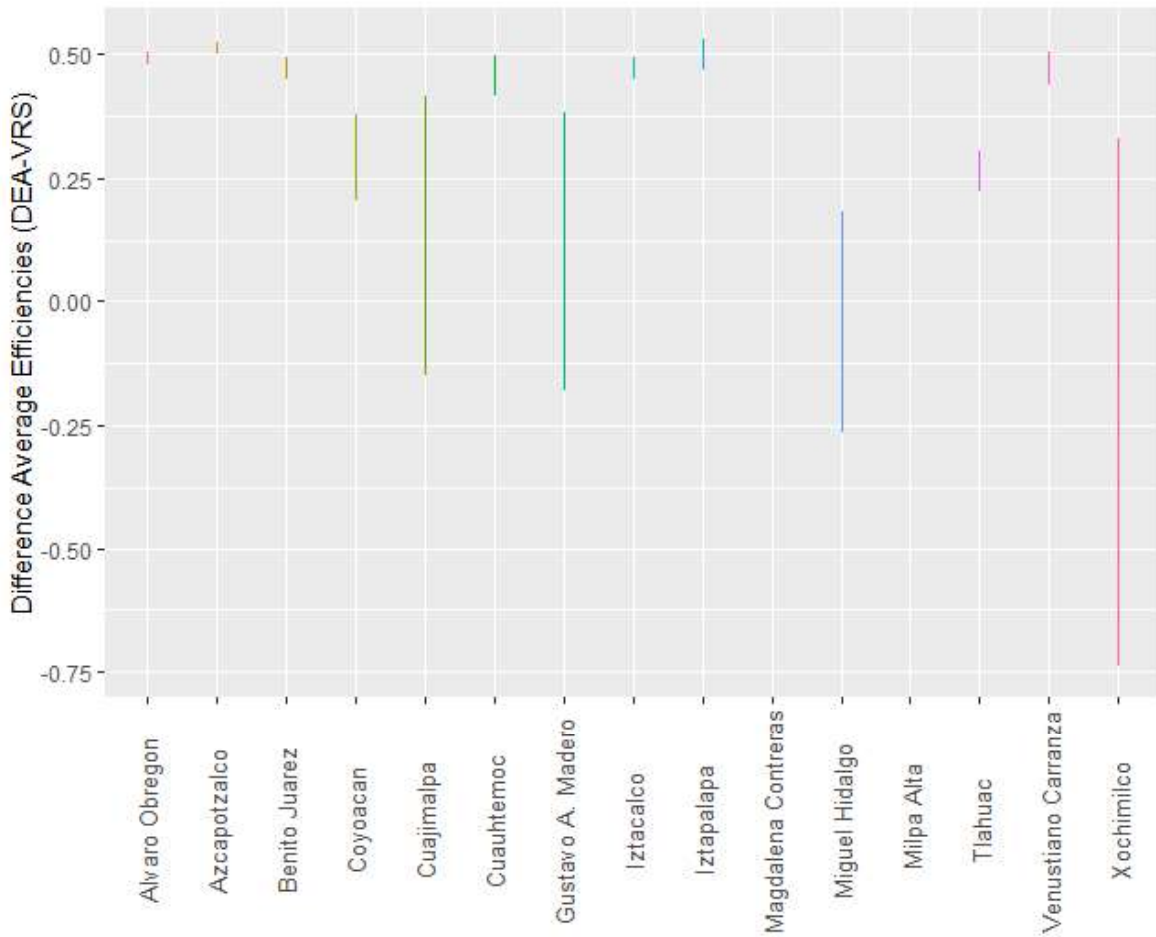


Figura 4.8 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 4, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

De manera análoga a el caso de kínder, existe un análisis para escuelas primarias y secundarias. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran intervalos de confianza Bootstrap del 95% para las diferencias entre las eficiencias promedio de Tlalpan y Miguel Hidalgo con algunas otras alcaldías para primaria y secundaria respectivamente y que pertenecen al grupo 2. De esos intervalos de confianza tenemos que Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Milpa Alta y Tlalpan tienen una eficiencia promedio comparable (seguida de cerca por Iztapalapa). Por otro lado, la eficiencia promedio de Tlalpan es superior al resto de las demás alcaldías. Las diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia promedio oscilan entre el 2% y el 40% aproximadamente con la diferencia más pequeña entre Tlalpan

e Iztapalapa y la más grande entre Tlalpan y Xochimilco. Para el caso de secundaria obtuvimos que Miguel Hidalgo tiene una eficiencia promedio comparable a Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac, Venustiano Carranza y Xochimilco (nótese que los intervalos de confianza contienen cero). Note que con esto se corrobora que no existe evidencia para afirmar que existe diferencia entre las eficiencias por alcaldía en escuelas secundarias, puesto que la mayoría tienen eficiencias medias comparables e incluso existe un caso en el cual son iguales. Por otro lado, la eficiencia promedio de Miguel Hidalgo es superior a todas las alcaldías restantes (con la excepción de Tlalpan, las eficiencias de Tlalpan son iguales a las eficiencias de Miguel Hidalgo). Las diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia promedio oscilan entre el 25% y el 75% aproximadamente con la diferencia más pequeña entre Miguel Hidalgo y Magdalena Contreras y la más grande entre Miguel Hidalgo y Benito Juárez.

El análisis de primaria y secundaria para el caso del grupo 4, ya no se realizará debido al mismo argumento presentado para secundarias pertenecientes al grupo 2.

4.2 Análisis de eficiencia de escala

Los resultados obtenidos al aplicar el método de eficiencia a las escuelas del grupo 2, muestra que: 1 de 246, 2 de 366 y 1 de 153 escuelas, muestran rendimientos constantes a escala para kínder, primaria y secundaria respectivamente, solo una está operando a escala óptima por nivel. En el anexo 4 donde se ubican las Figuras 4.11, 4.13 y 4.15, puede observarse que la gran mayoría de las escuelas, del grupo 2, recibieron puntajes de eficiencia de escala que sugieren rendimientos crecientes a escala (Increasing Returns to Scale, IRS). Las puntuaciones medias de eficiencia de escala de las instalaciones de rendimientos decrecientes a escala (Decreasing Returns to Scale, DRS) y las instalaciones del IRS son del: 95% y 54%, 69% y 66%, y 8% y 43%, respectivamente. La Tabla 4.3 muestra el número de escuelas que muestran el IRS por alcaldía. Por otro lado, los resultados del grupo 4 muestran que una escuela de 107, 102 y 103 está funcionando a una escala óptima para kínder, primaria y secundaria respectivamente. Las puntuaciones medias de eficiencia de escala de las

instalaciones para kínder del DRS y las del IRS son del 6% y el 57%, respectivamente, para los casos de primaria y secundaria son del 25% y 65%, y 70% y 77% respectivamente. Las Figuras 4.12, 4.14 y 4.16 así como la Tabla 4.4 muestran información similar a las Figuras 4.11, 4.13 y 4.15 así como en la Tabla 4.3, respectivamente, pero para el grupo 4.

Tabla 4.3: Número de escuelas que exhiben el IRS por alcaldía.

Alcaldía / Nivel	Frecuencias, Grupo 2		
	Kínder	Primaria	Secundaria
Álvaro Obregón	0	17	5
Azcapotzalco	11	20	6
Benito Juárez	7	10	5
Coyoacán	16	19	4
Cuajimalpa	3	3	3
Cuauhtémoc	13	20	15
Gustavo A. Madero	39	43	21
Iztacalco	8	14	7
Iztapalapa	76	85	41
Magdalena Contreras	7	3	3
Miguel Hidalgo	11	13	7
Milpa Alta	5	4	5
Tláhuac	7	1	6
Tlalpan	18	7	6
Venustiano Carranza	15	22	9
Xochimilco	7	5	8
Total	243	286	151

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4: Número de escuelas que exhiben el IRS por alcaldía.

Alcaldía / Nivel	Frecuencias, Grupo 4		
	Kínder	Primaria	Secundaria
Álvaro Obregón	5	6	2
Azcapotzalco	11	3	2
Benito Juárez	2	3	1
Coyoacán	8	2	1
Cuajimalpa	5	0	0
Cuauhtémoc	6	15	2
Gustavo A. Madero	13	8	3
Iztacalco	5	1	0
Iztapalapa	15	25	8
Magdalena Contreras	1	3	0
Miguel Hidalgo	3	7	0
Milpa Alta	0	1	3
Tláhuac	10	4	3
Tlalpan	8	3	0
Venustiano Carranza	5	9	2
Xochimilco	7	5	0
Total	104	95	27

Fuente: Elaboración propia obtenida.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones

Como resultado principal del presente trabajo, se estimaron las eficiencias relativas en las actividades de reconstrucción/rehabilitación para escuelas públicas de nivel básico en la CDMX, dicha información se obtuvo utilizando un modelo DEA-VRS de un input, un output y datos empíricos, donde la variable de entrada (input) fue el costo total de reconstrucción/rehabilitación y la variable de salida (output) fue el número de alumnos inscritos previos a las actividades de reconstrucción/rehabilitación. El modelo DEA fue seleccionado después de realizar una prueba de hipótesis, la cual arrojó como resultado que es un mejor supuesto un modelo VRS que uno CRS. Las eficiencias puntuales se dejaron de lado y, además, se calcularon intervalos de confianza Bootstrap con la finalidad de considerar la variabilidad estocástica que conlleva el proceso de reconstrucción/rehabilitación y de igual manera incluir la variabilidad inherente al proceso de estimación. En casos, como el presentado en este trabajo, en los cuales los supuestos de distribución convencionales no son razonables o difíciles de validar, Bootstrap resulta ser muy adecuado. Para las alcaldías con DMUs pertenecientes al grupo 2 (escuelas de educación nivel básico, daño menor y cuya rehabilitación ha sido concluida). Se encontró que Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta y Tlalpan tienen una eficiencia promedio comparable para el caso de escuelas de nivel kínder, seguidas muy de cerca por Miguel Hidalgo. Por otro lado, para el caso de escuelas nivel primaria los resultados que se obtuvieron reflejan que Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Milpa Alta y Tlalpan son las alcaldías con eficiencias promedio similares (seguidas muy de cerca por Iztapalapa). Al mismo tiempo, para las eficiencias promedio por alcaldía comparables, en escuelas nivel secundaria, se encontró que pertenecen a Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza, Xochimilco y Miguel Hidalgo.

En la tabla 5.1, ubicada en los anexos, se muestra un resumen de las diferencias, más pequeñas y grandes, en las eficiencias promedio para los tres niveles.

Un análisis similar para DMUs pertenecientes al grupo 4 (escuelas públicas de nivel kínder que presentaron daños parciales y se han concluido sus obras de reconstrucción), muestra que no existe evidencia estadística entre la eficiencia promedio de Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Xochimilco y Tlalpan. En contraste se puede observar que Tlalpan presenta una mayor eficiencia promedio que el resto de las alcaldías en la CDMX. El rango de diferencias va desde el 25% hasta el 50%. Tanto nivel primaria y secundaria quedaron excluidas de este análisis al no haber evidencia estadística significativa entre las eficiencias promedio para estos niveles del grupo 4, lo cual puede ser observado en las Figuras 4.17 y 4.18 ubicadas en los anexos.

El análisis realizado para las escuelas públicas de nivel básico en la CDMX apunta a que la mayoría de las DMUs operan bajo IRS, es decir, que el costo asociado al proceso de reconstrucción/rehabilitación es muy alto en relación con el número de estudiantes beneficiados por éste. Los resultados encontrados sugieren que Tlalpan y las escuelas que operan bajo CRS, podrían ser observados con más detalle, esto con la finalidad de iniciar a establecer mejores prácticas en las actividades de recuperación posteriores a un sismo, es decir utilizar estas referencias como benchmark para esta región.

Recomendaciones

El análisis que se ha realizado podría permitir identificar las acciones que expliquen la mayor eficiencia y que resultarían como acciones asequibles para replicar en el resto de las alcaldías. Así mismo sería interesante explorar otros modelos, como el propuesto por Toloo (2012), llevar a cabo un análisis comparativo y determinar si los resultados obtenidos en el presente trabajo son ratificados. Un punto de interés particular sería averiguar si las mismas DMUs son declaradas eficientes por diferentes modelos.

Por otra parte, los resultados obtenidos podrían ser de utilidad tanto para el gobierno, para la posible reducción de costos o tiempos de respuesta, esto con base en el desempeño relativo

que cada alcaldía. De igual manera, para el sector privado (industria de la construcción) permitiéndole mejorar sus procesos actuales.

Trabajo futuro

En el presente trabajo, se ilustra únicamente el análisis, bajo la aplicación de un modelo que considera el caso en el que el sistema presenta entrada única y salida única, por tanto, la investigación queda abierta para el desarrollo e implementación de modelos más amplios, donde sea posible utilizar otros factores, como la superficie total construida y tiempo de ejecución (múltiples entradas y múltiples salidas), que permitan el uso de KPI's más completos y complejos, la construcción de dicho modelo tiene la limitante exclusiva de disponibilidad de la información, más no metodológica ni computacional para generar los resultados correspondientes.

Otra potencial vía de desarrollo futuro es robustecer este tipo de análisis, a través de la estandarización de los indicadores para las actividades de construcción, tales como un índice de costos mencionado por Botero & Lluch (2005) y así obtener un desempeño absoluto (absoluto respecto al desempeño esperado en labores de construcción en general). Que paralelamente permita identificar las actividades que originan las deficiencias y poder mejorarlas. Esto será muy importante porque con base en la mejora de estas actividades aumentaría la potencial capacidad de resiliencia para cada alcaldía de la CDMX y, complementariamente al tener identificados y clasificados los desempeños, la elaboración de estimaciones más realistas para las obras de reconstrucción/rehabilitación necesarias basados en escenarios o en los enfoques Minimax mencionados por Gastaldi et al., (1998), con lo cual se esperaría que las DMUs minimicen el nivel de deficiencia al máximo esperado.

Así mismo, después de realizar la descrita estandarización, podría desarrollarse un modelo de simulación (sería adecuado utilizar el software FlexSim - si es que se cuenta con una licencia profesional -, en caso contrario se optaría por JaamSim, debido a que en su versión libre permite realizar hasta 50 experimentos); el cual contenga como entradas las actividades

estandarizadas. Con base en este modelo de simulación se podría comparar la DMU más eficiente encontrada en esta investigación contra la misma DMU pero simulando las prácticas estandarizadas. Un resultado sería observar en qué porcentaje, si es que lo hubiera, mejoraría el desempeño actual observado para esta DMU. Como un producto secundario de esta extensión, se podría obtener el ahorro (en pesos mexicanos) de la implicación de estas posibles mejoras.

REFERENCIAS

- Arieu, A. (2004). Arieu, A. (2004). Eficiencia técnica comparada en elevadores de granos de Argentina , bajo una aplicación de análisis de envolvente de datos . La situación del puerto de Bahía Blanca . Consorcio de Gestión Del Puerto de Bahía Blanca.. Retrieved from https://www.academia.edu/35041522/Eficiencia_t%C3%A9cnica_comparada_en_el_elevadores_de_granos_de_Argentina_bajo_una_aplicaci%C3%B3n_de_an%C3%A1lisis_de_envolvente_de_datos._La_situaci%C3%B3n_del_puerto_de_Bah%C3%ADa_Blanca
- Bell, D. D. (2020). R programming: A step-by-step guide for absolute beginners-2nd edition. Independently Published. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=QrmZzQEACAAJ>
- Bogetoft, P., & Otto, L. (2011). Benchmarking with DEA, SFA, and R. Springer. Retrieved from <https://EconPapers.repec.org/RePEc:spr:isorms:978-1-4419-7961-2>
- Botero, J. H. (2005). Estimados del Costo de Reconstrucción de Edificios en Puerto Rico. Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (pp. 1-15). Colombia: Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 2 (6), 429-444. Retrieved from <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:ejores:v:2:y:1978:i:6:p:429-444>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2013). Supply Chain Management: Fifth Edition. In Supply Chain Management: Global Edition. Retrieved from https://base-logistique-services.com/storage/app/media/Chopra_Meindl_SCM.pdf
- Coll Serrano, V. & Blasco Blasco, O, M. (2006). Evaluacion de la eficiencia mediante el analisis envolvente de datos. Retrieved from https://www.uv.es/vcoll/libros/2006_evaluacion_eficiencia_DEA.pdf
- Conover, W. J. 1999. Practical Nonparametric Statistics, 3d ed. New York: Wiley.
- Dirección general del presupuesto público,lima. (2010, Junio 10). Microsoft Word - Instructivo para la Formulación de Indicadores de Desempeño. Retrieved from

- https://www.mef.gob.pe/contenidos/presupuesto_publico/normativa/Instructivo_Formulacion_Indicadores_Desempeno.pdf
- Efron, B. (1979). Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7 (1), 1 - 26. Retrieved from <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552> doi: 10.1214/aos/1176344552
- Efron, B., & Tibshirani, R.J. (1994). *An Introduction to the Bootstrap* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>
- Fernanda Villarreal, F. T. (2017, Septiembre 1). ScienceDirect. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0123592317300463>
- Fernández Santos, Y., & Flórez López, R. (2006). Aplicación del modelo dea en la gestión pública. Un análisis de la eficiencia de las capitales de provincia españolas. *Revista Iberoamericana de Contabilidad de Gestión*, 7, 165–202. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1985901>
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 120 (3), 253-290. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2343100>
- Gastaldi, C., Urrea, M., & Fern, P. (1998). Teoría de la Decisión: Contribuciones de von Neumann. *Divulgaciones Matemáticas*, 6(1), 37–42.
- Gómez Ramírez, D. M. (2017). Evaluación de las capacidades de logística humanitaria para la atención de desastres naturales en la red de ayuda humanitaria. El caso de Manizales. (Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial). Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60302>
- Hawdon, D. (2003). Efficiency, performance and regulation of the international gas industry a bootstrap dea approach. *Energy Policy*, 31 (11), 1167-1178. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421502002185> (Themes in current Asian energy) doi: [https://doi.org/10.1016/S03014215\(02\)00218-5](https://doi.org/10.1016/S03014215(02)00218-5)
- Holguín-Veras, J., Jaller, M., & Wachtendorf, T. (2012). Comparative performance of alternative humanitarian logistic structures after the Portau-Prince earthquake: ACEs, PIEs, and CANs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46 (10), 1623-

