

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA “INDOAMÉRICA”

FACULTAD DE ARQUITECTURA ARTES Y DISEÑO



“METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OPTIMIZAR FACHADAS DE EDIFICIOS
EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS TERMODINÁMICOS EN QUITO, 2019”

Trabajo de Investigación Previo a la Obtención del Título de Arquitecto Urbanista

AUTOR: Christian Efrén Darquea Ponce

TUTOR: Arq. Sebastián Alexander Alvarado Grugiel MS.c

QUITO – ECUADOR
2021

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA “INDOAMÉRICA”

FACULTAD DE ARQUITECTURA ARTES Y DISEÑO

TEMA:

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OPTIMIZAR FACHADAS DE EDIFICIOS EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS TERMODINÁMICOS EN
QUITO, 2019

Trabajo de Investigación Previo a la Obtención del Título de Arquitecto Urbanista

AUTOR: Christian Efrén Darquea Ponce

TUTOR: Arq. Sebastián Alexander Alvarado Grugiel MS.c

QUITO – ECUADOR
2021

AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELÉCTRÓNICA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Christian Efrén Darquea Ponce** declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “**METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OPTIMIZAR FACHADAS DE EDIFICIOS EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS TERMODINÁMICOS EN QUITO, 2019**”, como requisito para optar al grado de Arquitecto Urbanita y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, a los 21 días del mes de Enero de 2021, firmo conforme:

Autor: Christian Efrén Darquea Ponce

Firma: _____

Número de Cédula: 172508142-4

Dirección: Pichincha, Quito, Ponceano, Nazareth

Correo Electrónico: klinklan_dummie@hotmail.com

Teléfono: +593- 0994797082

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de DIRECTOR del Proyecto: **“METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OPTIMIZAR FACHADAS DE EDIFICIOS EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS TERMODINÁMICOS EN QUITO, 2019”**, presentada por el ciudadano **Christian Efrén Darquea Ponce**, estudiante del programa de Arquitectura y Urbanismo de la **“Universidad Tecnológica Indoamérica”**, considero que dicho informe investigativo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la revisión y evaluación respectiva por parte del Tribunal de Grado, que se designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Quito, 26 de noviembre 2020.



EL TUTOR

Arq. Sebastián Alexander Alvarado Grugiel M.S.c

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

El abajo firmante, declara que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente proyecto, como requerimiento previo para la obtención del Título de Arquitecto Urbanista, son absolutamente originales, auténticos y personales, de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor.



Christian Efrén Darquea Ponce

CI. 172508142-4

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Proyecto de aprobación de acuerdo con el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Arquitectura y Artes Aplicadas de la Universidad Tecnológica Indoamérica.

Quito, 19 de Enero del 2021

Para constancia firman:

TRIBUNAL DE GRADO



F.....

PRESIDENTE



F Arq. José Leyva, MS.c.
F.....

VOCAL



F.....

VOCAL

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos que han sido la guía y

el sustento para superar cada adversidad.

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a mi familia porque han sido parte fundamental para desarrollar este estudio, y de quienes he obtenido grandes enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL
INDICE DE CONTENIDOS

Tabla de contenido

AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELÉCTRÓNICA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	3
APROBACIÓN DEL TUTOR	4
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	5
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	6
AGRADECIMIENTO	7
DEDICATORIA	8
ÍNDICE GENERAL	9
INDICE DE CONTENIDOS	9
ÍNDICE DE GRÁFICOS	15
RESUMEN EJECUTIVO	25
ABSTRACT	26
CAPÍTULO I	28
EL PROBLEMA	28
Tema	28
1.1. Variable Independiente	28
1.2. Variable Dependiente	28
Líneas de Investigación	28

1.	Planteamiento de Problema	28
1.1.	Formulación del Problema	28
1.2.	La Construcción de Edificios en Auge	28
1.3.	El impacto de los Edificios al Medio Ambiente y el Contexto Construido	29
1.4.	Los Retos que Supone la Cuantificación del Uso de Energía en los Edificios de Variadas Alturas	30
1.4.1.	El Desempeño Energético de los Edificios y los Modelos Existentes de Evaluación, Crítica a los Estándares Actuales	30
1.5.	La Eficiencia Energética de los Edificios y los Sistemas Actuales de Certificación	32
1.6.1	Valoración de las Estrategias Aplicadas en el Diseño y una Crítica a los Sistemas de Certificación	33
1.6.	Variables Ambientales que Afectan el Consumo Energético de los Edificios	34
1.7.	El Rechazo de las Configuraciones Tradicionales y una Alta Demanda por Edificios Novedosos para Enfrentar las Cargas de Viento y sus Efectos	37
1.8.	La Dinámica de Crecimiento de las Ciudades Contemporáneas que Quito está Experimentando	39
1.9.	La Ocupación del Suelo por Parte de la Ciudad de Quito y la Densificación Vertical como la Solución más Viable	40
1.10.	Las Limitaciones Geográficas de la Ciudad de Quito	44
	Justificación	44
	Objetivo General	45
	Objetivos Específicos	45
	CAPÍTULO II	46
	MARCO TEÓRIO	46
1.	Metodologías de Diseño para Determinar las Variables Ambientales y el Consumo Energético	46
1.1.	Características Aerodinámicas y de Flujo que Afectan el Consumo Energético en los Edificios Altos	46
1.1.1.	Propiedades Atmosféricas	46
1.1.2.	Principio de Bernoulli y Flujo de Aire	47
1.1.2.1.	Flujo Incomprensible (Incompressible Flow)	47
1.1.2.2.	Medición de la Velocidad del Aire	49
1.1.2.3.	Desarrollo de las Fuerzas Aerodinámicas	49
1.1.2.4.	Generación de la Fuerza Perpendicular o de Sustentación (Lift)	50

1.1.2.5.	Generación de la Fuerza Paralela o de Resistencia (Drag)	51
1.1.2.6.	Los efectos de la Fricción sobre una Superficie	52
1.1.2.7.	Números de Reynolds	53
1.2.	Configuración Geométrica de los Edificios de Variadas Alturas	55
1.2.1.	Modelos Básicos	55
1.2.2.	Modelos con Esquinas	56
1.2.3.	Modelos inclinados	56
1.2.4.	Modelos cónicos	56
1.2.5.	Modelos Helicoidales	57
1.2.6.	Modelos con Aberturas	57
1.2.7.	Modelos Compuestos	58
1.3.	Medición de Fuerzas Aerodinámicas	58
1.3.1.	Ajuste de las Variables de Entrada para Realizar las Simulaciones	58
1.3.2.	Medidas de Presión del Viento	59
1.4.	Esquema de las Simulaciones Numéricas	59
1.4.1.	Simulaciones Large-eddy	59
1.5.	Mediciones de las Fuerzas de Viento	59
1.5.1.	Definición de Algunas Variables y su Nomenclatura (Coeficientes de Momento de Vuelco).	59
1.5.2.	Definición de los Coeficientes Medios de Momento y de Vuelco en Base a Simulaciones	60
1.5.3.	Coeficientes de Momento de Vuelco Fluctuantes	61
1.6.	Análisis de Respuesta Inducidas por el Viento	61
1.6.1.	Análisis de Presión	61
1.6.2.	Evaluación de las Cargas de Viento	62
1.7.	Discusiones de las Características del Flujo de Viento Alrededor de los Edificios	63
1.7.1.	Visualización del Desprendimiento de Vórtices Alrededor de los Edificios	63
1.7.2.	Efecto de la Forma Helicoidal en las Características de Flujo Alrededor de los Edificios	64

1.8.	Interacción de las Variables Medio Ambientales en los Edificios de Variadas Alturas.	64
2.	Componentes del Consumo Energético Variables Arquitectónicas y su Relación con las Variables Ambientales	65
2.1.	Introducción al Factor de Eficiencia Energética en Edificios	66
2.2.	Recomendaciones para el Factor de Eficiencia Energética en Edificios	67
2.3.	Características de la Arquitectura de Ahorro y Eficiencia Energética	67
2.3.1.	Ventanas y Protección Solar	68
2.3.2.	La Planta Arquitectónica Debe ser Bien Diseñada	69
2.3.3.	Ventanas en Edificios Energéticamente Eficientes	69
2.3.4.	Radiación Solar en las Superficies	69
2.4.	Factor de Eficiencia Energética del Edificio (K_{hqn}) con Aire Acondicionado	70
3.	El Consumo Energético: Determinantes de Ocupación y Actividad	71
3.1.	Cálculo de Complejidad Urbana y Definición del Índice de Shannon-Wiener	71
4.	Métodos Comparativos y Modelos de Desempeño Energético	72
4.1.	Métodos Basados en Simulación	72
4.2.	Métodos Basados en Sistemas de Puntos	72
4.3.	Métricas de Uso Final.	73
4.4.	Métodos Estadísticos Comparativos Basados en Regresión	74
4.4.1.	Técnicas de Optimización Mediante el Uso de la Técnica (OLS) Ordinary Least Squares	74
4.4.2.	Consideraciones a Tomar en Cuenta en los Modelos (OLS)	75
4.4.3.	Errores que Deben Evitarse al Tratar la Muestra y Construir el Modelo	76
METODOLOGÍA APLICADAS		77
1.	Metodología para Calcular el Factor de Eficiencia Energética de Edificios Interacción de Variables Ambientales	77
1.2.	Observaciones de la Metodología Planteada	79
1.3.	Información que Representa el Factor K_{hqn}	79
2.	Metodología Específica de Mercado para Generar un Índice de Rendimiento Energético para Edificios Comerciales	80
2.1.	Estadística Descriptiva	81

2.2.	Análisis de las Determinantes de la Intensidad Energética en Edificios Usando la Metodología de la LL84 y Energy Star	82
2.2.1.	Limitaciones de los Modelos Actuales	83
2.2.2.	Determinantes de la Intensidad de Energía de los Edificios Comerciales	85
2.3.	Resultados en Base a las Modificaciones Propuestas a la Metodología EUI en Función a Métodos de Regresión	87
2.4.	Determinantes de la Intensidad de Energía para Edificios Comerciales	87
2.4.1.	Características físicas	89
2.4.2.	Variable de Ocupación	90
2.4.3.	Efectos del Consumo de Energía para Edificios de Certificación LEED	90
2.4.4.	Desempeño Energético de los Edificios con Certificación LEED Evaluados Mediante el Modelo de Regresión Robusto	91
2.4.5.	Efectos de los Materiales de Construcción	92
Capítulo III		93
Propuesta Metodológica		93
1.1.	Elaboración de la Base de Datos de los Edificios de Variadas Alturas de la Ciudad de Quito	93
1.1.1.	Delimitación de la Zona Urbana de la Ciudad en Base a los Usos del Suelo Primario y las Actividades de Comercio Relacionadas	93
1.1.2.	Tipología de los Edificios Comerciales Contemplados en la Muestra	95
1.1.3.	Variables Independientes Categóricas y Descriptivas que se Cree que Definen a la Variable Dependiente	99
1.1.3.1.	Procedimiento para Establecer las Variables Explicativas Categóricas más Relevantes de los Edificios	102
1.1.3.2.	Sesgos de Información Causados por la Falta de Representatividad de los Individuos en las Medias Muestrales	107
1.1.3.3.	Procedimiento para Establecer las Variables Explicativas de las Condiciones Ambientales	114
1.1.3.4.	Procedimiento para Establecer las Variables Explicativas de Ocupación y Actividad Gestada en los Edificios Aplicación del Índice de Shannon-Wiener	118
1.2.	Construcción del Modelo Regresivo y Estimación del Factor de Consumo	119
1.2.1.	Verificación de la Perfecta Multicolinealidad	119
1.2.1.1.	Aplicación del Factor de Inflación de la Varianza	121
1.2.2.	Estadística Descriptiva de la Base de Datos	122
1.2.3.	Construcción del Modelo	122
1.2.4.	Evaluación del Modelo	123

1.2.4.1. Verificando la Existencia de Heterocedasticidad	123
1.2.4.2. Teste de Heterocedasticidad en el Modelo Regresivo	124
1.2.4.3. Verificación de Autocorrelación	124
1.2.4.4. Verificación de la Distribución Normal de los Residuos	125
Capítulo IV	134
Análisis de Resultados Y Aplicación del Método	134
1.1. Estimación del R Cuadrado e Interpretación del Modelo de Optimización	134
1.2. Consumo de Energía Calculado Mediante el Proceso de Optimización y Apreciación de los Resultados a Nivel Urbano	135
1.3. Evaluación y Optimización Arquitectónica de Proyectos Futuros Mediante la Metodología Propuesta	139
1.4. Evaluación del Proyecto Emblemático Julio Andrade Especificado en el Plan Parcial Veintimilla	140
1.5. Evaluación del Proyecto Emblemático la Y Especificado en el Plan Parcial Luces de Pichincha	143
1.6. Evaluación de los Resultados en Base al Desempeño de la Fachada y Otras Características Físicas de los Edificios	146
Capítulo V	148
Conclusiones y Recomendaciones	148
1.1. Breves Recomendaciones	148
ANEXOS	150
Bibliografía	180