1640. Retrieved from <https://ideas.repec.org/a/eee/transa/v46y2012i10p1623-1640.html> doi: 10.1016/j.tra.2012.08.002
- Hollander, M., & Wolfe, D. A. (1999). *Nonparametric statistical methods* (2nd ed.). New York: Wiley. Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Y5s3AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP10&dq=Hollander,+M.,+%26+Wolfe,+D.+A.+\(1999\).+Nonparametric+statistical+methods+\(2nd+ed.\).+312+New+York:+Wiley.&ots=a_iXj39jyR&sig=Xqobcpv8wPkf3D3K_GF4eSvjDTQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Y5s3AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP10&dq=Hollander,+M.,+%26+Wolfe,+D.+A.+(1999).+Nonparametric+statistical+methods+(2nd+ed.).+312+New+York:+Wiley.&ots=a_iXj39jyR&sig=Xqobcpv8wPkf3D3K_GF4eSvjDTQ#v=onepage&q&f=false)
- INEGI. (2020). Marco geostadístico, tipo @ONLINE. Retrieved 2021-05-05, from <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/Descargas>
- INEGI. (2015). Cuéntame, tipo @ONLINE. Retrieved from <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/densidad.aspx?tema=P#:~:text=En%20contraste%2C%20la%20Ciudad%20de,5%20967%20hab%2Fkm2.>
- INEGI. (2014). censo de escuelas, maestros y alumnos de educación básica y especial 2013. Recuperado el 15 de Noviembre de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/sistemas/mapa/atlas/Reporte.aspx?i=es#tabCentrosTrabajo>
- Jesús A. Miguel Álvarez, t. O., Pilar Olave Rubio. (2000, Junio). Metodología bootstrap en series heterocedásticas. una aplicación al ibex35 (Vol. 234). Retrieved from <https://www.asepelt.org/ficheros/File/Anales/2000%20%20Oviedo/Trabajos/PDF/2006.pdf>
- Joaquín Amat Rodrigo, t. O. (2016). Kruskal-wallis test. alternativa no paramétrica al anova independiente. Retrieved 2021-08-23, from https://rpubs.com/Joaquin_AR/219504#:~:text=E1%20test%20de%20Kruskal%20Wallis,para%20m%C3%A1s%20de%20dos%20grupos.&text=Bajo%20ciertas%20simplificaciones%20puede%20considerarse,Kruskal%20Wallis%20compara%20las%20medianas.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952, 2021/05/09/). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47 (260), 583-621. Retrieved from <https://doi.org/10.2307/2280779> (Full publication date: Dec.,1952)

- LUA, E. G. (2015). Localización de un almacén de abastecimiento para la atención de desastres en el estado de Guerrero. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martín, J., & Román, C. (2001, 05). An application of DEA to measure the efficiency of Spanish airports prior to privatization. *Journal of Air Transport Management*, 7, 149-157. doi: 10.1016/S0969-6997(00)00044-2
- Organización Panamericana de la Salud. (1999). Asistencia Humanitaria en Caso de Desastres - Guía para Proveer Ayuda Eficaz. Retrieved from <http://helid.digicollection.org/es/p/printable.html>
- Ortega, M. G. (2016). Plan de emergencias en caso de sismo. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Enfermería y Obstetricia.
- Pablo J. Ceballos-Parra, W. A. (2018). Un Análisis Bibliométrico de las Tendencias en Logística Humanitaria. Un Análisis Bibliométrico de las Tendencias en Logística Humanitaria. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación-Colciencias, Colombia.
- Policonomics Economics made simple, t. O. (2020). Isocuanta. Retrieved 2021-08-23, from <https://policonomics.com/es/isocuanta/scientific-european-federation-osteopaths>, t. O. (2021). Algunas pruebas no paramétricas. Retrieved 2021-08-23, from <https://www.scientific-european-federation-osteopaths.org/estadisticas/>
- privado, o. d. (2020, 06 23). Mapa de reconstrucción escolar. Retrieved from <http://reconstruccion.mejoratuescuola.org/>
- Restrepo, M., & Villegas, J. (2013, 08 10). Microsoft Word - Restrepo&Villegas Dea en Matlab300707.doc. Retrieved from <https://juangvillegas.files.wordpress.com/2013/08/restrepo-villegas-dea.pdf>
- Ramírez, D. M. (2017). Evaluación de las capacidades de logística humanitaria para la atención de desastres naturales en la red de ayuda humanitaria. El caso de Manizales. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Simar, L., & Wilson, P. (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44 (1), 49-61. Retrieved from <https://EconPapers.repec.org/RePEc:inm:ormnsc:v:44:y:1998:i:1:p:49-61>

- Simar, L., & Wilson, P. (2000). A general methodology for bootstrapping in non-parametric frontier models. *Journal of Applied Statistics*, 27 (6), 779-802. Retrieved from <https://ideas.repec.org/a/taf/japsta/v27y2000i6p779-802.html>
doi: 10.1080/02664760050081951
- Toloo, M. (2012). On finding the most bcc-efficient dmu: A new integrated mipdea model. *Applied Mathematical Modelling*, 36 (11), 5515-5520. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X11007621>
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.074>
- UNAM. (2020, Julio 1). Servicio Sismológico Nacional. Retrieved from <http://www.ssn.unam.mx/>
- Üstün, A. K. (2016, Feb 01). Evaluating Istanbul's disaster resilience capacity by Data Envelopment Analysis. *Natural Hazards*, 80 (3), 1603-1623. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2041-y> doi: 10.1007/s11069 -015-2041-y
- Üstün, A. K., & Barbarosoğlu, Üstün, A. K., & Barbarosoğlu, G. (2015, Jan 01). Performance evaluation of Turkish disaster relief management system in 1999 earthquakes using data envelopment analysis. *Natural Hazards*, 75(2), 1977–1996. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1407-x>
- Van Wassenhove, L., & Pedraza-Martinez, A. (2010, 11). Using or to adapt supply chain management best practice to humanitarian logistics. *International Transactions in Operational Research*, 19 . doi:10.1111/j.1475-3995.2010.00792.x

ANEXOS

Anexo 1: Gráficas de entradas y salidas por nivel educativo asociadas al grupo 2 y 4

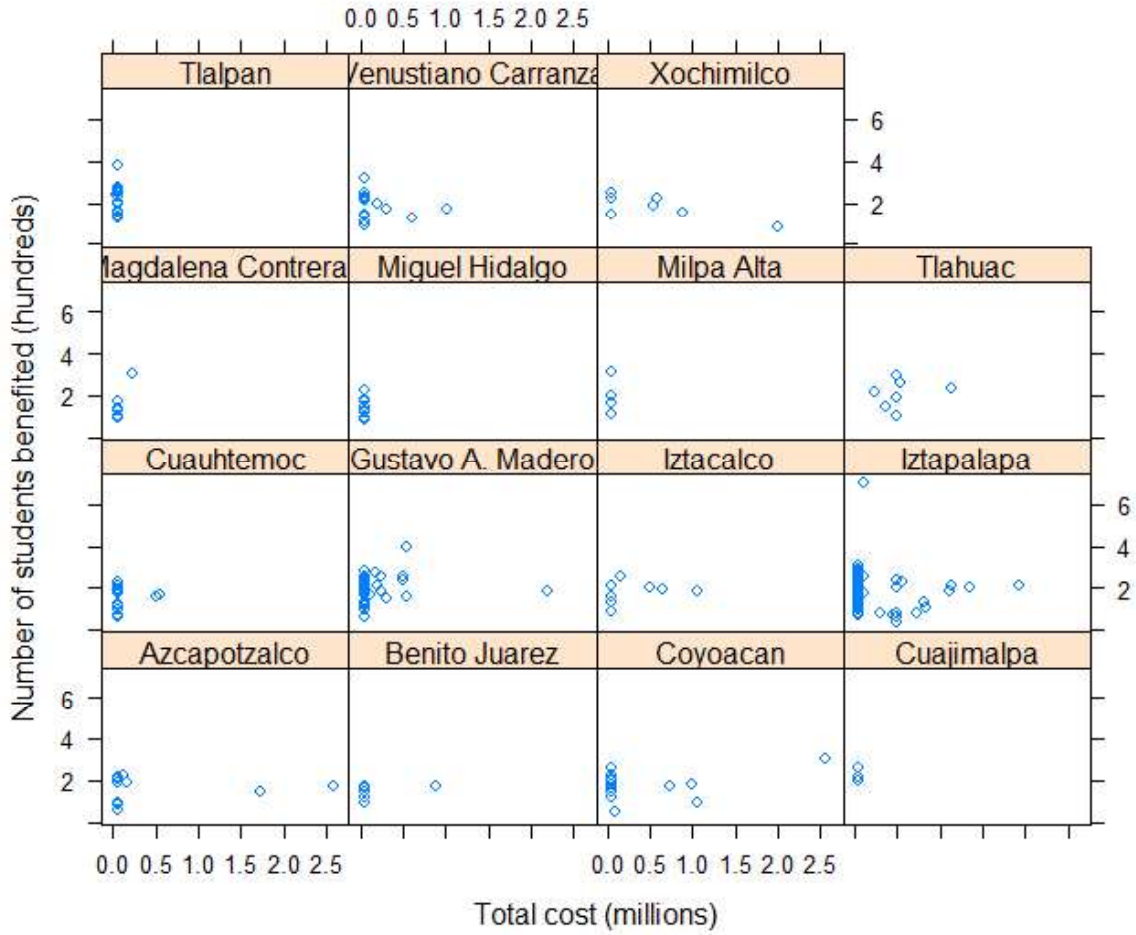


Figura 3.2 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 2, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

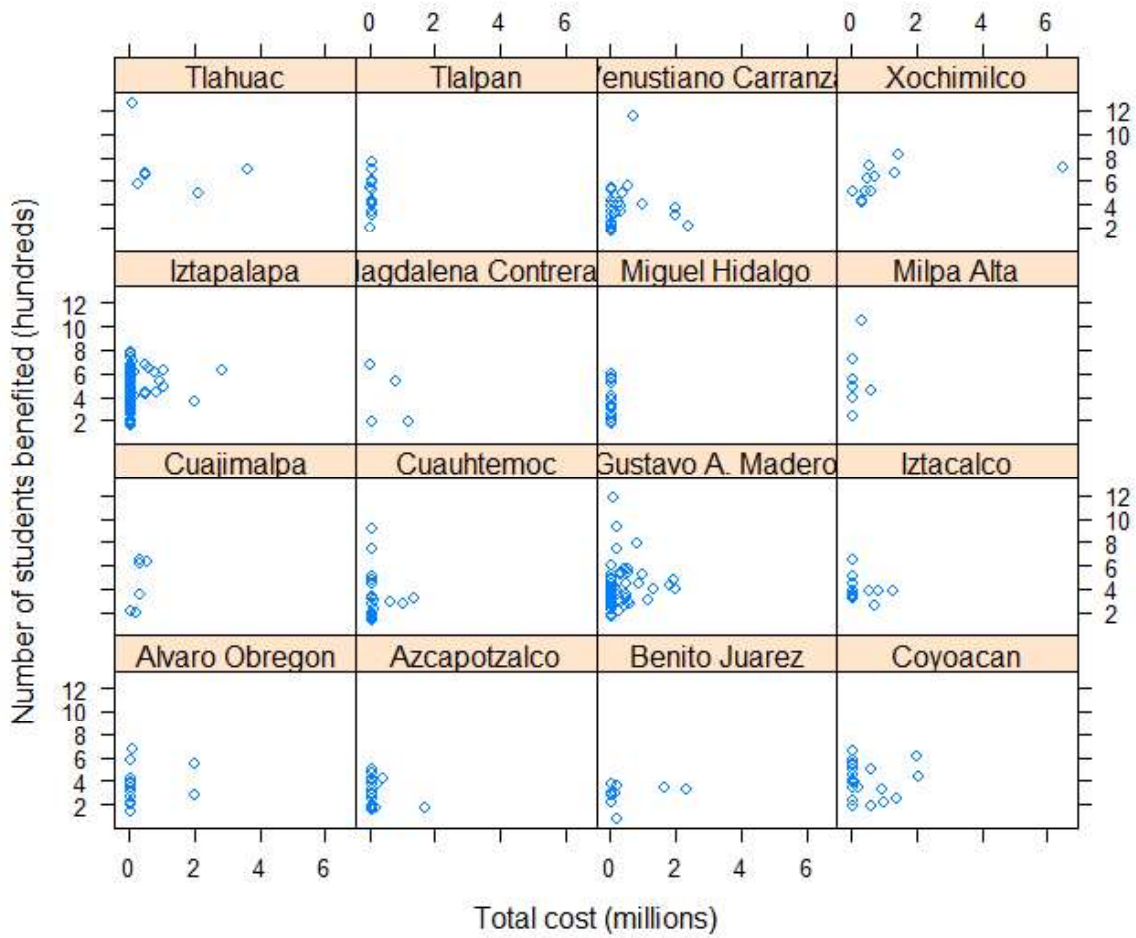


Figura 3.3 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 2, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

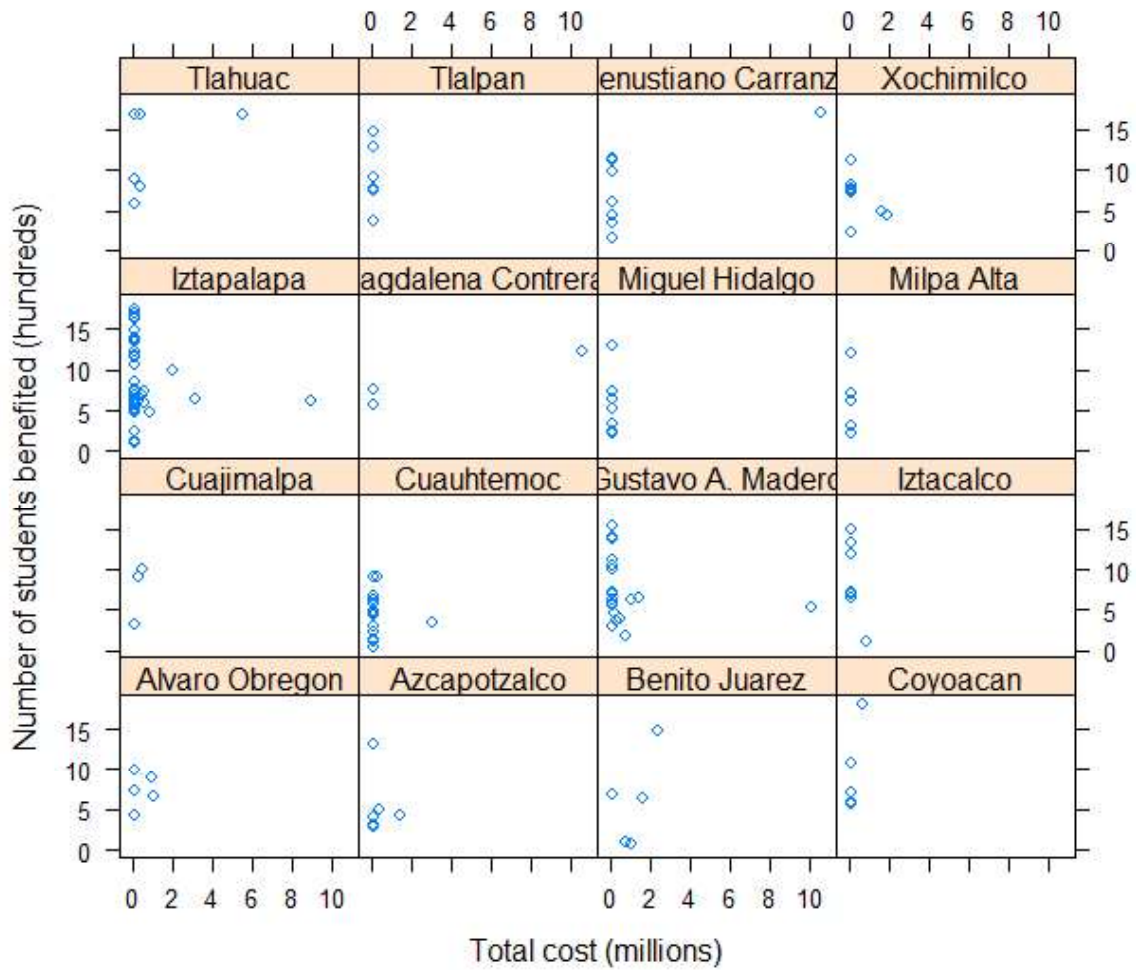


Figura 3.4 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

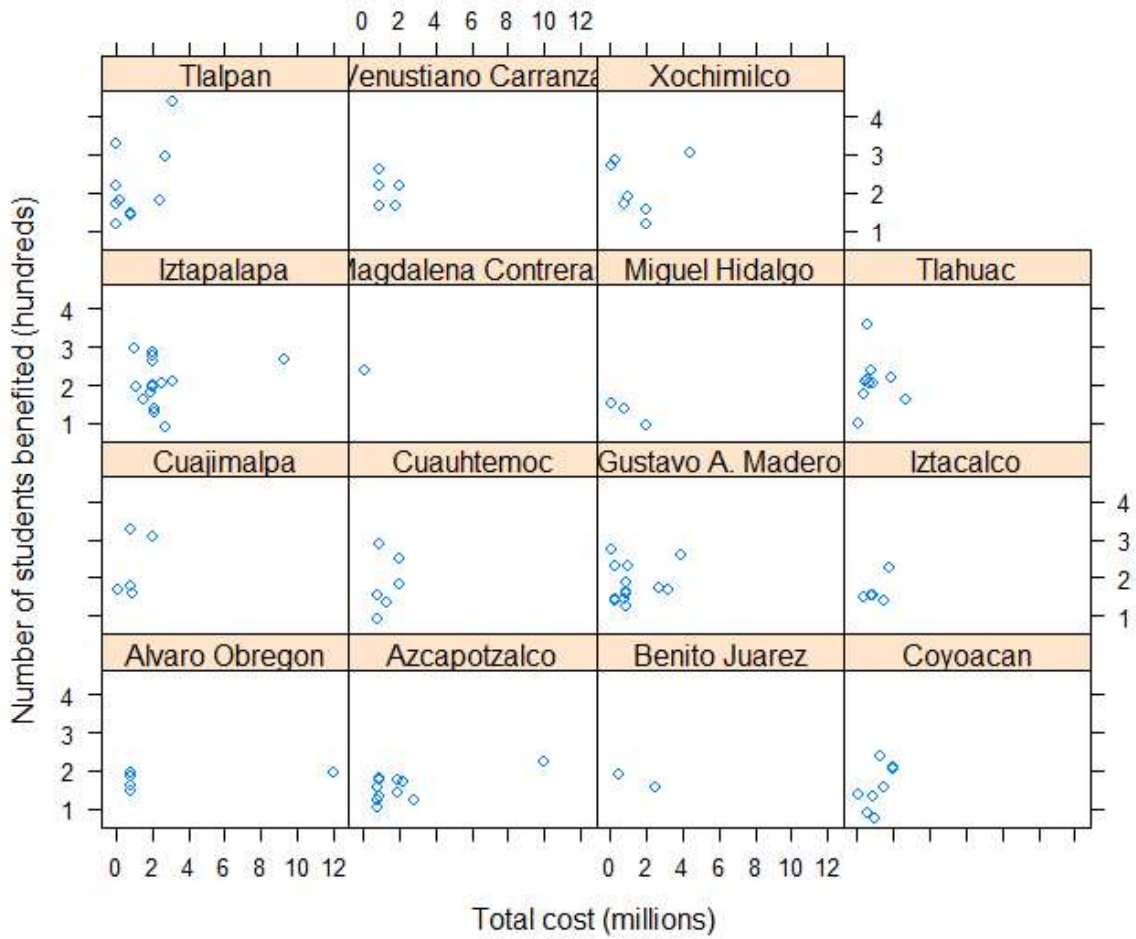


Figura 3.5 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 4, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