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<p>Gráfico 1: The Bank of America.....33</p> <p>Fuente: (Council on Tall Buildings and Urban Habitat , 2020) “Fachada del Edificio”.....33</p> <p>Gráfico 2: Fórmula ASHARE.....35</p> <p>Fuente: (T. Soultana Saroglou, 2017) “fórmula para calcular las implicaciones del viento.....35</p> <p>Gráfico 3: Velocidades del Viento.....35</p> <p>Fuente: (T. Soultana Saroglou, 2017) “Coeficientes de Perfil de Velocidad del viento.....35</p> <p>Fuente: (Council on Tall Buildings and Urban Habitat , 2020) “Tehran International Tower”.....36</p> <p>Gráfico 4: Tehran International Tower36</p> <p>Fuente: (Council on Tall Buildings and Urban Habitat , 2020). “Fachada del Edificio”.....37</p> <p>Gráfico 5: One World Trade Center.....37</p> <p>Gráfico 6: Formas no Convencionales38</p> <p>Fuente: (Bandi, 2013) “Ejemplos de algunas formas no convencionales de edificios que poseen mejor desempeño estructural”.....38</p>	<p>Gráfico 7: Densidad Poblacional42</p> <p>Fuente: Densidad poblacional de los años 1990 y 2001, gráficos elaborados en base a los mapas referenciales de la fuente (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) .42</p> <p>Gráfico 8: Densidad de Construcciones en Quito43</p> <p>Fuente: Densidad poblacional del año 2010 y densidad de construcciones, gráficos elaborados en base a los mapas referenciales de la fuente (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010)43</p> <p>Fuente: (Wikipedia La enciclopedia libre, 2020) “Paisaje de la ciudad”.44</p> <p>Gráfico 9: Ciudad de Quito.....44</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Flujo de Aire en Tubo al Vacío”48</p> <p>Gráfico 10: Flujo Incomprensible48</p> <p>Gráfico 11: Escala de Bernoulli49</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Ecuaciones de Bernoulli”49</p> <p>Gráfico 12: Flujo de Aire en un Objeto49</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002)“Patrón del Flujo de Aire en un Objeto Simétrico”49</p>	<p>Gráfico 13: Fuerza de Sustentación50</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Fuerza de Sustentación” .50</p> <p>Gráfico 14: Generación de Fuerzas de Sustentación ..51</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Ángulo Positivo de Fuerza de Sustentación”.51</p> <p>Gráfico 15: Fuerza de Resistencia52</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Ecuaciones que Definen la Fuerza de Arrastre”.....52</p> <p>Gráfico 16: Laminar y Turbulento.....52</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Características de Capa de Límite”52</p> <p>Gráfico 17: Número de Reynolds54</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Expresión que sirve para determinar el número de Reynolds”.54</p> <p>Gráfico 18: Fricción en una Superficie.....54</p> <p>Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Fricción de Arrastre en una Superficie”54</p> <p>Gráfico 19: Modelos Básicos.....56</p> <p>Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Básicos Testeados” 56</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Gráfico 20: Modelos Esquinas Modificadas56	Gráfico 27: Resultados de las Simulaciones59	Fuente: (Bandi, 2013) “Visualización de las Estructuras de Vórtice Instantánea Alrededor de los Edificios”..... 63
Fuente: (Bandi, 2013)“Modelos Esquinas Modificadas Testeados”56	Fuente: (Bandi, 2013) “Resultados de las Simulación”59	Gráfico 34: Flujo Vertical del Viento 64
Gráfico 21: Modelos Inclinaados.....56	Gráfico 28: Long - Wind Cross - Wind 60	Fuente: (Bandi, 2013) “Promedio del Flujo Vertical de Presiones y Velocidad Alrededor de los Edificios. 64
Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Inclinaados Testeados”56	Fuente: (Sabareesh, 2018) “Esquemas del Long-Wind y Cross Wind”.....60	Gráfico 35: Combinación de Presiones 64
Gráfico 22: Modelos Cónicos57	Gráfico 29: Características Aerodinámicas60	Fuente: (Bandi, 2013) “Distribución de Presiones”.... 64
Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Cónicos Testeados”57	Fuente: (Bandi, 2013) “Comparación de Momento Máximo de los Coeficientes de Vuelco”60	Gráfico 36: Nomenclatura Índice Energético 66
Gráfico 23: Modelos Helicoidales57	Gráfico 30: Características Aerodinámicas Fluctuantes61	Fuente: (Ha, 2016) “Consumo Energético de los Aires Acondicionados Ecuaciones” 67
Fuente: (Bandi, 2013) “ Modelos Helicoidales Testeados”57	Fuente: (Bandi, 2013) “Comparación los Coeficientes de Momento Fluctuante de Vuelco”61	Fuente: (Ha, 2016) “Nomenclatura Índice Energético” 67
Gráfico 24: Modelos con Aperturas57	Gráfico 31: Respuesta del Viento62	Gráfico 37: Consumo Energético de los Aires Acondicionados 67
Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos con Aperturas Testeados”57	Fuente: (Bandi, 2013) “Respuestas a las Cargas del Viento en Edificios de una sola Modificación.62	Gráfico 38: Ecuación para Calcular la Transferencia de Calor 70
Gráfico 25: Modelos Compuestos.....58	Gráfico 32: Diseño Velocidad del Viento.....62	Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor a Través de la Fachada” 70
Fuente: (Bandi, 2013)“Modelos Compuestos Testeados”58	Fuente: (Bandi, 2013) “Comparación de las Respuestas a la Carga del viento”62	Gráfico 39: Ecuación para Calcular la Transferencia de Calor a Través de las Ventanas (Envoltura Opaca) 70
Gráfico 26: Túnel de Viento58	Gráfico 33: Estructuras de Vórtices63	
Fuente: (Bandi, 2013) “Túnel de Viento, Sistema de Coordenadas y Dominios”58		

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor (Envoltura Opaca)”70

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor (Sin elementos de Sombra).....70

Gráfico 40: Transferencia de Calor a Través de Ventanas sin Elementos de Protección70

Gráfico 41: Transferencia de Calor a Través de Ventanas por Radiación (Sin Elementos de Protección)71

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor por a Través de Ventanas por Radiación (Sin elementos de Protección”71

Gráfico 42: Transferencia de Calor a Través de Ventanas (Elementos de Protección)71

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor a Través de Ventanas Cuando Existe una Diferencia entre la Temperatura Exterior e Interior”.71

Gráfico 43: Fórmula de Shannon – Wiener71

Fuente: (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) “Fórmula de Shannon-Wiener”.....71

Gráfico 44: Regresiones Lineales75

Fuente: (Abuín, 2017)“Modelos de Regresiones Simples y Múltiples”75

Gráfico 45: Planta Arquitectónica.....77

Fuente: (Ha, 2016) “Planta Arquitectónica del Edificio 17T10 Nguyen”77

Gráfico 46: Fachada del Edificio77

Fuente: (Ha, 2016) “Fachada del Edificio 17T10 Nguyen”77

Gráfico 47: Fórmula para Calcular el Factor SHGC ..77

Fuente: (Ha, 2016) “Cálculo del factor SHGC”77

Gráfico 48: Ratio de Losas y Pisos78

Fuente: (Ha, 2016) “Fórmula para Calcular el Ratio de Losas y Pisos”78

Gráfico 49: Fórmula para Calcular el Ratio del Edificio 17T1078

Fuente: (Ha, 2016) “Fórmula para Calcular Ratio de Edificios Tipo B (Edificios Residenciales)”78

Gráfico 50: Fórmula para Calcular el Ratio del Edificio Tipo D o E.....78

Fuente: (Ha, 2016) Fórmula para Calcular el Ratio de Edificios Tipo D O E”78

Gráfico 51: Ratio Óptimo de Ventanas.....78

Fuente: Fórmula para Calcula el Ratio Óptimo de Ventanas para Ventanas.....78

Gráfico 52: Intensidad de Radiación Solar78

Fuente: (Ha, 2016) “Intensidad de Radiación Sola en Cada Dirección”78

Fuente: (Ha, 2016) “Tabla Resumen Transferencia de Calor en Techo, Paredes y Ventanas”79

Gráfico 53: Tabla Resumen Transferencia de Calor ..79

Gráfico 54: Medir la Capacidad de Protección de Ventanas79

Fuente: (Ha, 2016) “Fórmula para Medir la Capacidad de Protección de Ventanas”79

Gráfico 55: Distribución Espacial de Edificios con Información Geo – Espacial81

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Mapa de las Propiedades contenidas en la Ley LL84 y la Base de Datos CoStar”81

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Histograma de Área de los Edificios, Solo Edificios de Oficinas de la Muestra de la LL84 (n=948)”82

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Histograma de la Fuente de EUI con un Gráfico de Densidad de Kernel, de los Edificios de Oficinas de la Muestra de la Ley LL84 (n = 948)”82

Gráfico 56: Frecuencias Correspondientes al Área de 948 Edificios82

Gráfico 57: Intensidad del Uso de Energía de la Muestra de 948 Edificios.....82

Gráfico 58: Intensidad del Uso de Energía de la Muestra de 685 Edificios de la Muestra CoStar.....82