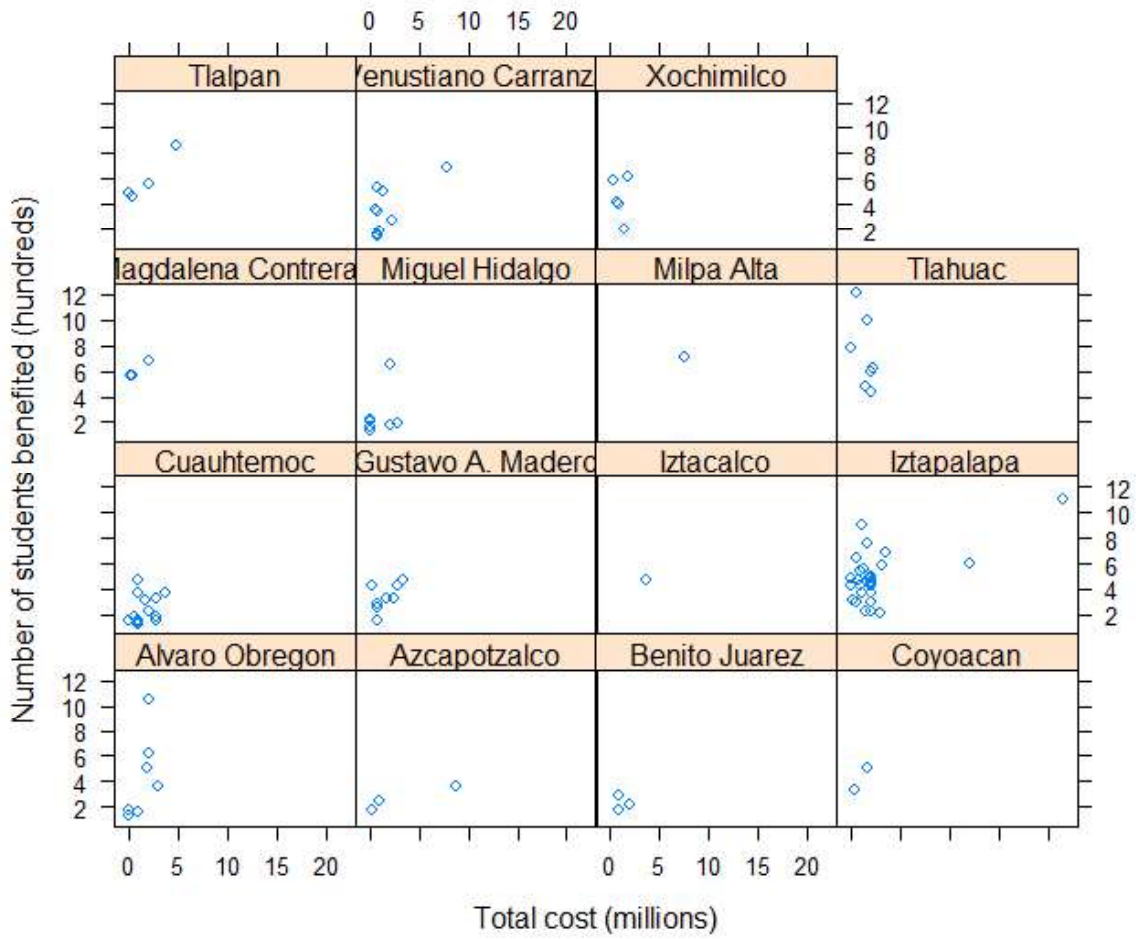


Figura 3.6 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 4, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

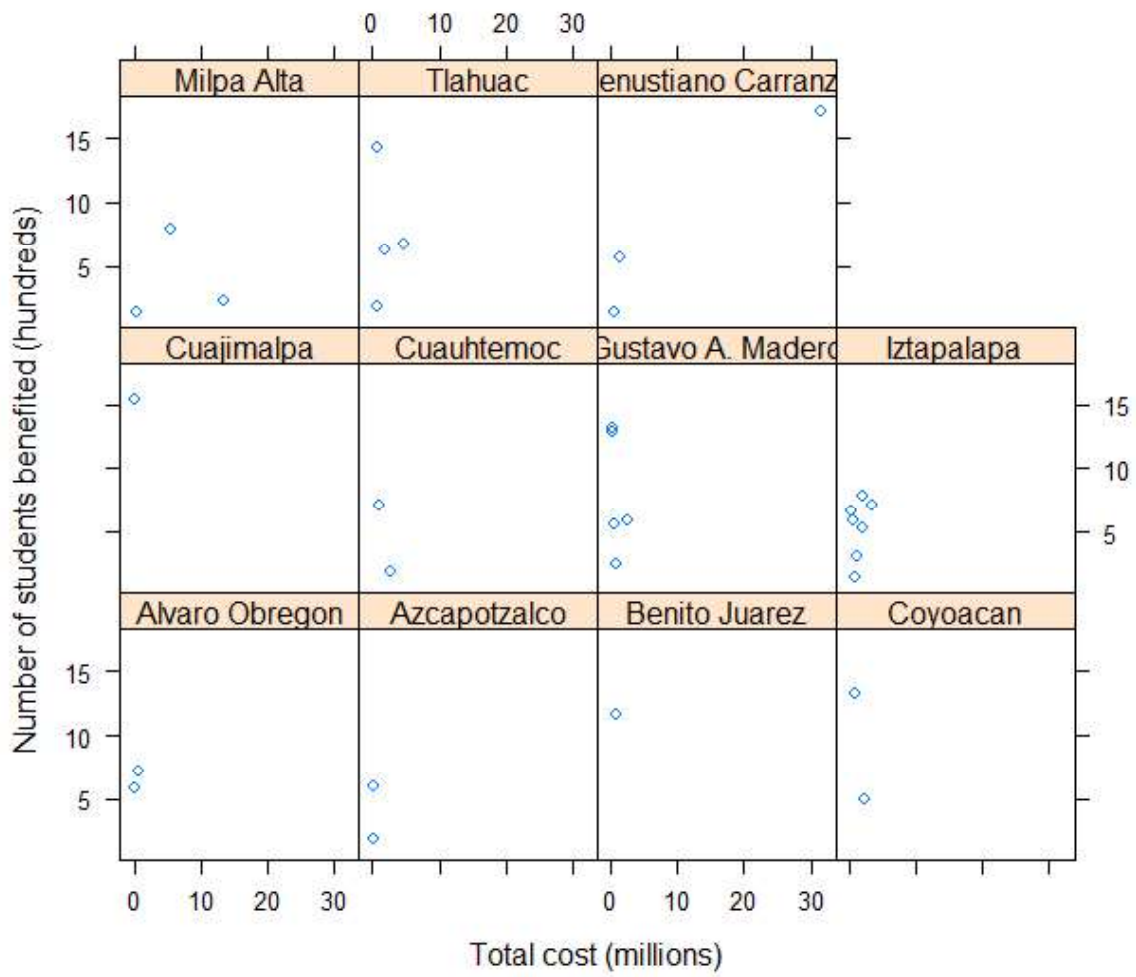


Figura 3.7 Costo vs alumnos beneficiados (grupo 4, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Gráficas de la eficiencia de todas las escuelas de los tres niveles educativos asociadas al grupo 2

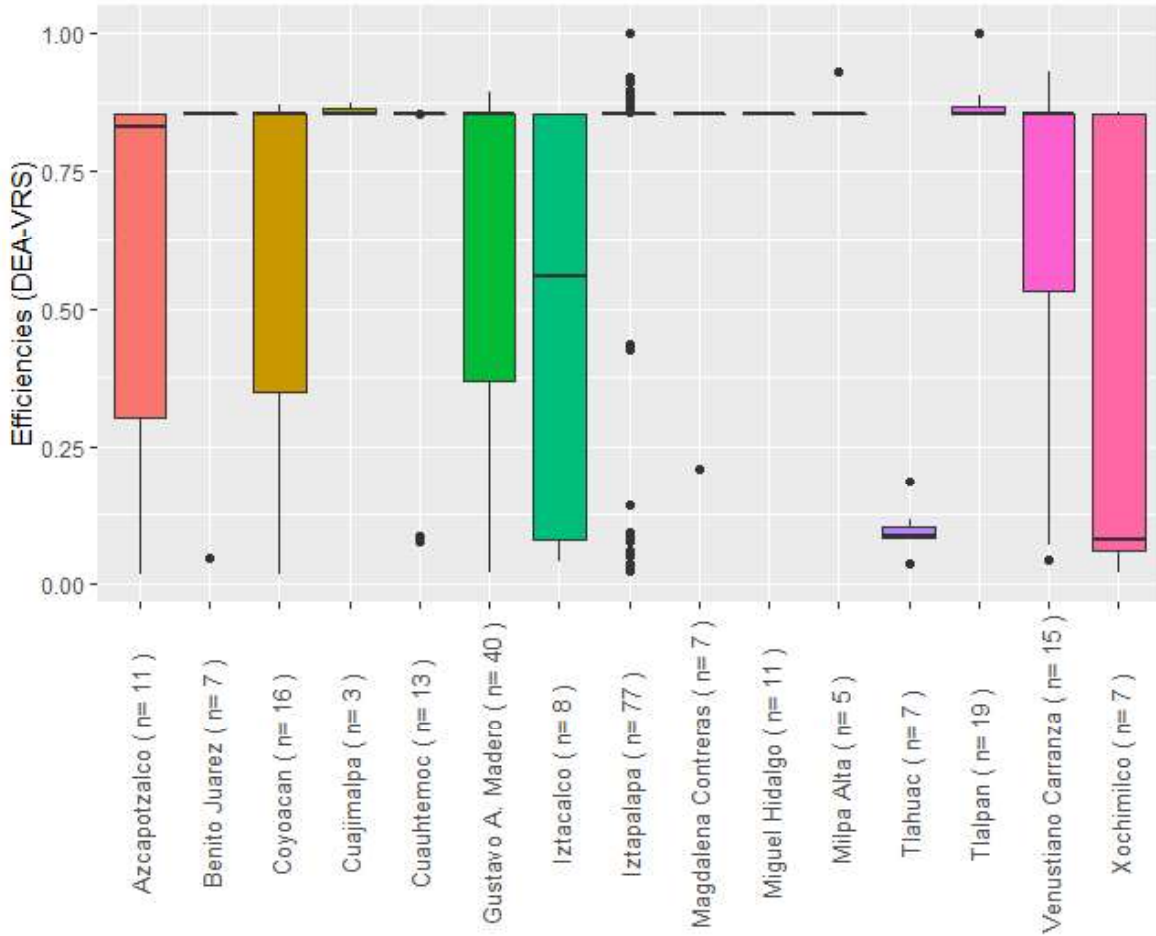


Figura 4.1 Eficiencias de las DMUs - alcaldías - (grupo 2, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

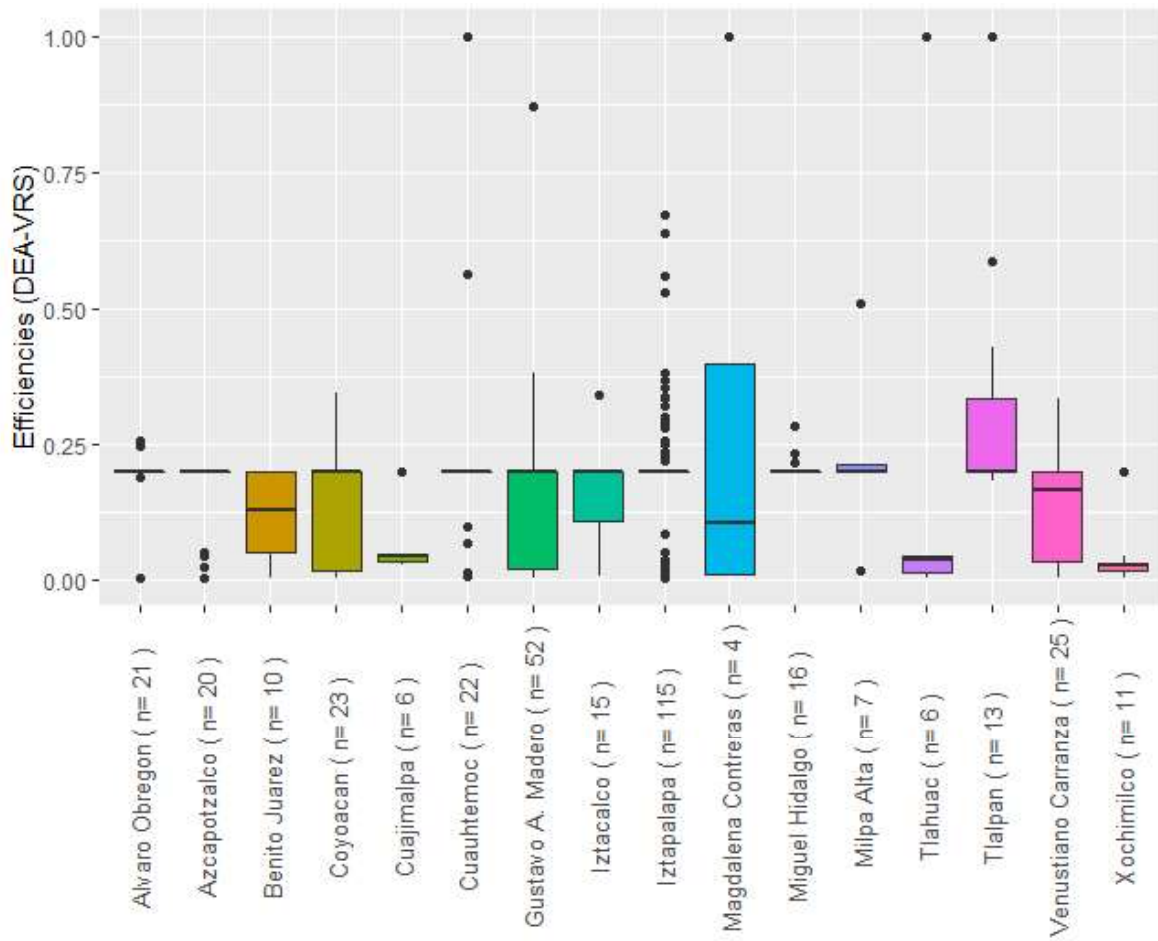


Figura 4.3 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 2, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

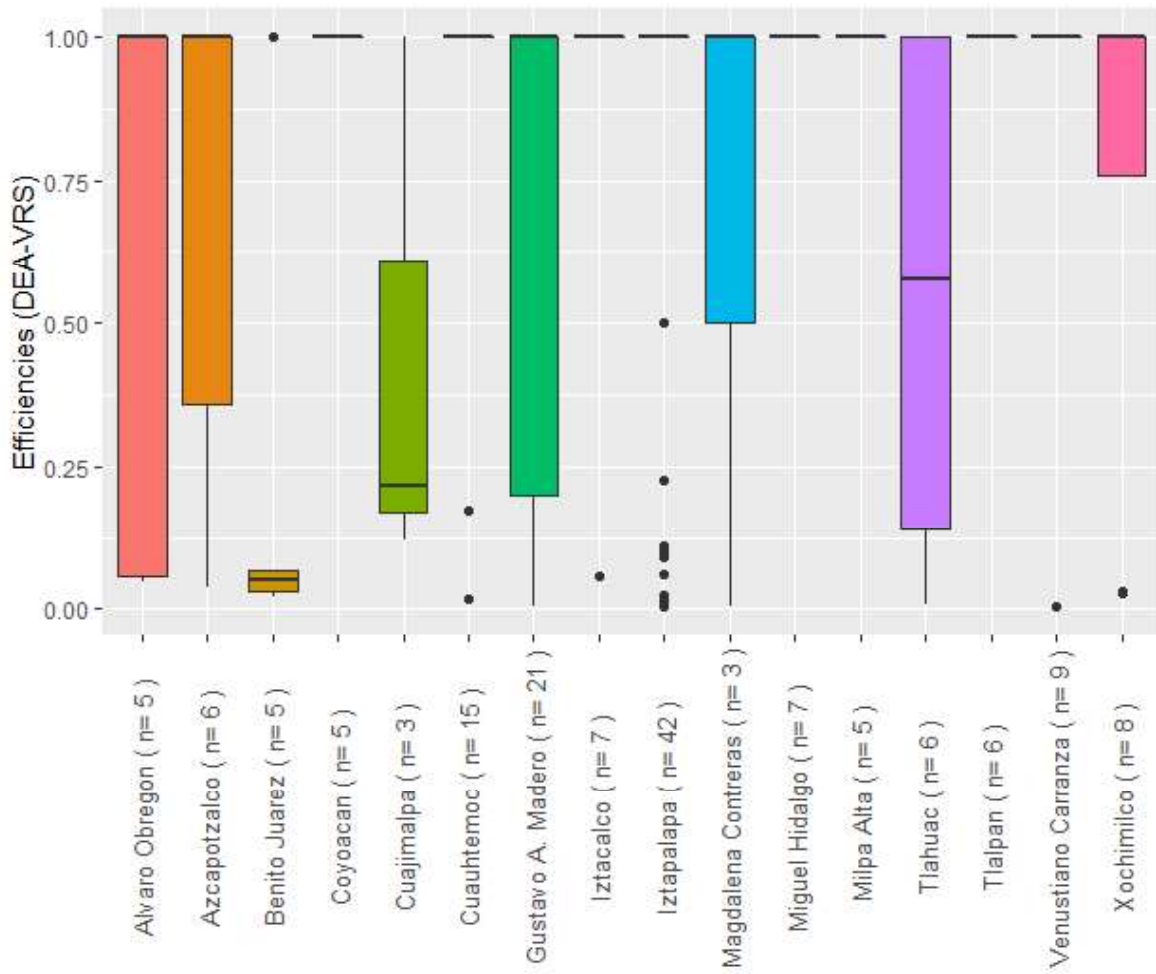


Figura 4.5 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

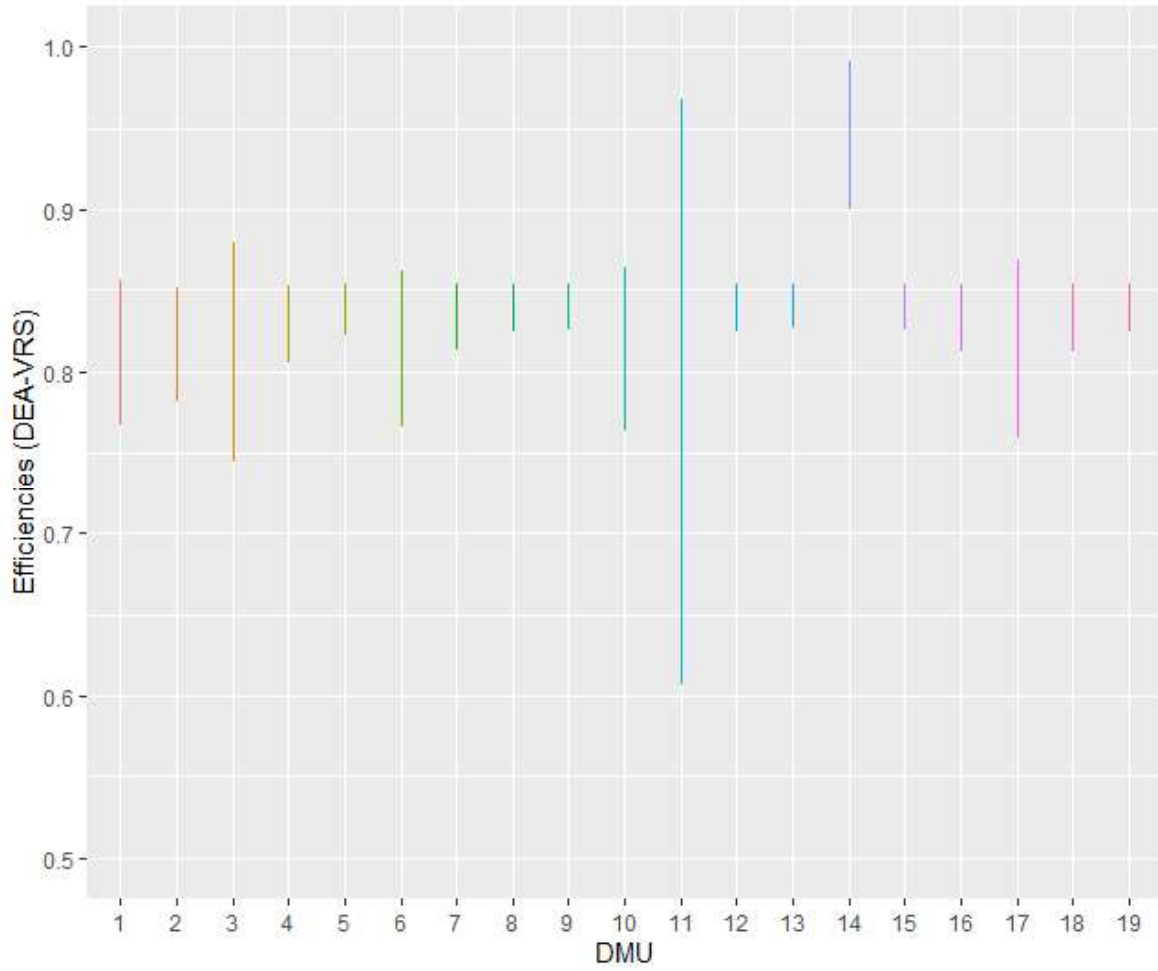


Figura 3.23 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 2, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

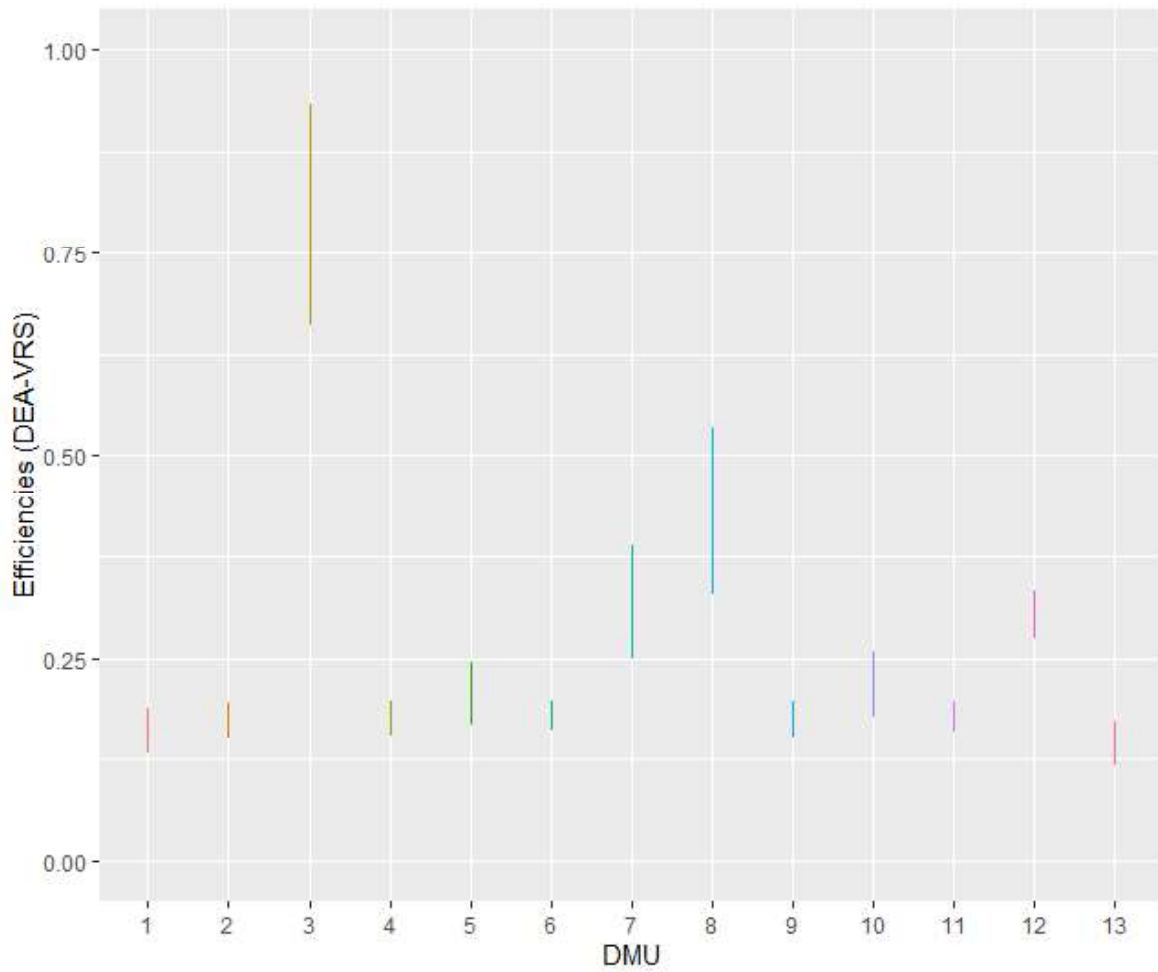


Figura 3.25 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 2, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

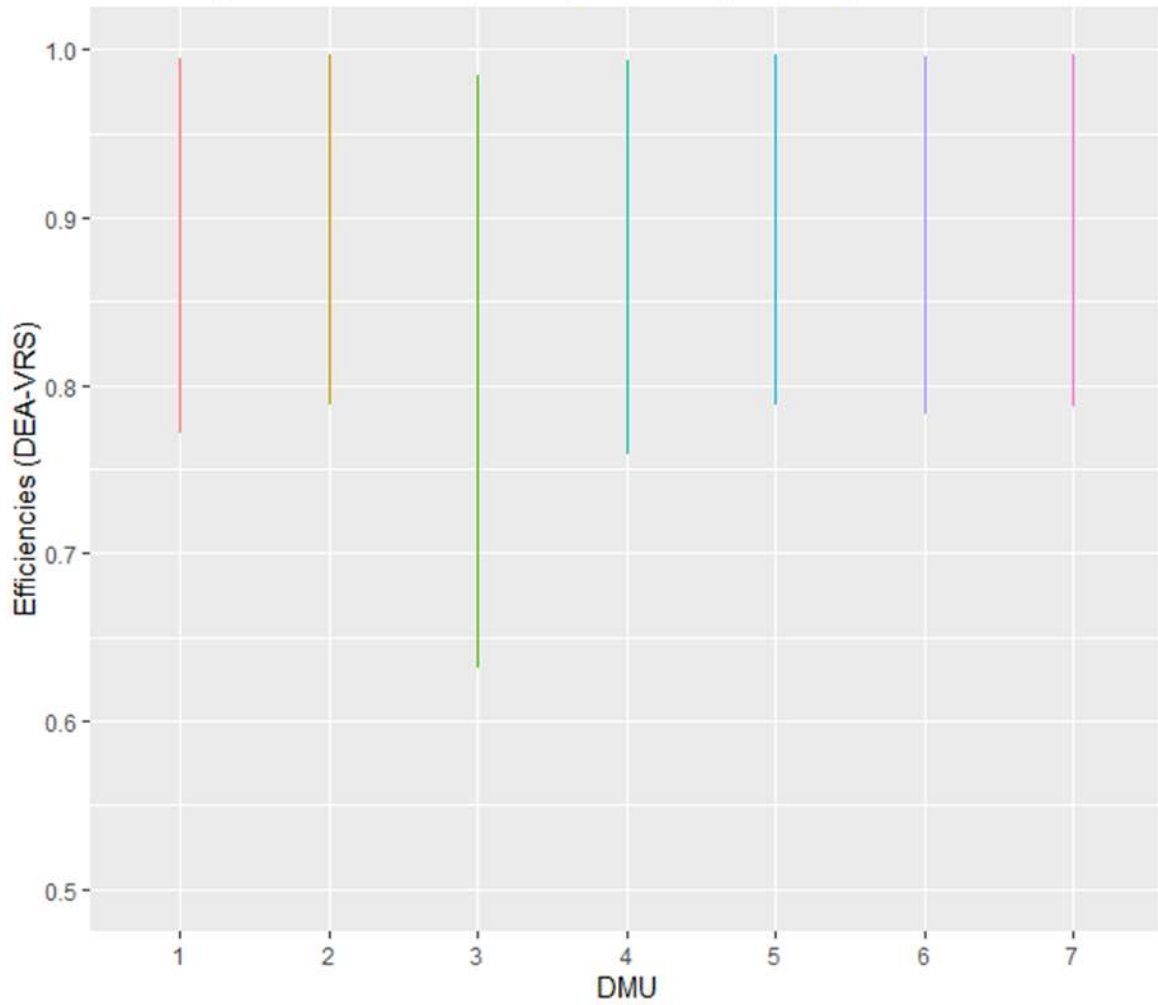


Figura 3.27 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

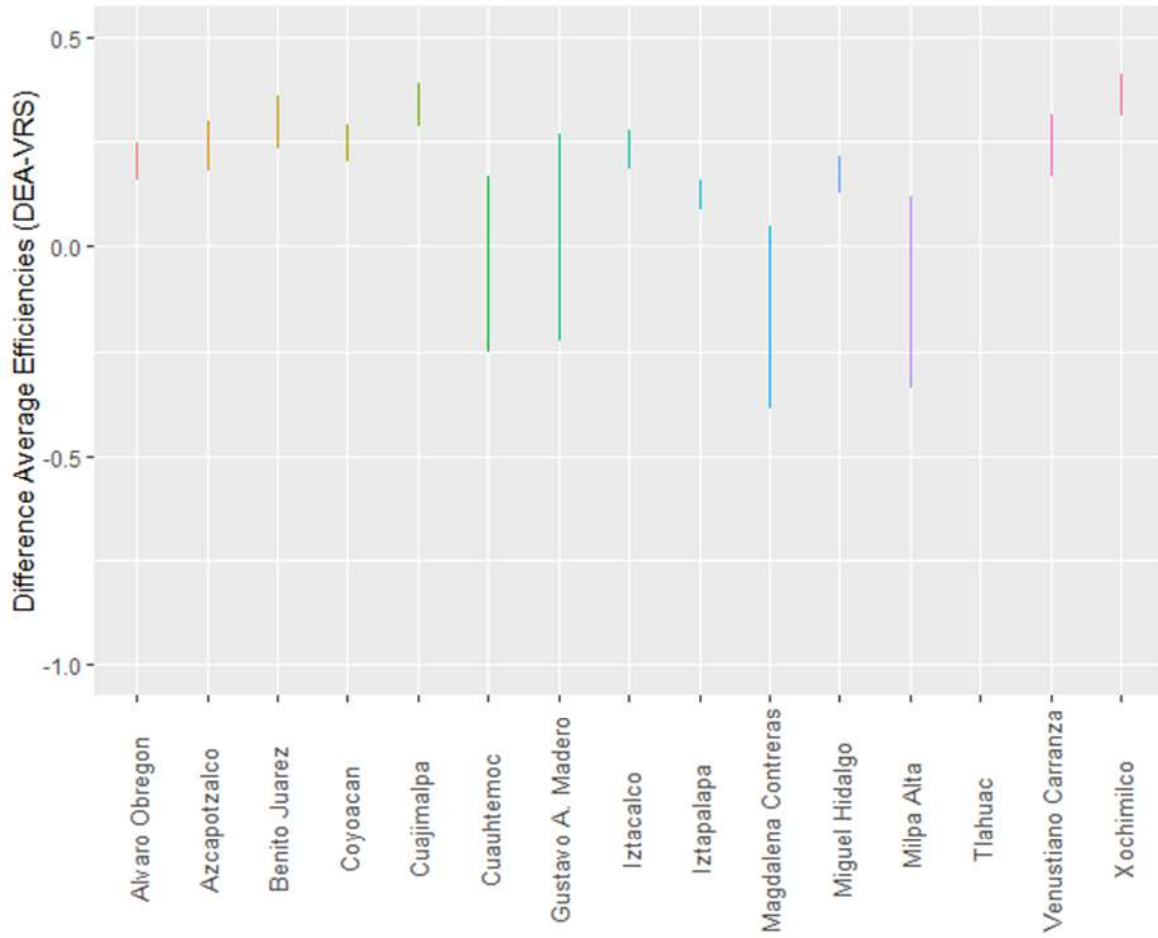


Figura 4.9 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

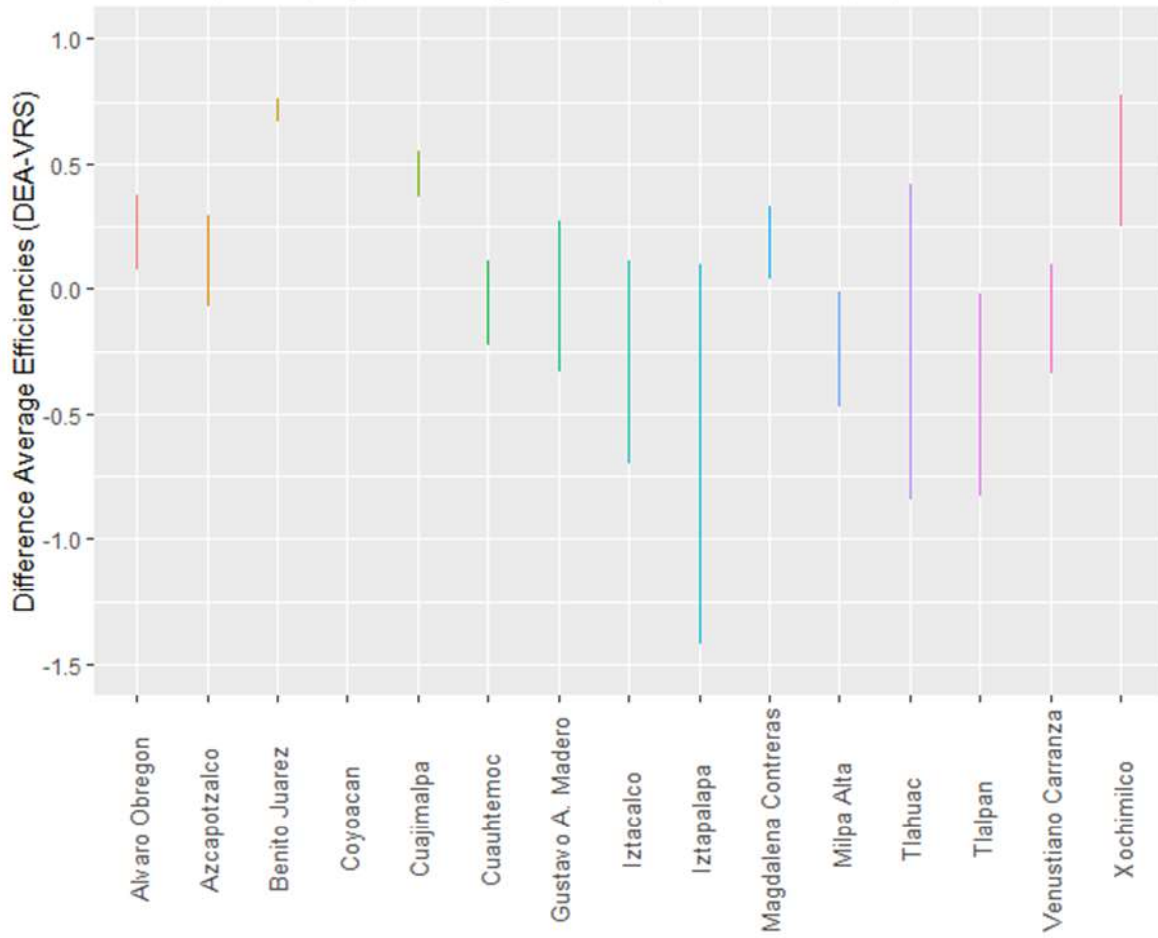


Figura 4.10 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Gráficas de la eficiencia de todas las escuelas de los tres niveles educativos asociadas al grupo 4