Fuente: (Kontokosta, 2014) ” Histograma de la Fuente EUI, de la Muestra CoStar – PLUTO (n = 685).82

Gráfico 59: Distribución Espacial de los Edificios en Base EUI.83

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Distribución Espacial de los Edificios de Oficinas en Base a la Intensidad del Uso de Energía (n = 948)”83

Gráfico 60: Fórmula de Evaluación Usada por el Sistema de Certificación Energy Star de la EPA de EE.UU....84

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Fórmula de Evaluación de Energy Star”84

Gráfico 61: Diagrama de Dispersión Correspondiente a la Densidad de Trabajadores y Horas de Funcionamiento.....85

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Diagrama de Dispersión de la Densidad de Computadoras y Densidad de Trabajadores.” .85

Gráfico 62: Multicolinealidad Debido al Uso de Rangos Cerrados85

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Diagrama de Dispersión del Área Bruta y la Fuente de la Uso Intensivo de Energía EUI con una Línea de Ajuste”85

Gráfico 63: Expresión para Predecir el EUI de las Edificaciones.....85

Fuente: “Expresión Propuesta para el Cálculo del EUI y Alternativa a la Metodología de Cálculo de Energy Star”85

Gráfico 64: Matriz Base de Estadística Descriptiva Usada para Construir el Modelo de Regresión Lineal87

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Estadística Descriptiva por Tipología de los Edificios de Oficinas, Muestra LL84-PLUTO-CoStar (n=685)”87

Gráfico 65: Coeficiente de las Variables y Margen de Confiabilidad Correspondiente al 99% y 90%.....88

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Resultados de la Regresión, Log EUI como la Variable Dependiente. Nivel de Significancia del 99% / Nivel de Significancia del 95% / Nivel de Significancia del 90%”88

Gráfico 66: Registro de la Fuente Mediana de EUI para Edificios con Certificación LEED91

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Fuente Mediana EUI y Puntaje Energy Star por Nivel de Certificación LEED. Nota: Solo hay un Edificio LEED Platinum en la Muestra, esa Categoría se Omite”91

Fuente: (Distrito Metropolitano de Quito , 2015) “Usos del Suelo y sus Relaciones de Compatibilidad”94

Gráfico 67: Compatibilidad de los Usos del Suelo Correspondientes al Uso Primario R2, R3 y Múltiple.94

Gráfico 68: Usos del Suelo Primario96

Fuente: Parroquias urbanas y sus usos del suelo primario de la ciudad de Quito, mapas elaborados en base a la fuente (Kontokosta, 2014)96

Gráfico 69: Tipologías del Uso Comercial97

Fuente: (Distrito Metropolitano de Quito (Concejo Metropolitano de Quito) , 2005) “Cuadro No. 7 de Uso Comercial y Servicios”97

Gráfico 70: Construcciones de 4000 m ² de Área Bruta98	Edificaciones Según el PUOS, Mapa Elaborado en base a la fuente (Kontokosta, 2014) 103	Fuente: Área de los Lotes en Base al Cuadro No.1 de Asignación de Zonificación para Edificación y Habilitación del Suelo, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014) 109
Fuente: Construcciones que poseen un área igual o superior a los 4000 m ² de área de implantación, mapa elaborado en base a la fuente (Kontokosta, 2014).....98	Gráfico 74: Coeficiente de Ocupación del Suelo en Plana Baja 104	Gráfico 78: Área del Lote en Base a la Zonificación del PUOS 109
Gráfico 71: Ejemplo de la Base de Datos Referente a la Muestra.....101	Fuente: Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja de los Edificios en Base a sus Categorías de Habilitación, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)..... 104	Gráfico 79: Número de Parqueaderos en Base al Área Útil 110
Fuente: Base de datos general de la los edificios de igual o más de 4000 m ² de área de implantación ubicados en la Ciudad de Quito, la información fue estructurada en base a la fuente (Kontokosta, 2014).....101	Gráfico 75: Coeficiente de Ocupación del Suelo Total 105	Fuente: Número de Parqueaderos en Base al Área Útil de las Edificaciones Comerciales, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014) 110
Gráfico 72: Ejemplo de Zonificación por la Edificabilidad y la Forma de Ocupación del Suelo de la Categoría B.....102	Fuente: Coeficiente de Ocupación del Suelo Total de los Edificios en Base a sus Categorías de Habitabilidad, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)..... 105	Gráfico 80: Área de Subsuelos en Base al Número de Parqueaderos..... 111
Fuente: (Distrito Metropolitano de Quito, 2015) “Cuadro N.º 1 Asignación Para Edificación y Habilitación del Suelo”102	Gráfico 76: Altura de las Edificación en Base a las Categorías 106	Fuente: Área de Subsuelos en base al Número de Parqueaderos, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014) 111
Gráfico 73: Edificios Según el Cuadro de Asignación del Cuadro 72103	Fuente: Altura de las Edificaciones en Base a sus Categorías de Habitabilidad, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)..... 106	Gráfico 81: Área Bruta 112
Fuente: Distribución Espacial de los Uso del Suelo (R2- R3) y Múltiple; Asignación de Codificación para las	Gráfico 77: Área Útil en Base a la Zonificación del PUOS 108	Fuente: Área Bruta Resultante de Sumar el Área Útil Construida Sobre Rasante y el Área de Subsuelos, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)..... 112
	Fuente: Área útil en Base al Cuadro No. 1 de Asignación de Zonificación para Edificación y Habilitación del Suelo, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)..... 108	Gráfico 82: Años de Crecimiento Urbano de los Edificios 113

Fuente: Años de Crecimiento Urbano en los Cuales se Implantan los Edificios, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Gráfico 83: Matriz Pareada para Verificar la Representatividad.....114

Fuente: Matriz Pareada de Verificación de Representatividad de las Clases de las Medias Muestrales, Matriz Elaborada en Base a la Fuente (Reed, 2019).....114

Gráfico 84: Rosa de los Vientos de Quito.....115

Fuente: (Basilea, 2020) “Rosa de los Vientos de la Ciudad de Quito”.....115

Gráfico 85: Condiciones Físicas del Flujo de Viento115

Fuente: (Toby, 2020) ”Condiciones del Fluido”.....115

Gráfico 86: Modelo Matemático de Estimación116

Fuente: (Toby, 2020) “Modelo Large-Eddy-Stedy “ 116

Gráfico 87: Condiciones del Flujo116

Fuente: (Toby, 2020) “Condiciones del Flujo Turbulento y Dirección”116

Gráfico 88: Temperatura Promedio116

Fuente: (Basilea, 2020) “Promedio de Temperatura y Precipitaciones”.....116

Gráfico 89: Temperatura y Velocidad117

Fuente: (Toby, 2020) “Temperatura del Ambiente y Velocidad del Viento”.....117

Gráfico 90: Intervalos de Tiempo117

Fuente: (Toby, 2020) “Intervalos de Tiempo para el Cálculo de Variables”117

Gráfico 91: Estimación del Índice de Shannon Wiener120

Fuente: Estimación del Índice de Shannon-Wiener en los Usos del Suelo (R2-R3) y Uso Múltiple, Mapa Elaborado en Base a los Mapas Referenciales de a la Fuente (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).....120

Fuente: Mapa de Calor de Correlación entre las variables (Reed, 2019).....121

Gráfico 92: Mapa de Calor del Grado de Correlación121

Gráfico 93: Estimación del VIF Para Cada Una de las Variables122

Fuente: Calculo del Factor de Inflación de la Varianza y su Respectiva Depuración del Sistema, elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019).....122