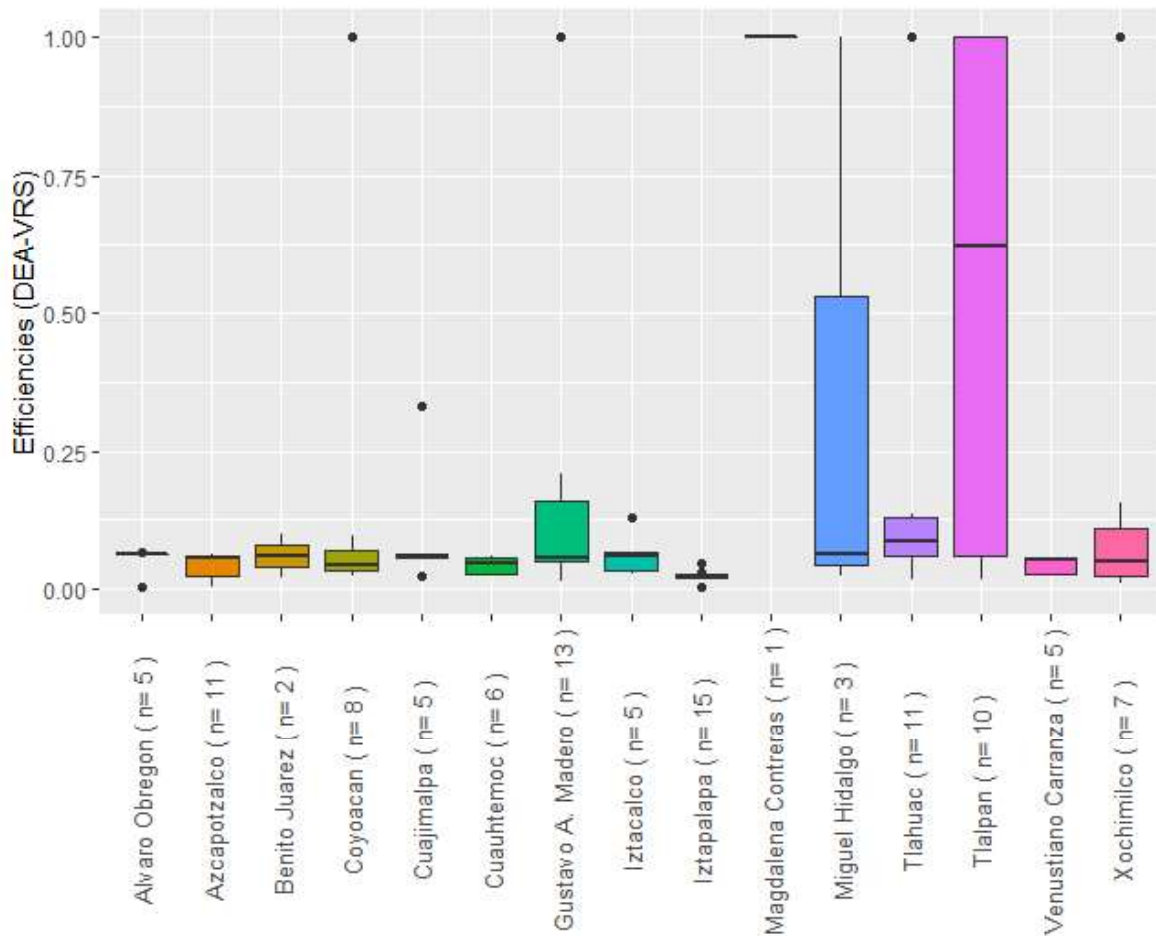


Figura 4.2 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 4, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

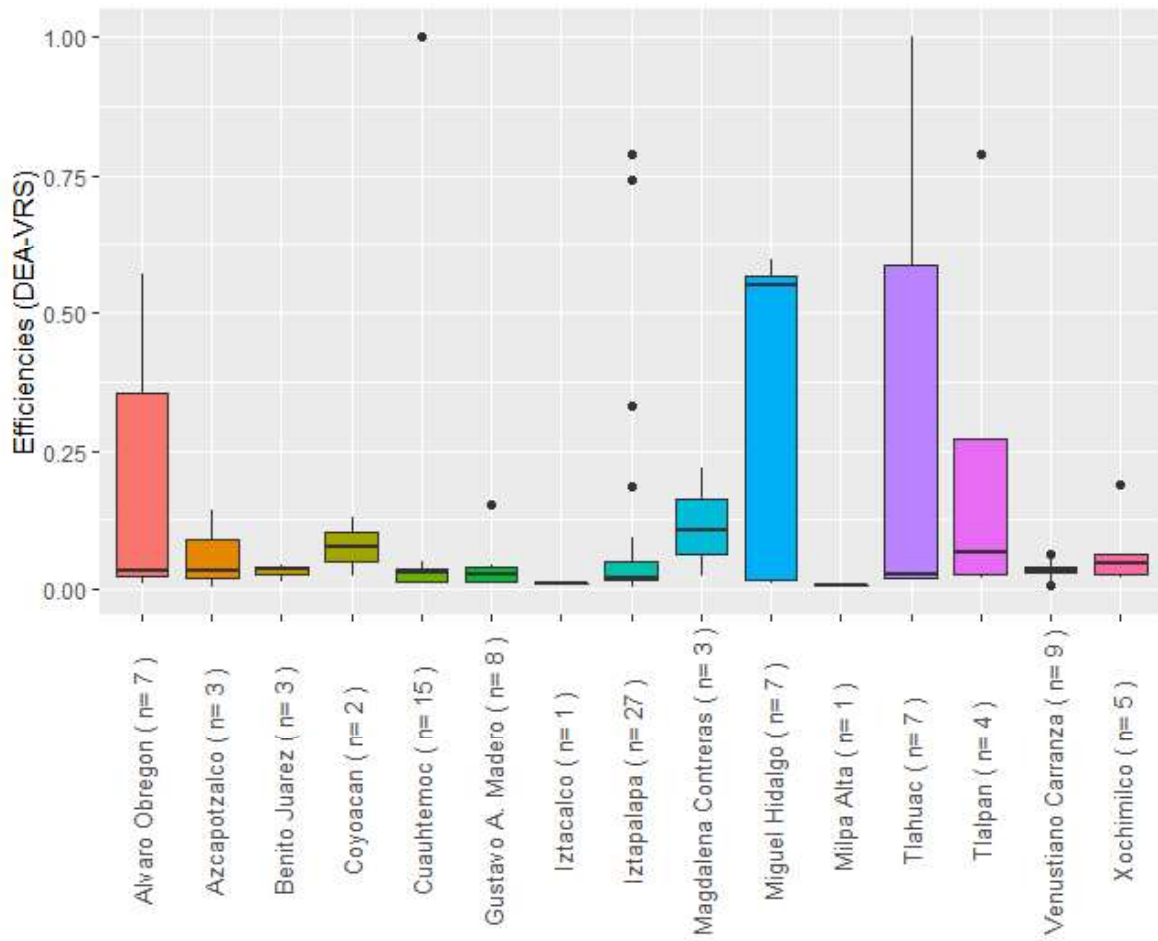


Figura 4.4 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 4, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

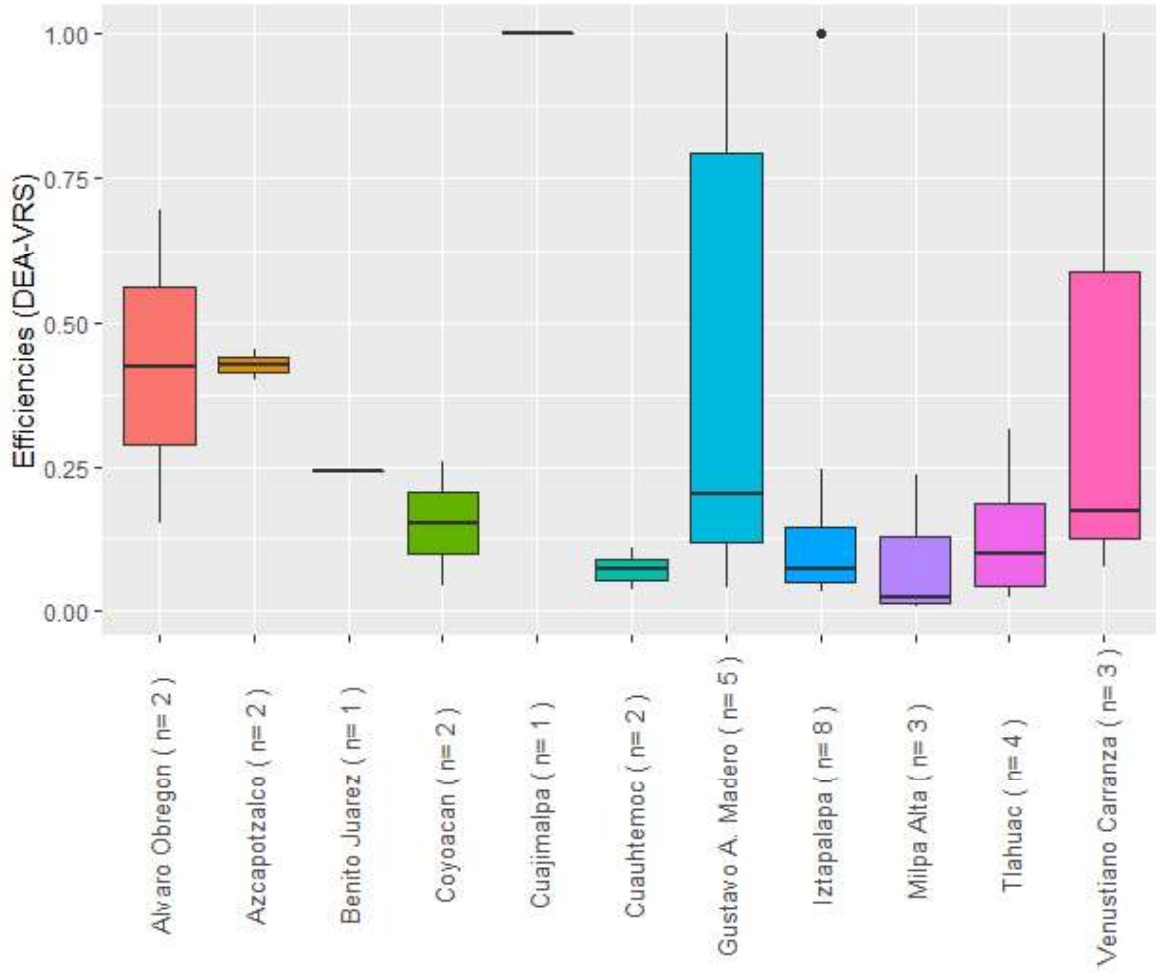


Figura 4.6 Eficiencias de las DMUs – alcaldías - (grupo 4, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

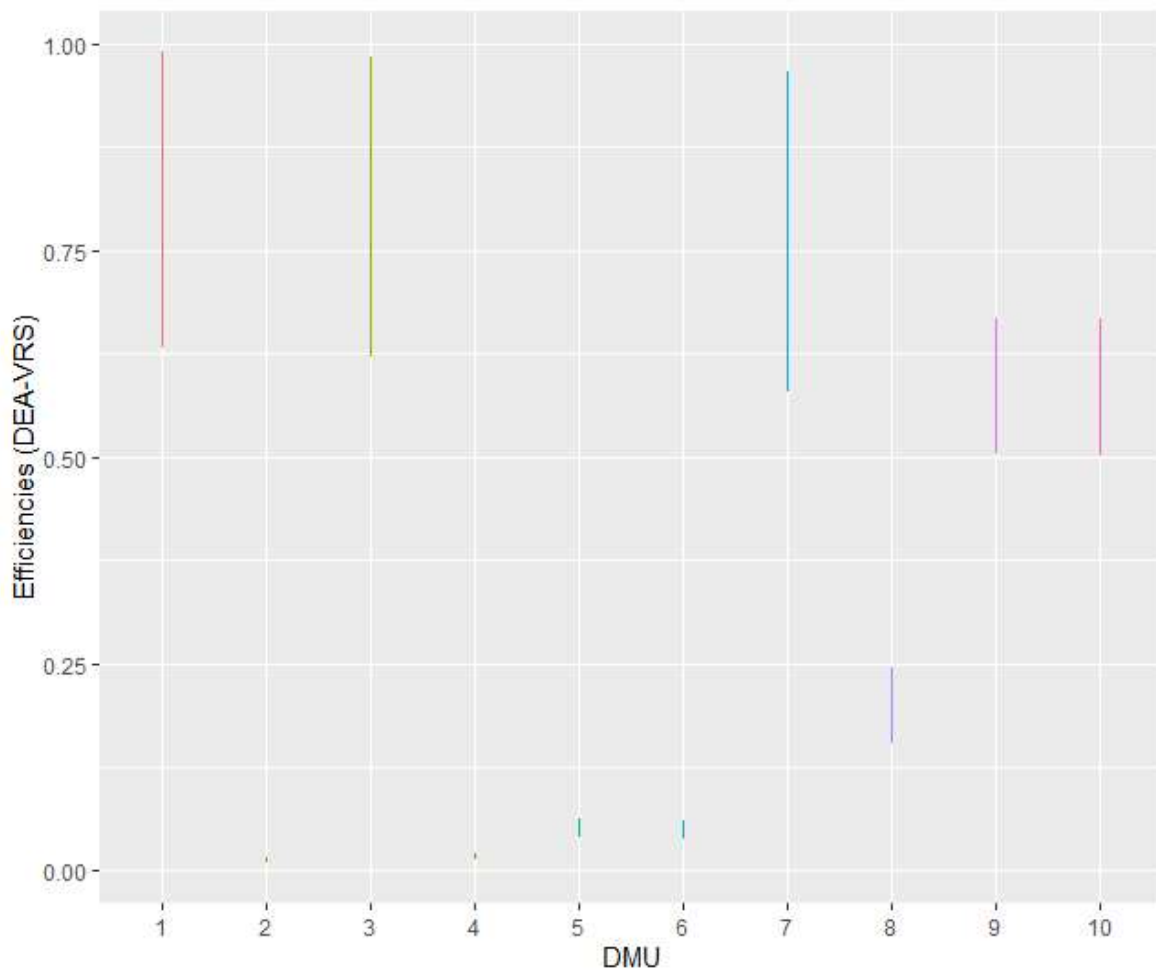


Figura 3.24 Eficiencias de las DMUs en Tlalpan (grupo 4, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

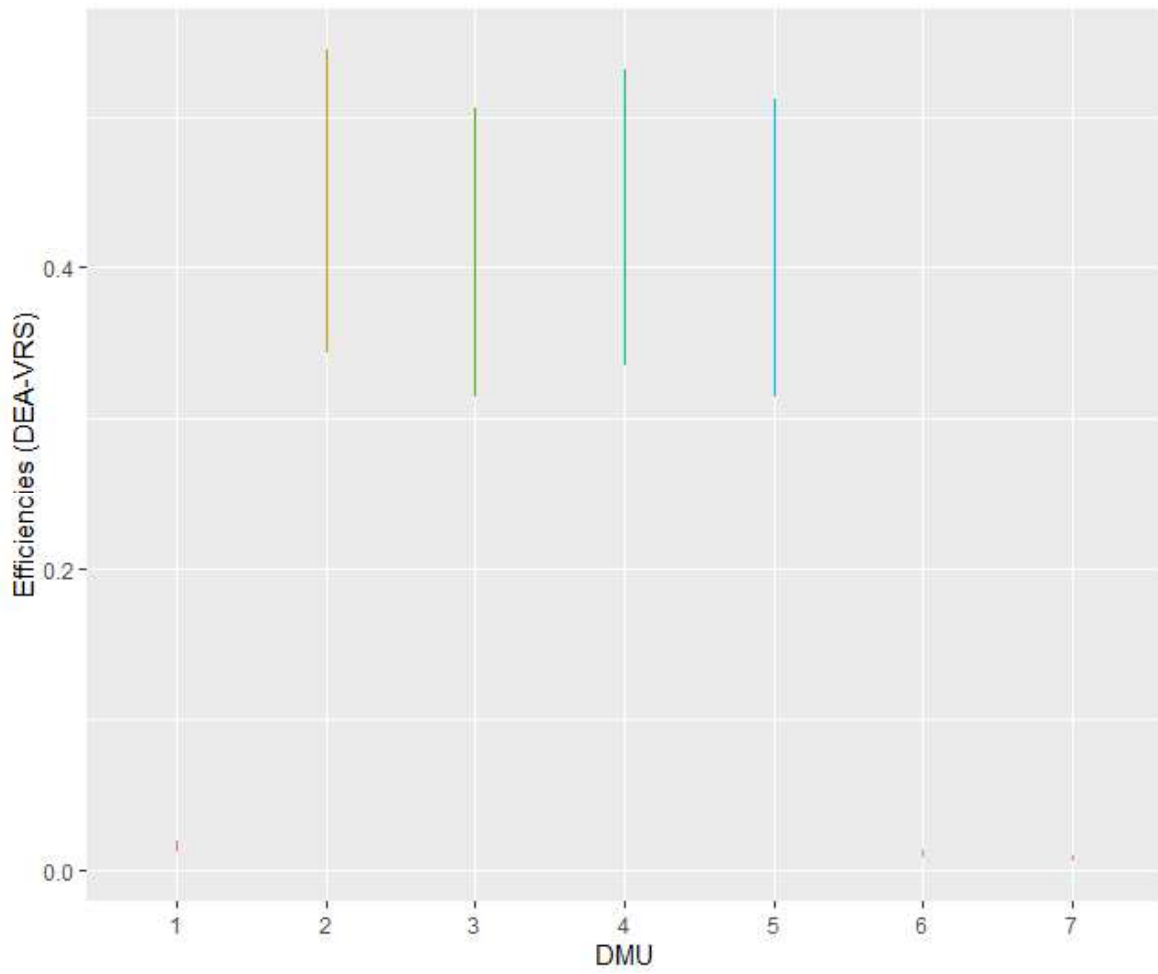


Figura 3.26 Eficiencias de las DMUs en Miguel Hidalgo (grupo 4, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