Gráfico 94: Estimación de los Valores Atípicos.....122

Fuente: Eliminación de Valores Atípicos de la Muestra n=222 (Reed, 2019)122

Gráfico 95: Estimación de los Coeficientes en el Modelo123

Fuente: Estimación de Coeficientes para la Estimación del Factor de Consumo Energético, Elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019).....123

Gráfico 96: Estimación del Factor de Consumo para 5 Edificios de la Muestra123

Fuente: Estimación del Factor de Consumo, Tomando como Referencial el Estudio de la Fuente (Reed, 2019).....123

Gráfico 97: Validaciones del Modelo Regresivo.....124

Fuente: Prueba de Breusch-Pagan y Prueba de White, Referencial a la Fuente (Reed, 2019)124

Gráfico 98: Gráfico de Autocorrelación125

Fuente: Gráfico de Autocorrelación en el Cual se Rechaza la Hipótesis Nula, Proceso Elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019).....125

Gráfico 99: Distribución Tórica de los Residuos.....125

Fuente: Distribución Teórica de los Residuos igual a $1.616e^{-13}$, Elaborada en Base a la Fuente (Reed, 2019).....125

Gráfico 100: Edificios Testeados 383610 y 384322 .126

Fuente: Edificio Testeados 383610 y 384322 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013).....126

Gráfico 101: Edificios Testeados 85749 y 384337 ...127

Fuente: Edificios Testeados 85749 y 384337 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)127

Gráfico 102: Edificios Testeados 50185 y 86198128

Fuente: Edificios Testeados 50185 y 86198 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)128

Gráfico 103: Edificios Testeados 50379 y 50365129

Fuente: Edificios Testeados 50379 y 50365 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)129

Gráfico 104: Edificios Testeados 59149 y 46738130

Fuente: Edificios Testeados 59149 y 46738 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)130

Gráfico 105: Edificios Testeados 46751 y 138940...131

Fuente: Edificios Testeados 46751 y 138940 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)131

Gráfico 106: Edificios Testeados 50017 y 239336...132

Fuente: Edificios Testeados 50017 y 239336 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)132

Gráfico 107: Edificios Testeados 46963133

Fuente: Edificio Testeado 46963 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificada en la Fuente (Bandi, 2013)133

Gráfico 108: Estimación de los Valores134

Fuente: Estimación de los Valores P que se Acercan al 0, (Reed, 2019).....134

Gráfico 109: Cuadro de Resumen R-Cuadrado134

Fuente: Cuadro Nova R-Cuadrado Igual a 0.974 en Base al Fuente (Reed, 2019).....134

Fuente: Comparación del Factor de Consumo Energético en Base al Promedio y Mediana de las Categorías Evaluadas, en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)135

Fuente: (Darquea, 2020) Tabla de Resumen del Promedio y Mediana del Factor de Consumo Energético**¡Error! Marcador no definido.**

Gráfico 110: Gráfico de Barras Factor de Consumo Energético135

Gráfico 111: Estimación del Promedio y Mediana del Factor de Consumo135

Gráfico 112: Matriz de Comparación Pareada y Distribución Normal136

Fuente: Matriz de Comparación Pareada y Distribución Normal en la Cual se Comparan las Variables Explicativas del Modelo Regresivo. La Diagonal Representa los Polígonos de Frecuencias, Cuadro Elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019)136

Gráfico 113: Gráfico de Barras Densidad de Población137

Fuente: Comparación de la Densidad de Población en Base al Promedio y Mediana de las Categorías Evaluadas en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014).....137

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014).....138

Gráfico 114: Estimación del Promedio y la Mediana de la Densidad de Población.....138

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana del Índice de Actividad en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)138

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana de la Densidad de Población en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)138

Gráfico 115: Gráfico de Barras Índice de Actividad.138

Fuente: Comparación del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja en Base al Promedio y la Mediana de las Categorías Evaluadas en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)138

Fuente: Comparación del Índice de Actividad en Base al Promedio y la Mediana de las Categorías Evaluadas, en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014).....138

Gráfico 116: Estimación del Promedio y la Mediana del Índice de Actividad138

Gráfico 117: Gráfico de Barras del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja138

Gráfico 118: Estimación del Promedio y la Mediana del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja.....138

Gráfico 119: Gráfico de Barras de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación.....138

Fuente: Comparación de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación en Base al Promedio y la Mediana de las Categorías Evaluadas en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)138

Gráfico 120: Estimación del Promedio y Mediana de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación138

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014).....139

Gráfico 121: Resultado de la Simulación150

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46738 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)150

Gráfico 122: Resultado de la Simulación151

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46738 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)151

Gráfico 123: Resultado de la Simulación152

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46751 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)152

Gráfico 124: Resultado de la Simulación153

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46751 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)153

Gráfico 125: Resultado de la Simulación154

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46963 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)154

Gráfico 126: Resultado de la Simulación155

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46963 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)155

Gráfico 127: Resultado de la Simulación156

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 50017 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)156

Gráfico 128: Resultado de la Simulación157

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50017 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)157

Gráfico 129: Resultado de la Simulación158

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50185 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)158

Gráfico 130: Resultado de la Simulación.....159

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 50185 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)159

Gráfico 131: Resultado de la Simulación.....160

Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 50365 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)160

Gráfico 132: Resultado de la Simulación161

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50365 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)161

Gráfico 133: Resultado de la Simulación162

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50379 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)162

Gráfico 134: Resultado de la Simulación163

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50379 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)163

Gráfico 135: Resultado de la Simulación164

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 59149 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)164

Gráfico 136: Resultado de la Simulación165

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 59149 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)165

Gráfico 137: Resultado de la Simulación166

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 85749 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)166

Gráfico 138: Resultado de la Simulación167

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 85749 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)167

Gráfico 139: Resultado de la Simulación168

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 86198 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)168

Gráfico 140: Resultado de la Simulación169

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 86198 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)169

Gráfico 141: Resultado de la Simulación170

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 138940 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)170

Gráfico 142: Resultado de la Simulación171

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 138940 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)171

Gráfico 143: Resultado de la Simulación172

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 239336 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)172

Gráfico 144: Resultado de la Simulación.....173

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 239336 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)173

Gráfico 145: Resultado de la Simulación.....174

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 383610 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)174

Gráfico 146: Resultado de la Simulación175

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 383610 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)175

Gráfico 147: Resultado de la Simulación.....176

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384322 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)176

Gráfico 148: Resultado de la Simulación177

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384322 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)177

Gráfico 149: Resultado de la Simulación178

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384337 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)178

Gráfico 150: Resultado de la Simulación179

Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384337 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)179

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y ARTES APLICADAS

RESUMEN EJECUTIVO

TEMA: “METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OPTIMIZAR FACHADAS DE EDIFICIOS EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS TERMODINÁMICOS EN QUITO, 2019”

AUTOR: Christian Efrén Darquea Ponce

TUTOR: Arq. Sebastián Alexander Alvarado Grugiel MS.C

En los últimos años las ciudades del mundo han experimentado un crecimiento demográfico significativo que ha obligado a los gobiernos locales a tomar decisiones con la finalidad de apalear la demanda de espacios habitables, además de satisfacer las funciones urbanas que se requieren en estos lugares para el establecimiento de estándares de calidad de vida adecuados. La tipología de edificios de variadas alturas y los rascacielos se presenta como una solución potencialmente óptima, sin embargo estas estructuras representan en la mayoría de los casos un mayor impacto ambiental debido al alto requerimiento de energía para la operatividad de estas edificaciones, aspecto que se agravado aún más en los últimos años por la dependencia de métricas de reglas general y estándares de calidad que no modelan adecuadamente los patrones de consumo energético relativo, debido a la ausencia y contraste de información relevante de una población existente que pueda ser validada mediante la rigurosidad del método científico. La carencia de una metodología de diseño que permita optimizar el consumo energético relativo de las torres para su operatividad, ha desincentivado a los mercados inversionistas y ha producido una especulación de precios los cuales están basados en las etiquetas ecológicas las cuales no son del todo precisas para determinar y optimizar los requerimientos energéticos de los edificios en la ciudad de Quito, por lo tanto, en el presente trabajo se propone una metodología de diseño que modele adecuadamente los patrones de consumo energético en función de los índices de ocupación, actividad y características de diseño, datos que facilitarán la estimación de un índice multifactorial que permitirá estimar el consumo energético relativo y permita la comparación de rendimientos entre los individuos de la muestra.