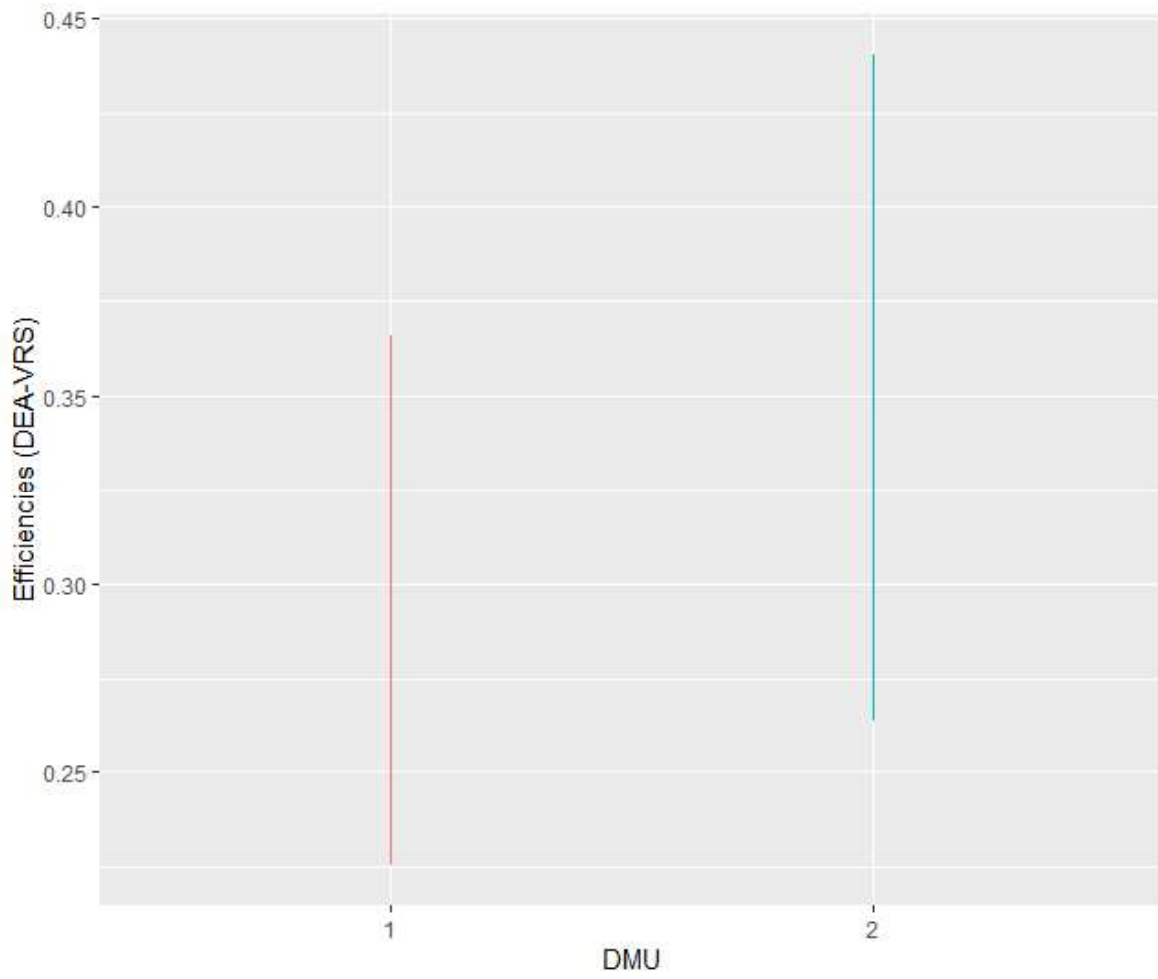


Figura 3.28 Eficiencias de las DMUs en Azcapotzalco (grupo 4, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

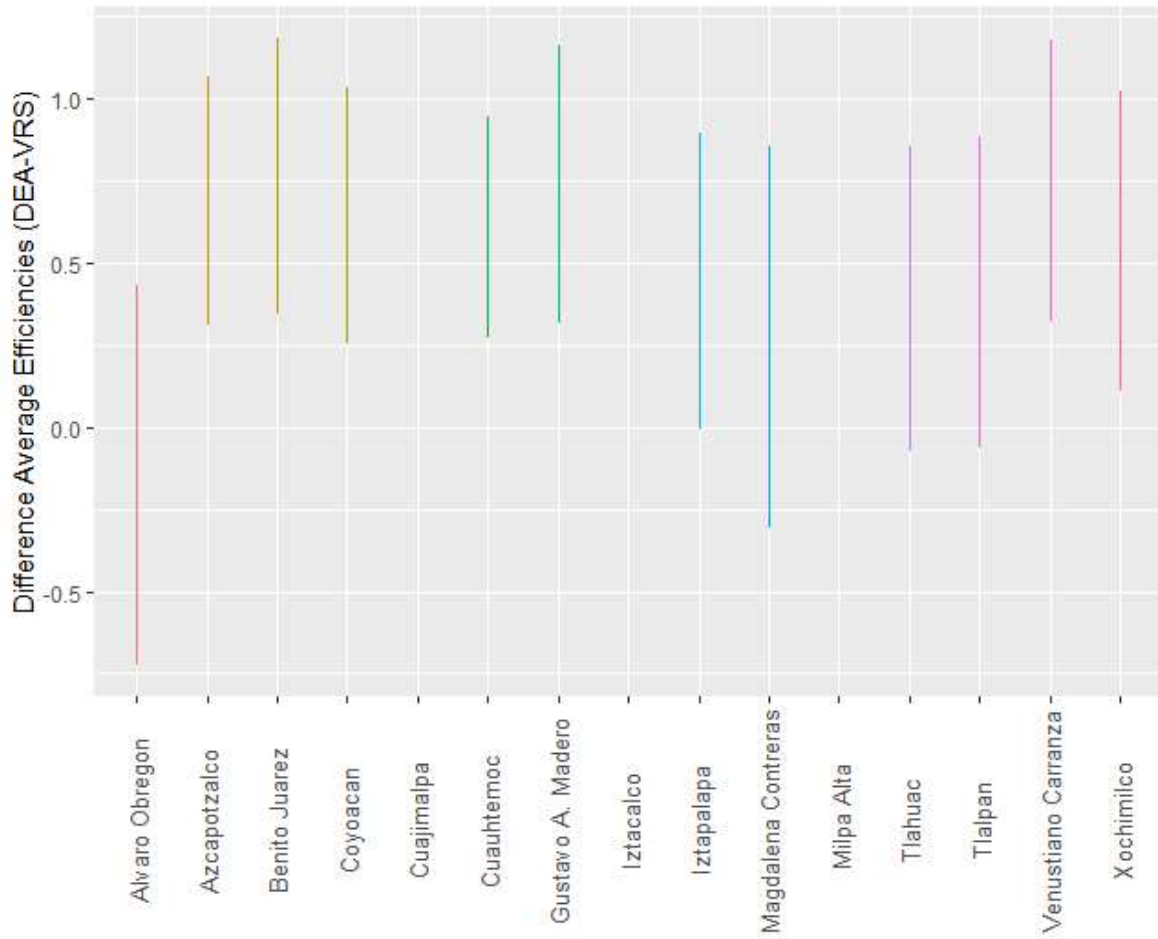


Figura 4.17 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel Primaria).

Fuente: Elaboración propia.

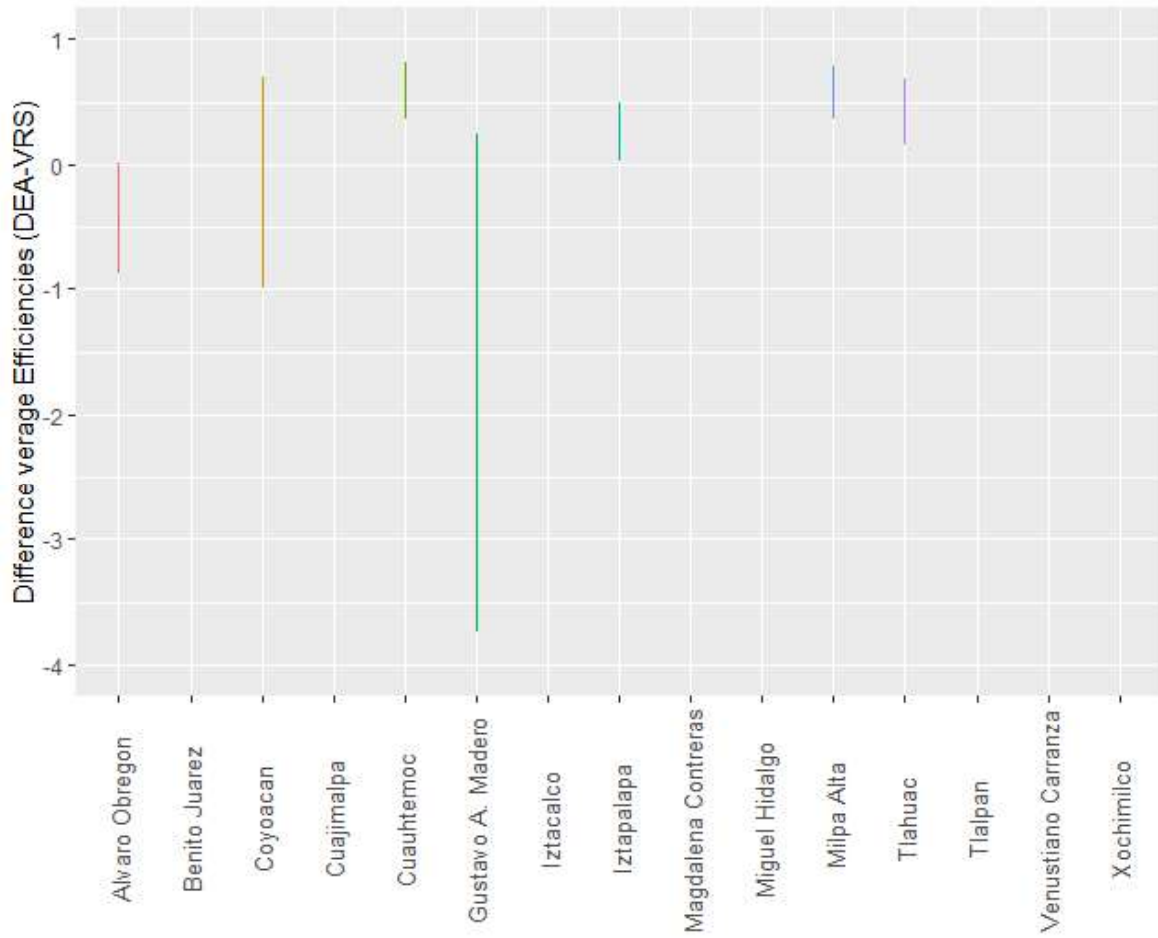


Figura 4.18 Intervalos de confianza Bootstrap al 95% para las diferencias de eficiencias promedio (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Retornos a escala de todas las escuelas de los tres niveles educativos asociadas al grupo 2 y 4

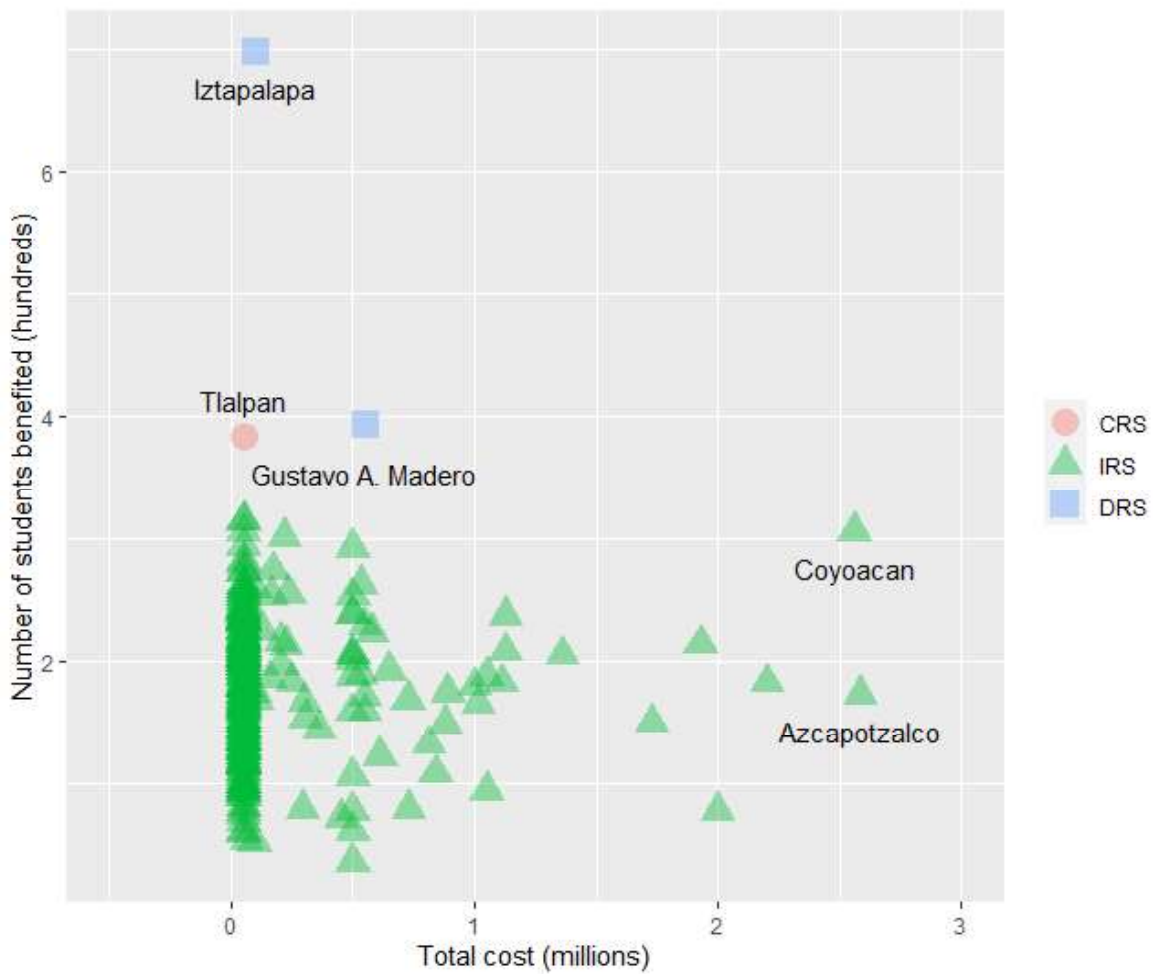


Figura 4.11 Retornos a escala (grupo 2, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

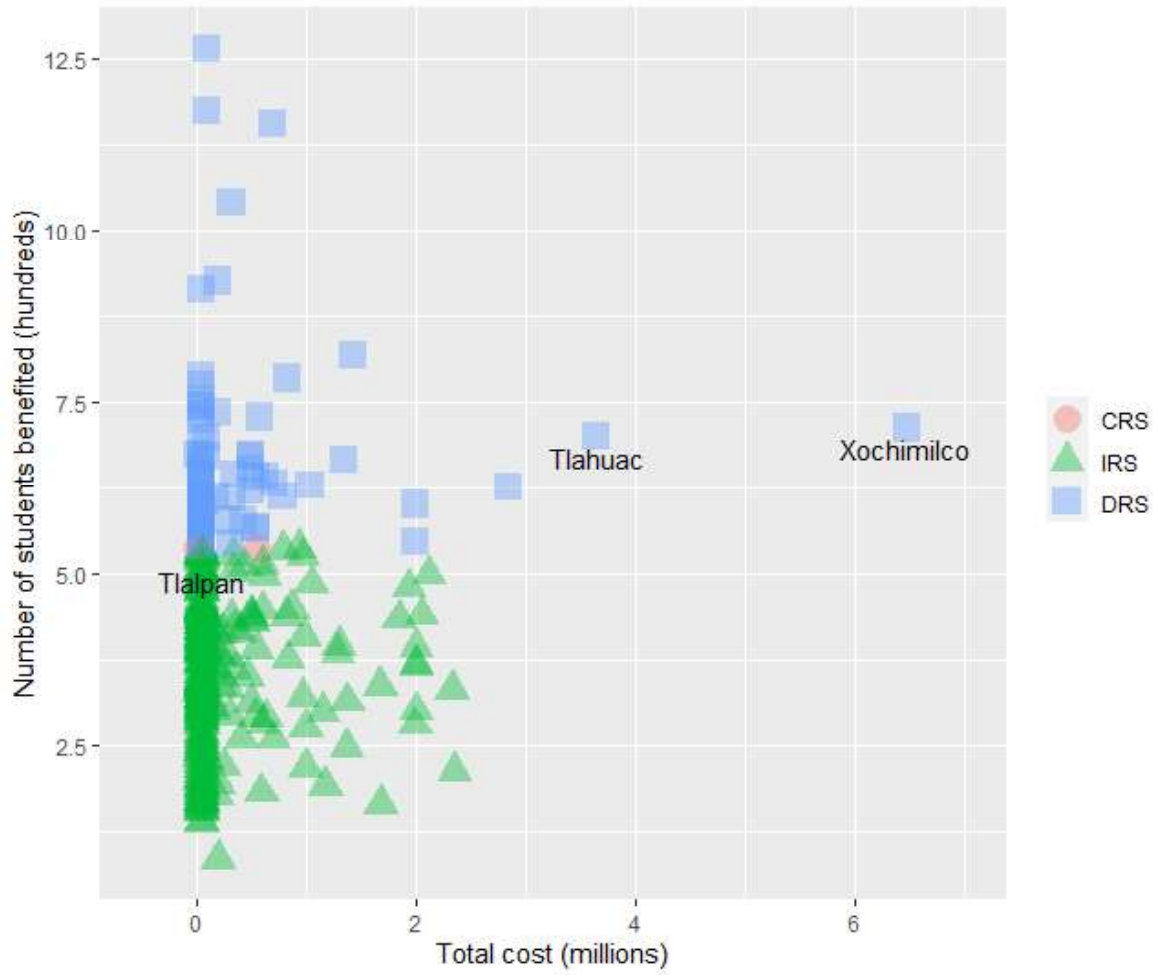


Figura 4.13 Retornos a escala (grupo 2, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

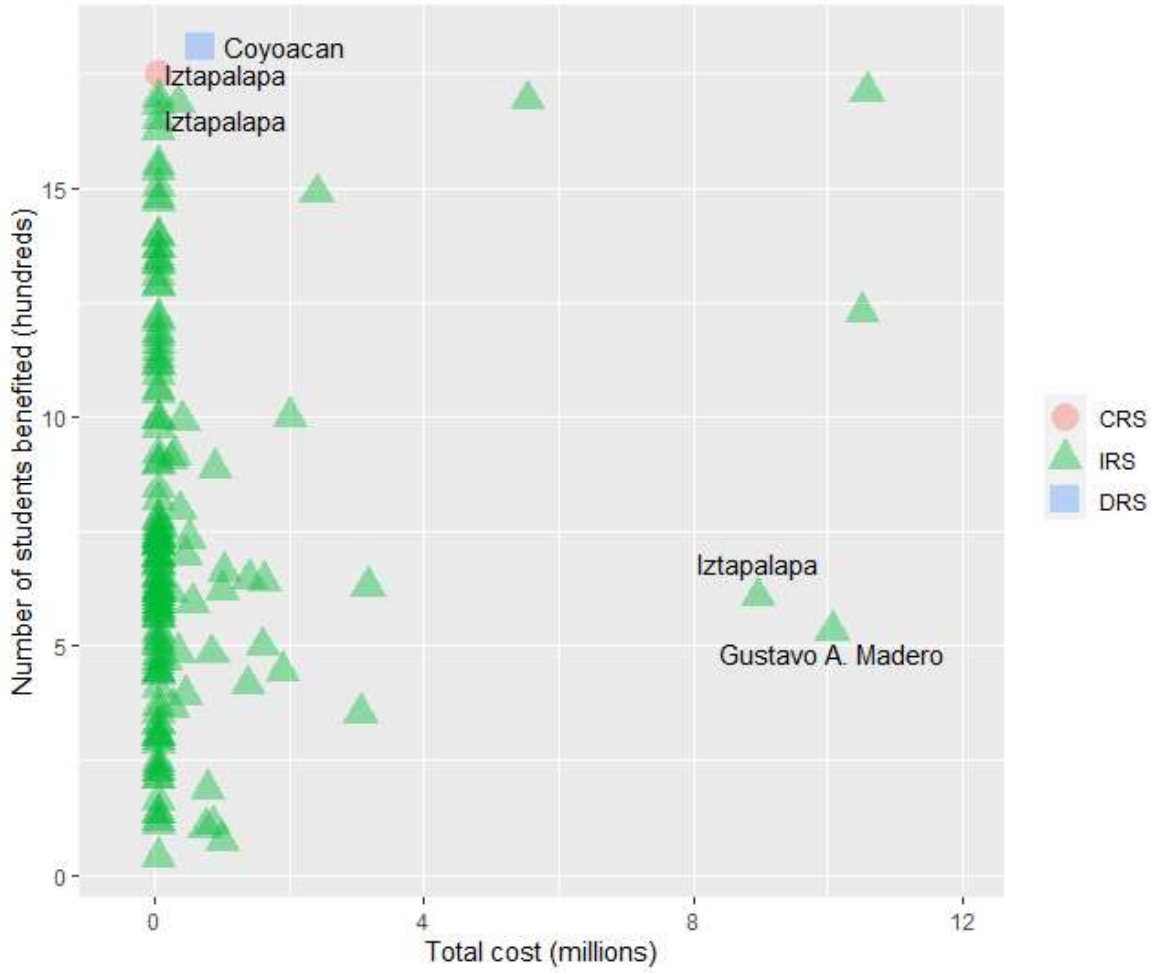


Figura 4.15 Retornos a escala (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

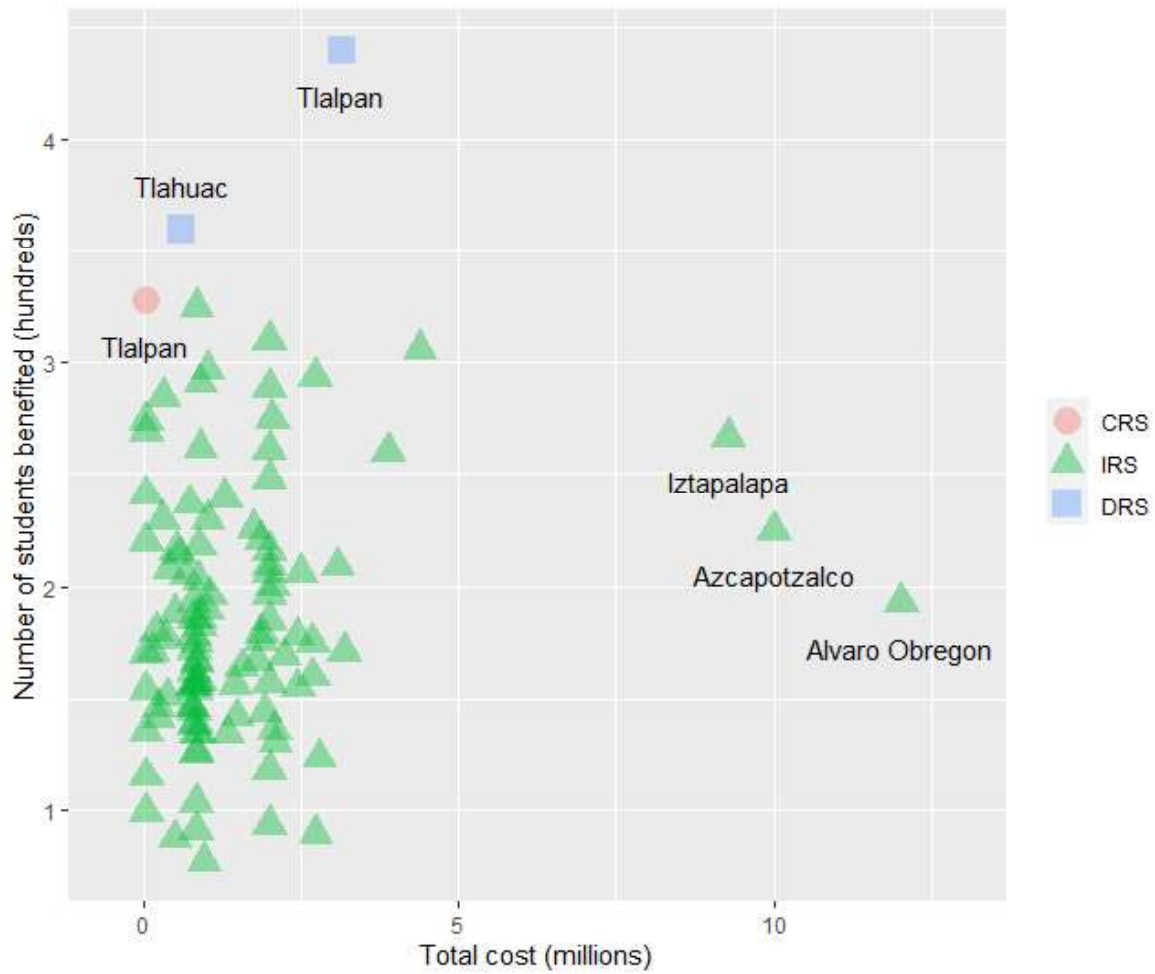


Figura 4.12 Retornos a escala (grupo 4, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

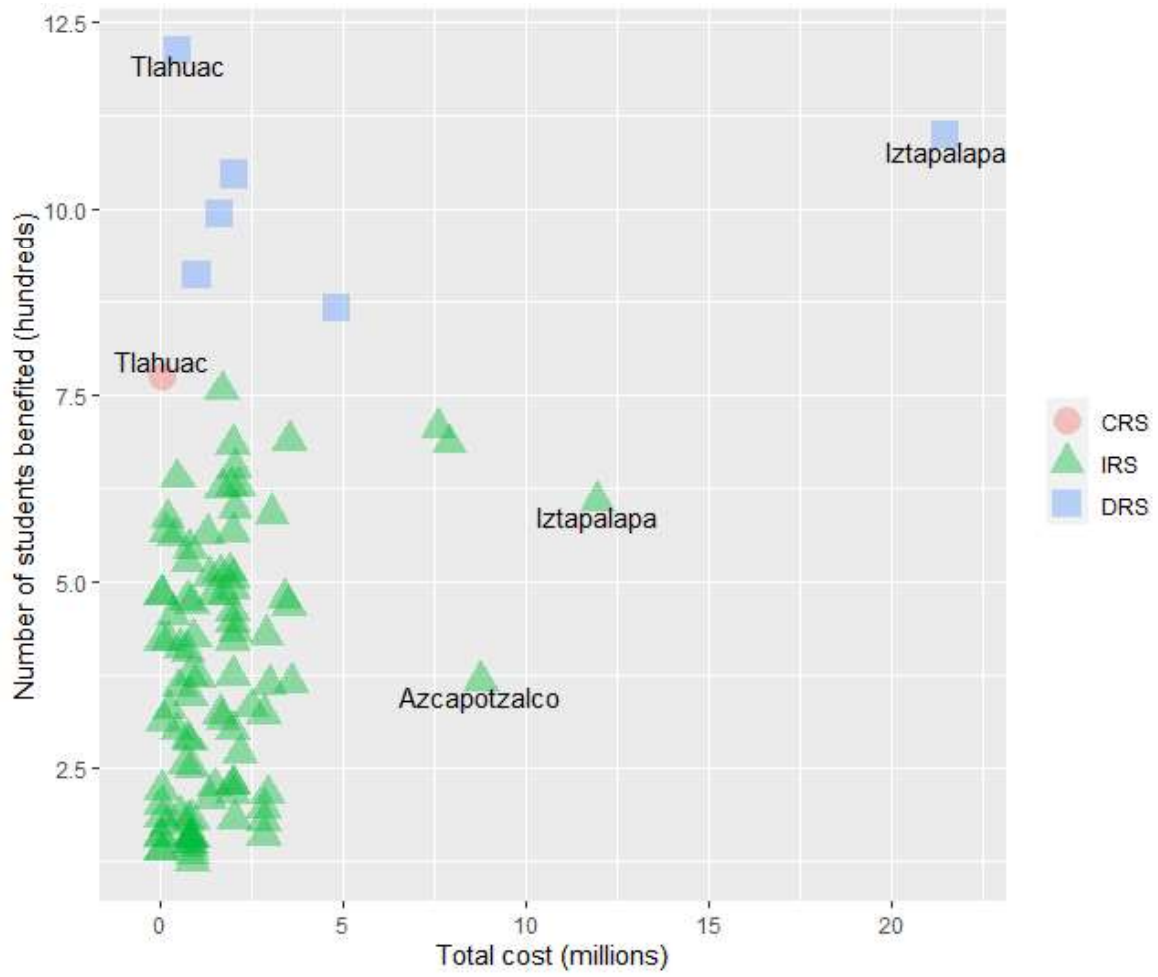


Figura 4.14 Retornos a escala (grupo 4, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

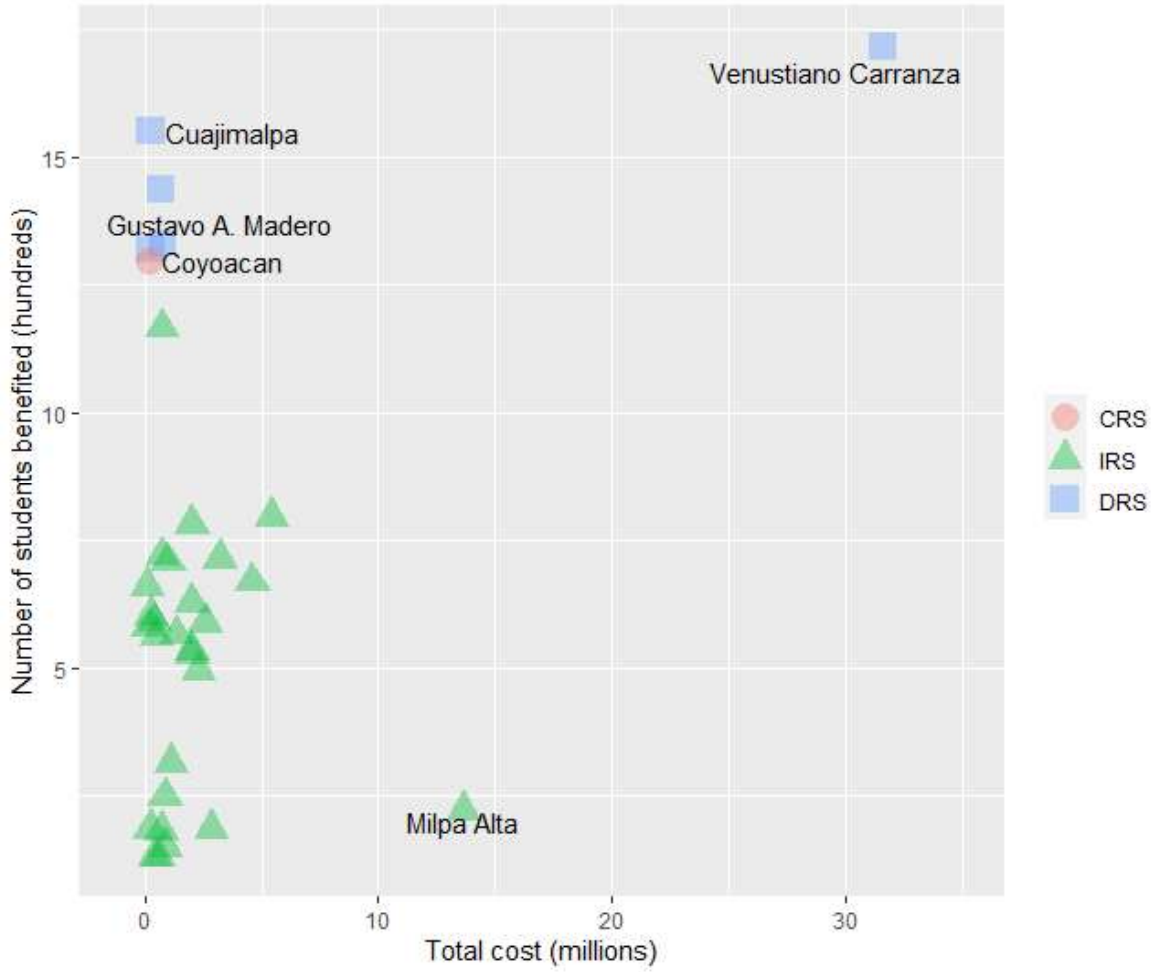


Figura 4.16 Retornos a escala (grupo 4, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía
y por grupo