DESCRIPTORES: Edificios, Energía, Impacto Ambiental, Optimización, Fachada, Variables, Ocupación, Índices de Actividad.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y ARTES APLICADAS

ABSTRACT

THEME: "DESIGN METHODOLOGY TO OPTIMIZE BUILDING FACADES ACCORDING TO THERMODYNAMIC CHANGES IN QUITO, 2019"

AUTHOR: Christian Efrén Darquea Ponce

TUTOR: Arq. Sebastián Alexander Alvarado Grugiel MS.C

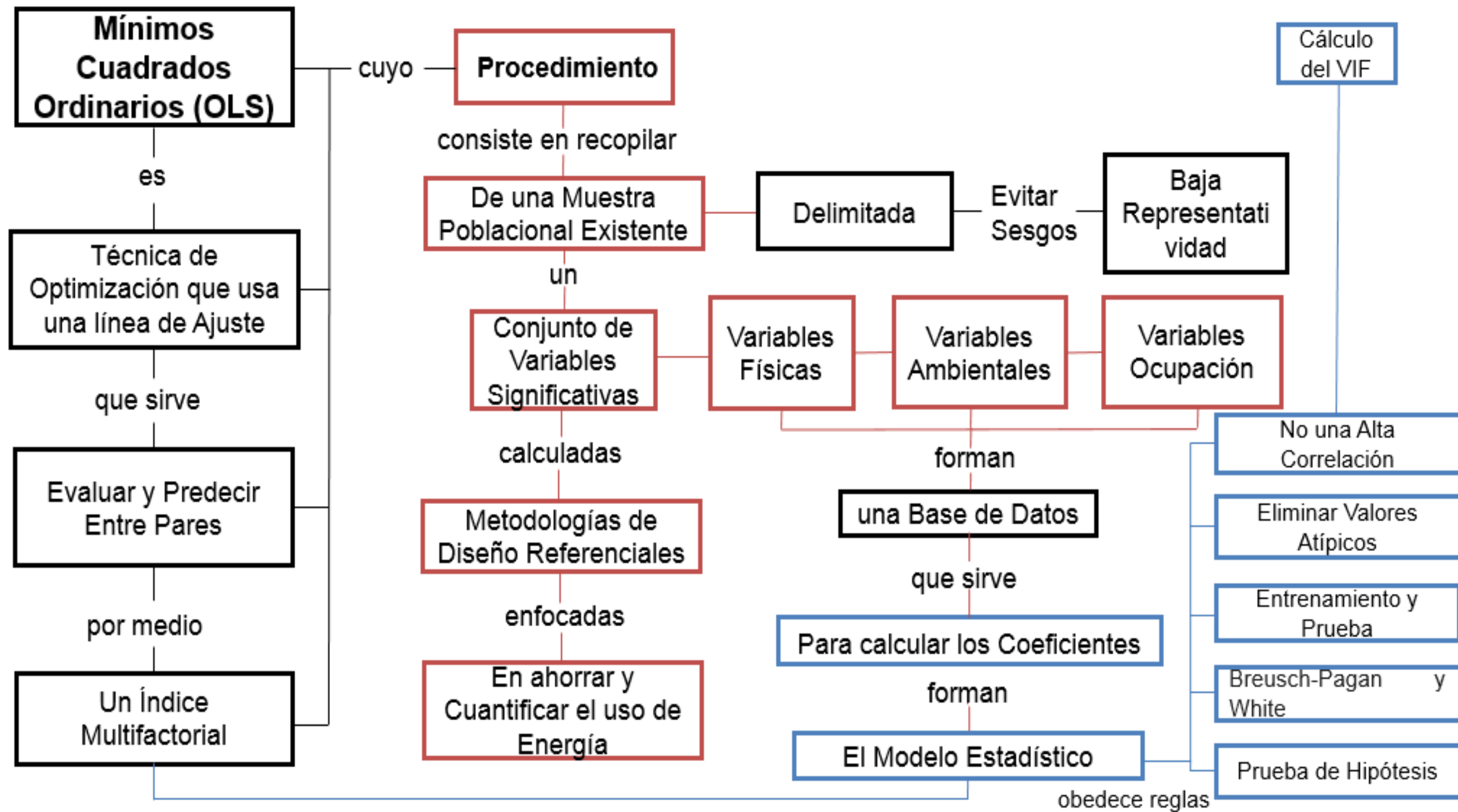
In recent years, the world's cities have experienced significant population growth, which has forced local governments to make decisions in order to crush the demand for living space, in addition to satisfying the urban functions that are required in these places for the establishment of adequate quality of life standards. The building typology of varying heights and skyscrapers offers a potentially optimal solution, however these structures represent in most cases a greater environmental impact due to the high energy requirement for the operation of these buildings, an issue that has been further aggravated in recent years by the reliance on metrics of general rules and quality standards that do not adequately model relative energy consumption patterns, due to the absence and contrast of relevant information from an existing population that can be validated by the rigorous scientific method. The lack of a design methodology to optimize the relative energy consumption of the towers to function effectively has discouraged investment markets and has produced price speculation which are based on eco-labels which are not entirely accurate in determining and optimizing the energy requirements of buildings in Quito, therefore, this paper proposes a design methodology that properly models energy consumption patterns according to occupancy rates, activity and design characteristics, the data will facilitate the estimation of a multifactorial index that will allow the estimation of relative energy consumption and enable the performance comparison among the individuals in the sample.

KEYWORDS: Buildings, Energy, Environmental Impact, Optimization, Facade, Variables, Occupancy, Activity Rates



Reviewed by: Mgs. Rocío Patiño F.

Gráfico 1: Tabla Resumen del Presente Trabajo.



Fuente: Tabla de Resumen en la Cual se Especifica los Pasos que con Lleva la Ejecución de la "Técnica Mínimos Cuadrados Ordinarios o OLS (Ordinary Least Squares)"; Cuadro Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Tema

“METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OPTIMIZAR FACHADAS DE EDIFICIOS EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS TERMODINÁMICOS EN QUITO, 2019”

Señalamiento de Variables

1.1. Variable Independiente

Eficiencia energética de los edificios tipo torre.

1.2. Variable Dependiente

Análisis comparativo de variables ambientales, arquitectónicas y de índices de actividad.