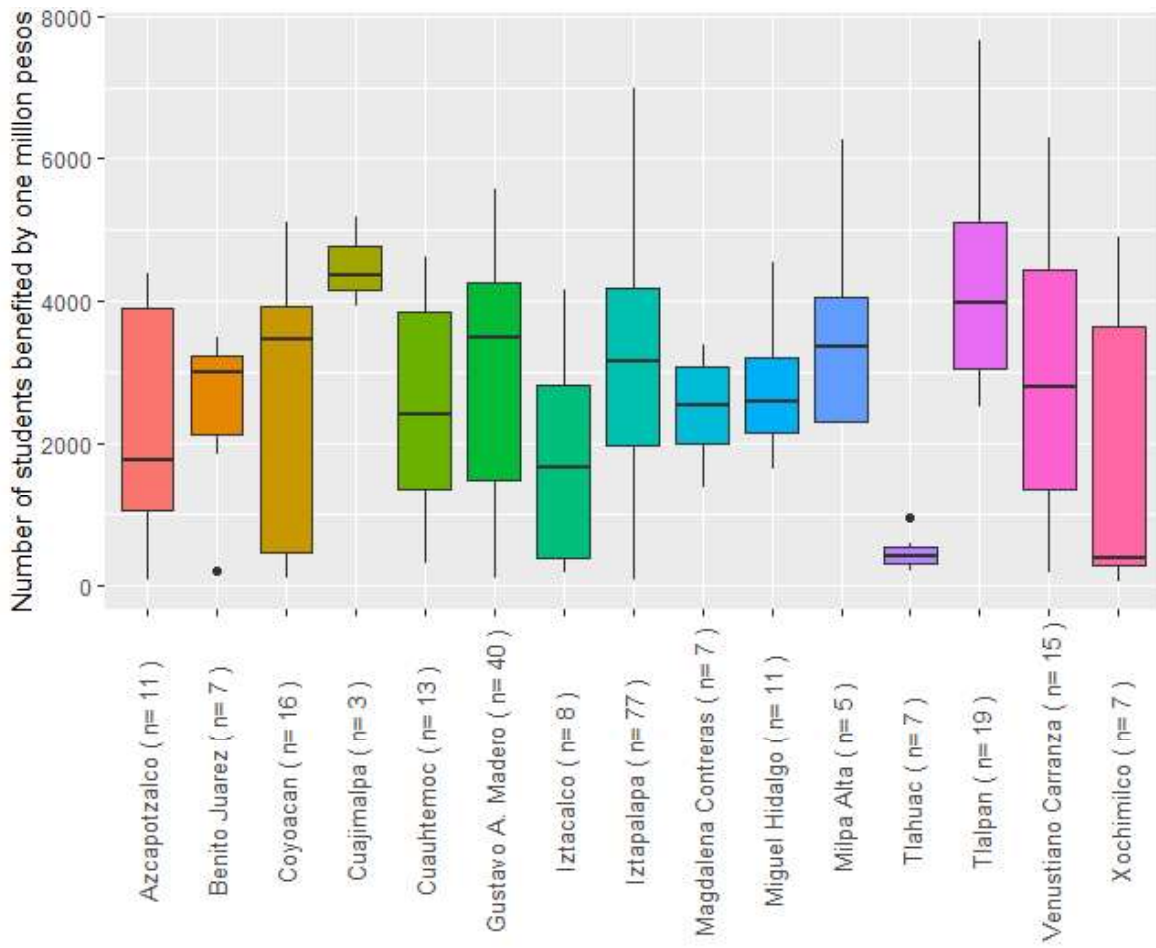


Figura 3.29 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

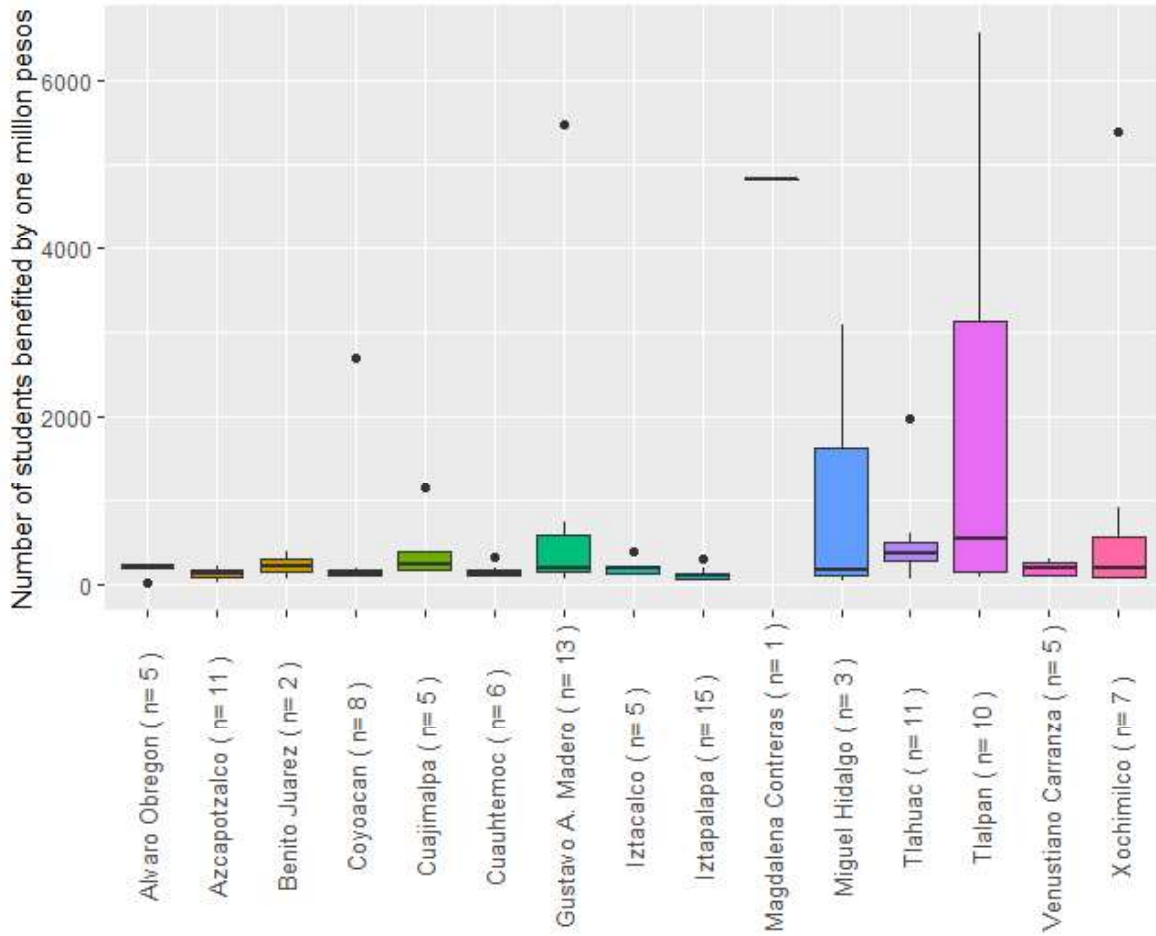


Figura 3.30 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 4, nivel kínder).

Fuente: Elaboración propia.

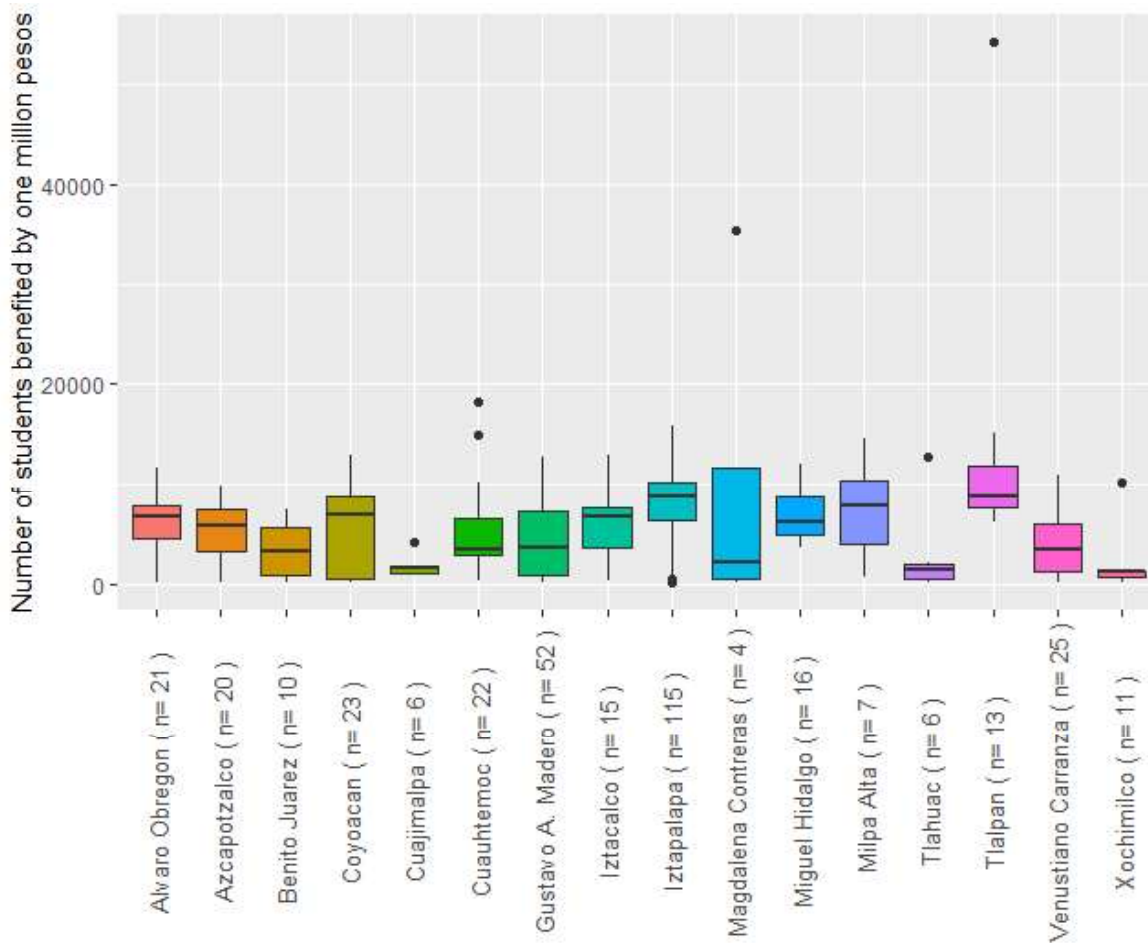


Figura 3.31 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

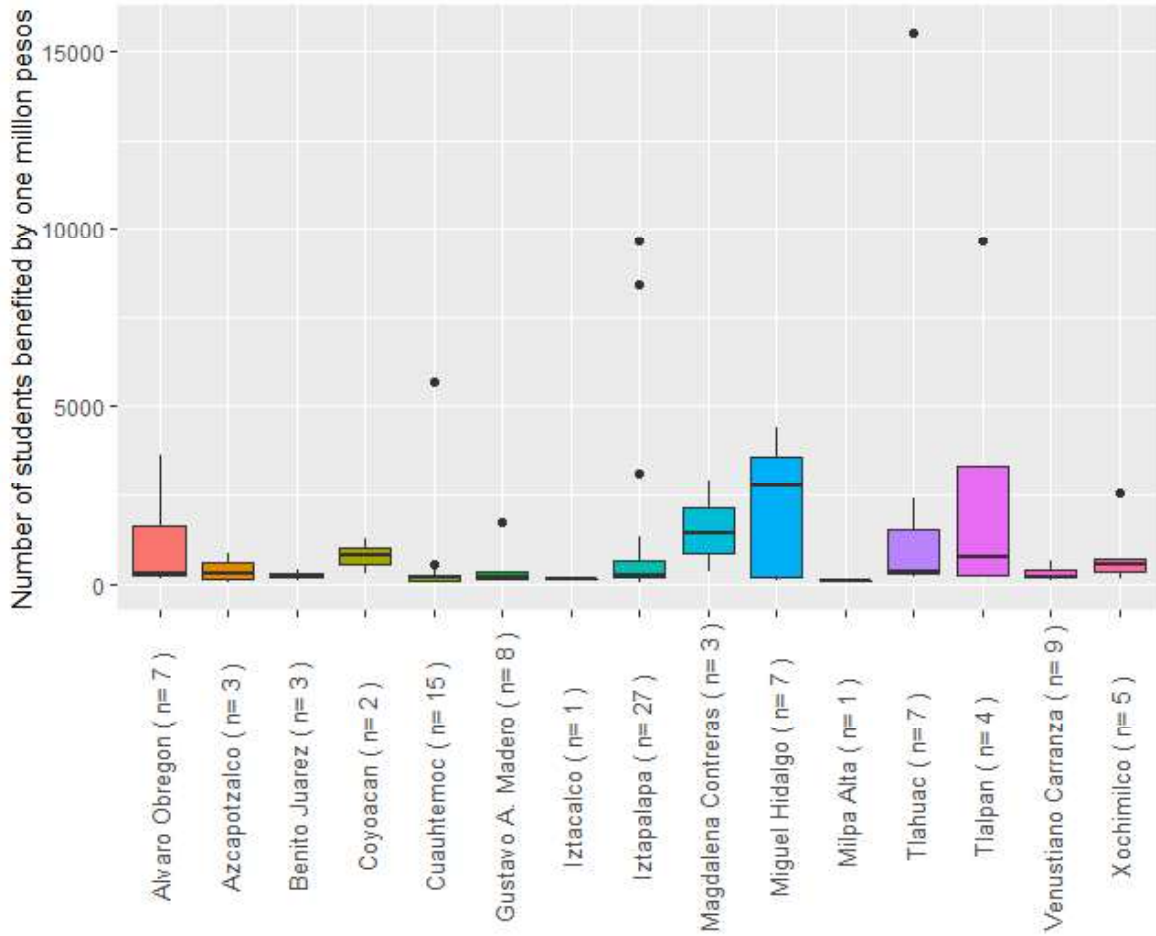


Figura 3.32 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 4, nivel primaria).

Fuente: Elaboración propia.

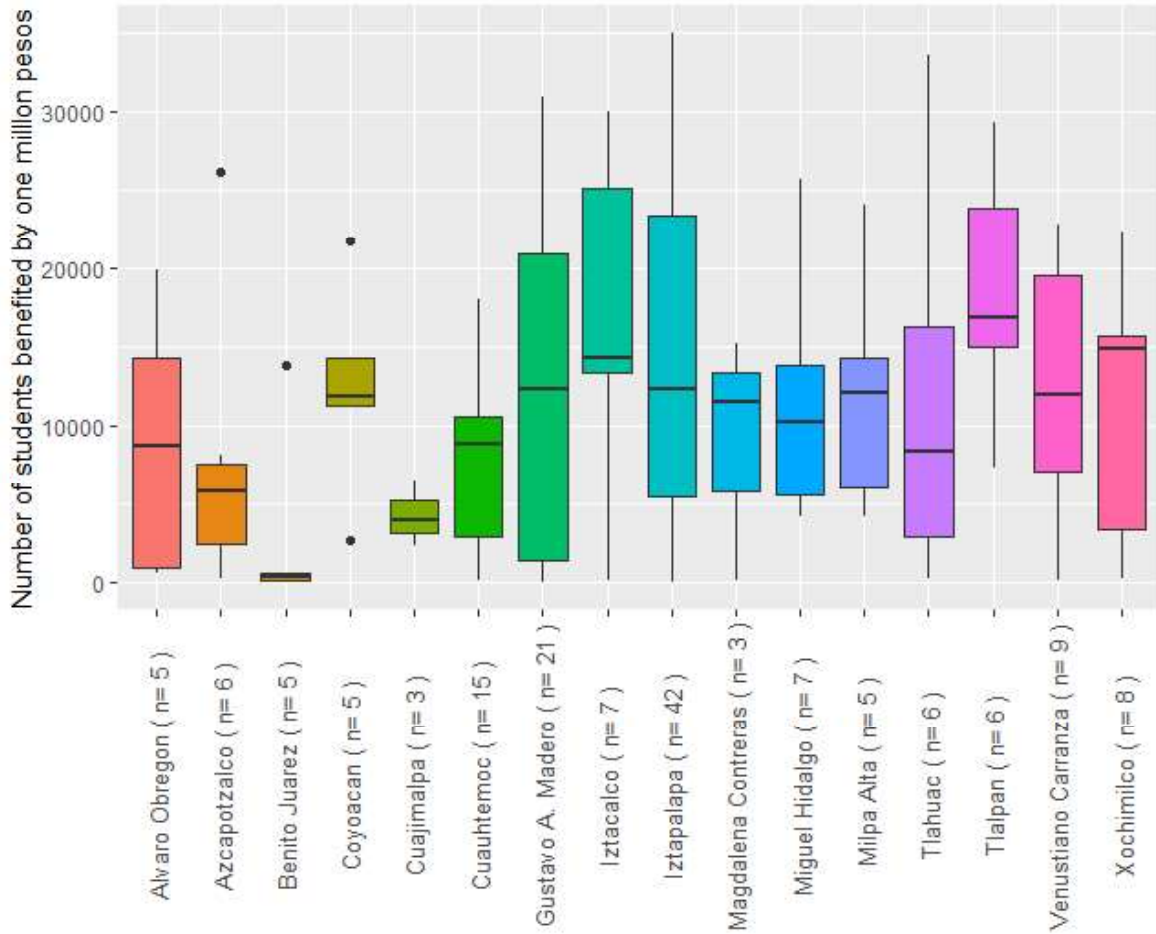


Figura 3.33 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

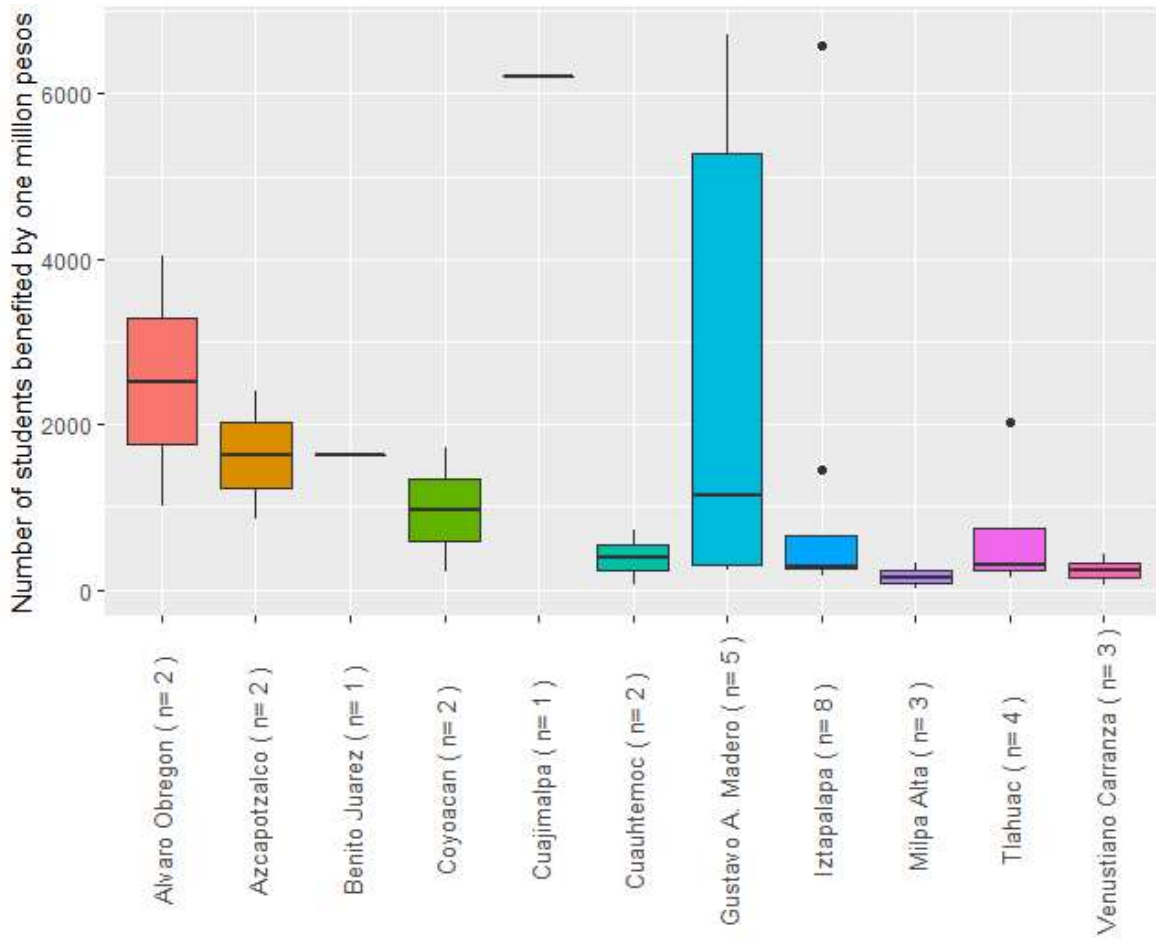


Figura 3.34 Alumnos beneficiados por millón de pesos mexicanos invertidos en cada alcaldía (grupo 2, nivel secundaria).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6: Rangos de diferencias significativas entre las eficiencias promedio de los tres niveles educativos

Tabla 5.1: Diferencias significativas entre las eficiencias promedio.

Nivel	% de diferencia	Alcaldías comparadas
Kínder	2%	Tlalpan vs Miguel Hidalgo
	75%	Tlalpan vs Tláhuac
Primaria	2%	Tlalpan vs Iztapalapa
	35%	Tlalpan vs Xochimilco
Secundaria	20%	Miguel Hidalgo vs Magdalena Contreras
	75%	Miguel Hidalgo vs Benito Juárez

Fuente: Elaboración propia.