Líneas de Investigación

Esta línea de investigación apunta a buscar respuestas a problemáticas relacionadas con: el hábitat social, los materiales y sistemas constructivos, los materiales locales, la arquitectura bioclimática, la construcción sismo resistente, el patrimonio, la infraestructura e instalaciones urbanas, el equipamiento social. (INDOAMÉRICA, 2017)

1. Planteamiento de Problema

1.1. Formulación del Problema

¿Cuáles han sido los impactos ambientales relacionados al consumo de energía en edificaciones de variadas alturas?

¿Cuáles son los factores que definen el consumo energético en los edificios en base a las dinámicas de mercado?

Delimitación Espacial: Evaluar el desempeño energético de los edificios de igual o más de 4000 m² de construcción.

Delimitación Temporal: 2019 - 2020

1.2. La Construcción de Edificios en Auge

La migración de la población rural hacia las ciudades ha traído consigo una gran variedad de consecuencias positivas y negativas, en varios países se ha tomado decisiones para apalear la creciente demanda de espacios habitables en las ciudades, y entre las opciones disponibles se ha optado por “la tipología de los rascacielos como una importante solución de alta concentración para los centros urbanos ya densos”. (T. Sultana Saroglou, 2017).

La transformación de las ciudades debido a la construcción de edificios en altura ha sido reportada por una gran variedad de investigaciones y reportes, entre los cuales podemos citar el informe realizado por el Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano (CTBUH), el cual sostiene que:

La distribución de rascacielos de 200m de altura y más en todo el mundo hasta la fecha es la siguiente: China (348), Corea del Sur (48), Resto de Asia (140), Australia (27), Europa (37), Medio Oriente (120), USA (169). (T. Sultana Saroglou, 2017)

“A excepción de los Estados Unidos, donde la construcción de rascacielos se distribuye de manera uniforme a lo largo del siglo XX” (T. Sultana Saroglou, 2017), gracias a un estable sistema económico y de desarrollo, la construcción de edificios cada vez más altos es una tendencia, por ejemplo, “el auge de los rascacielos en China se inició en la década de 1990, lo que refleja el rápido ritmo de urbanización del país” (T. Sultana Saroglou, 2017), mientras que en el Medio Oriente la construcción de edificios de variadas alturas empezó “a partir del 2000 como una

herramienta para avanzar e influenciar en la economía y política”. (T. Soutana Saroglou, 2017).

En otras ciudades “como Tel Aviv, en Israel cambiaron sus políticas de planificación para permitir la construcción de rascacielos en el futuro” (T. Soutana Saroglou, 2017), por ejemplo, el Comité de Planificación y Construcción de la ciudad de Tel Aviv “emitió el plan maestro de la ciudad para el 2025 que ha establecido nuevas pautas sobre el desarrollo de edificios” (T. Soutana Saroglou, 2017) de variadas alturas.

Debido a que la población mundial se urbaniza progresivamente nace la necesidad de “establecer un enfoque sostenible que disminuya el impacto ambiental de las ciudades” (T. Soutana Saroglou, 2017). Lamentablemente los edificios contemporáneos no presentan una solución exitosa e integral para una población en aumento, o como prosperidad económica ya que están vinculados a demandas de alta energía. (T. Soutana Saroglou, 2017).

La arquitectura del siglo XX, por lo tanto, se “caracteriza por una desviación de las consideraciones climáticas y la dependencia de los medios mecánicos para la operación del edificio” (T. Soutana Saroglou, 2017), siendo esta una reflexión que afecta a los edificios de variadas alturas de manera generalizada.

1.3. El impacto de los Edificios al Medio Ambiente y el Contexto Construido

Los edificios que se han sido construidos en los últimos años y en gran medida los rascacielos “son edificios muy grandes y su impacto en el tejido urbano y medio ambiente en general es mucho mayor” (T. Soutana Saroglou, 2017). Hoy en día la industria de la construcción se la considera como “el sector con mayor consumo de energía, con edificios que representan cerca del 50% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂)” (T. Soutana Saroglou, 2017), la difusión de dichos gases se debe en gran medida por la combustión de combustibles fósiles para la operatividad del edificio; la energía que se utiliza para el funcionamiento de la

construcción se la define como energía operática (OE), y la energía que ingresa al inmueble se precisa como energía incorporada (EE).

Las emisiones producidas a partir de la energía quemada por las torres “forman la mayor fuente de emisiones de GHG¹, de acuerdo a la UNEP² SBCI³” (T. Soutana Saroglou, 2017), entonces; los procesos para optimizar los edificios sean estos de variadas alturas debe apuntar “hacia la reducción de las emisiones de GHG” (T. Soutana Saroglou, 2017) lo que significa gestionar de mejor manera la eficiencia energética de los edificios.

“La economía de energía renovable será una parte importante para las futuras reservas de energía” (T. Soutana Saroglou, 2017), pero las mejores respuestas para enfrentar el excesivo consumo energético de un edificio se las encuentra mientras el proyecto aún está en las etapas preliminares de diseño, fase en la cual se debe planificar “una estrategia de diseño de acuerdo con las condiciones climáticas regionales” (T. Soutana Saroglou, 2017), evitando de esta manera

¹ GHG: Greenhouse Gas, gas de efecto invernadero. (T. Soutana Saroglou, 2017)

² UNEP: United Nations Environment Programme, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (T. Soutana Saroglou, 2017)

³ SBCI: Sustainable Buildings and Climate Initiative, Edificios Sustentables e Iniciativas Climáticas, es una propuesta que forma parte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (T. Soutana Saroglou, 2017)

dependen desmesuradamente del uso de equipos garantizando la habitabilidad de la construcción.

1.4. Los Retos que Supone la Cuantificación del Uso de Energía en los Edificios de Variadas Alturas

Las iniciativas de eficiencia energética que se han adaptado a los edificios de variadas alturas, como por ejemplo las que se han tenido que adherir los inmuebles del sector comercial se ha visto obstaculizadas por la limitación de datos, asimetrías de información, y por metodologías de evaluación comparativa que no modelan adecuadamente los patrones de consumo de energía, ni proporcionan medidas precisas de rendimiento energético relativo. (Kontokosta, 2014).

Entonces, la confianza depositada en los modelos de medición como es el caso de Energy Use Intensity (EUI), no toma en cuenta la variación significativa entre la ocupación, las características de construcción y otros elementos de un edificio, tanto su diseño como sus usuarios, que influyen en el consumo de energía del inmueble (Kontokosta, 2014).

Por lo general los Edificios en altura y peor aún los rascacielos se caracterizan por poseer “mayores niveles de consumo de energía, en relación con las estructuras de poca

altura” (T. Soultana Saroglou, 2017), razón por la cual es urgente establecer “un estudio a profundidad de sus operaciones y un enfoque en la cuantificación de sus necesidades energéticas” (T. Soultana Saroglou, 2017).

En la ciudad de New York se han planteado varias estrategias para mejorar los reportes de desempeño energético, por ejemplo, se han tomado como marco de referencia para el análisis de los edificios aspectos como:

El uso real de energía del edificio, características físicas y espaciales de ocupación; información que se ha recopilado en la base de datos de divulgación de energía de la Ley Local 84 de la ciudad de New York (Kontokosta, 2014), la cual ha servido para desarrollar modelos predictivos destinados a mejorar el consumo de energía enfocado a un mercado en particular, además de representar una crítica a las metodologías de evaluación tradicionales como es el caso del EUI y la HERS, y a los sistemas de certificación basados en etiquetas ecológicas aspectos que han afectado de manera significativa la cuantificación de energía real de los edificios.

1.4.1. El Desempeño Energético de los Edificios y los Modelos Existentes de Evaluación, Crítica a los Estándares Actuales

En los últimos años se ha popularizado conceptos como sustentabilidad y edificios verdes, ideas que han ganado fuerza sobre todo por connotaciones políticas que carecen de una base técnica sólida, razón por la cual también han aumentado las críticas a estas nuevas propuestas ecológicas que muchas veces son “afirmaciones sin fundamento de desempeño ambiental y que son, el mejor de los casos ambiguas y, el peor falsas” (Kontokosta, 2014). Esta realidad es aún más latente en industrias que tienen un complejo proceso de producción donde “los consumidores no discernen la naturaleza exacta de todos los materiales usados en la fabricación y es complicado afirmar su rendimiento” (Kontokosta, 2014).

Como ejemplo podemos citar los edificios comerciales de los cuales según el autor Constantine E. Kontokosta afirma lo siguiente:

Incluso cuando se disponen de datos de consumo de energía real, la comparación precisa del rendimiento energético relativo se complica por la variación en las

características físicas, la orientación espacial, la ocupación, el comportamiento de los ocupantes, y los sistemas instalados. No hay duda alguna que la confusión en torno al aumento de la eficiencia energética en las construcciones se ha visto agravada por una dependencia excesiva en métricas de regla general, en particular Energy Use Intensity (EUI); y las etiquetas ecológicas como indicadores del rendimiento energético. (Kontokosta, 2014)

Las medidas basadas en reglas métricas generales como es el caso de EUI, HERS y Edge; forman una ambigüedad en cuanto a las medidas de desempeño, creando una incertidumbre significativa para los mercados de capital que evalúan el valor de las implicaciones de riesgo de los edificios energéticamente eficientes (Kontokosta, 2014). Las consecuencias por lo tanto son negativas porque “se produce efectos económicos en los edificios los cuales se han centrado principalmente en el precio y ocupación en base a las etiquetas ecológicas” (Kontokosta, 2014).

Entonces, este impacto se refleja en un precio final irreal e inflado de las torres, que se debe principalmente por

⁴ EPA: Energy Star Rating System for Commercial Buildings, launched in 1999. (Kontokosta, 2014)

el uso de softwares de análisis de consumo energético caracterizados por datos incompletos sobre el consumo de energía real a nivel del edificio y las características relevantes del tipo de construcción, ubicación y ocupación.

Sin embargo, no todo es negativo, gracias a los nuevos requerimientos ambientales exigidos en los últimos años alrededor del mundo ha provocado nuevos retos como, “se ha comenzado a generar nuevos flujos de datos significativos sobre los patrones de consumo de energía en los edificios” (Kontokosta, 2014).

La finalidad de optar por nuevas formas de recopilación de información está estrechamente relacionada con el poder de predicción de medidas para cambiar el conocimiento y el comportamiento del mercado en torno al consumo de energía y, por lo tanto, generar una mayor demanda de propiedades con mayor eficiencia energética (Kontokosta, 2014).

Además, gracias a varias leyes en las cuales se exige un informe obligatorio del consumo de energía y otras características del edificio permite que el mercado identifique

⁵ CBECS: Commercial Buildings Energy Consumption Survey. (Kontokosta, 2014)

mejores y peores desempeños energéticos en base a una comparación de la intensidad real con la predicha por los modelos de regresión (Kontokosta, 2014). Los modelos de regresión son un “proceso de normalización que controla las características observadas del objeto de estudio” (Kontokosta, 2014).

En la actualidad hay varios softwares que son destinados a recopilar este tipo de información para gestar modelos regresivos, por ejemplo, en Estados Unidos se hace uso del software desarrollado por la “U.S Environmental Protection Agency’s (EPA)⁴”; (Kontokosta, 2014) este programa obtiene los diferentes datos de la (CBECS)⁵. La herramienta EPA esta normalizada para múltiples características de construcción y clima, para predecir el consumo de energía esperado y produce un rango percentil basado en una distribución de frecuencias de eficiencia energética para tipos de espacios similares (Kontokosta, 2014).

Con la finalidad de entender el consumo energético de los edificios en altura el autor del artículo “A Market-Specific

Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index”, propone un método para medir y modelar el desempeño energético de una forma distinta al modelo típico de intensidad de energía de métricas de eficiencia, y desarrollar un índice multi factorial de rendimiento energético del edificio (Kontokosta, 2014). Por lo tanto, para cuantificar de manera más precisa el desempeño energético relativo se propone los siguientes pasos:

1.- Establecer estrategias de diseño basadas en datos recopilados de una población existente, con el fin de establecer pautas de diseño basadas en evidencia, junto con una mitigación de riesgos para los inversionistas.

2.- Examinar las determinantes del consumo de energía de un edificio a través de numerosas características físicas de ocupación e implantación.

3.- Establecer el modelo predictivo para desarrollar un índice de rendimiento energético del edificio correspondiente a un sector comercial referencial y sustentado por una base de datos rica en información.

La finalidad del autor, por lo tanto, es explicar la importancia de las modificaciones de la metodología gestada

por la EPA y los estándares EUI y Edge; y explora las implicaciones de un sistema de evaluación comparativo específico del mercado que modela la eficiencia basada en los patrones reales de consumo de energía del edificio en ciudades y mercados particulares (Kontokosta, 2014).

El desarrollo de este índice y sus resultados respectivos están detallados en el capítulo III de este trabajo correspondiente a la metodología, la cual sirvió como marco de referencia para el desarrollo de esta tesis.

1.5. La Eficiencia Energética de los Edificios y los Sistemas Actuales de Certificación

Resulta indispensable entender el comportamiento del mercado para gestar un sistema de evaluación capaz de predecir el consumo energético y facultar una optimización del diseño arquitectónico en base a mejores y peores desempeños identificados por los inversores, muchas son las características que determinan un mayor o menor consumo energético, pero los atributos correspondientes a la forma del edificio afectarán significativamente el rendimiento del inmueble.

Las propiedades térmicas relacionadas a la geometría de la envolvente es uno “los componentes más importantes

para lograr el equilibrio térmico entre el clima interior y el exterior” (T. Soutana Saroglou, 2017), la fachada de la estructura y su comportamiento térmico deben “interactuar adecuadamente con las condiciones climáticas para alcanzar interiores sanos y cómodos”. (T. Soutana Saroglou, 2017).

El ahorro energético de una edificación puede ser perjudicado o beneficiado en base a los efectos térmicos que se producen en la envolvente; en el artículo titulado “Quantifying Energy Consumption in Skyscrapers of Various Heights” se describe en base a una serie de simulaciones que a nivel del suelo, nivel medio y piso superior las variaciones del consumo de energía de los diferentes niveles proporcionan la base para avanzar en la eficiencia energética de los rascacielos (T. Soutana Saroglou, 2017), y abren el camino a tomar estrategias de diseño que estimulen o mitiguen los efectos de la temperatura y su directa correlación con los índices de consumo.

Para verificar el éxito de la eficiencia alcanzada por un edificio se ha estipulado una serie de sistemas de

evaluación como, por ejemplo, los procedimientos LEED⁶, desarrollados por el Consejo de Construcción Verde de los Estados Unidos (US Green Building Council). Las prácticas LEED que se componen de un conjunto de normas para la utilización de estrategias que faciliten la sostenibilidad de los edificios con el objetivo de alcanzar una planificación sostenible de las estructuras en función del ahorro de recursos.

1.6.1 Valoración de las Estrategias Aplicadas en el Diseño y una Crítica a los Sistemas de Certificación

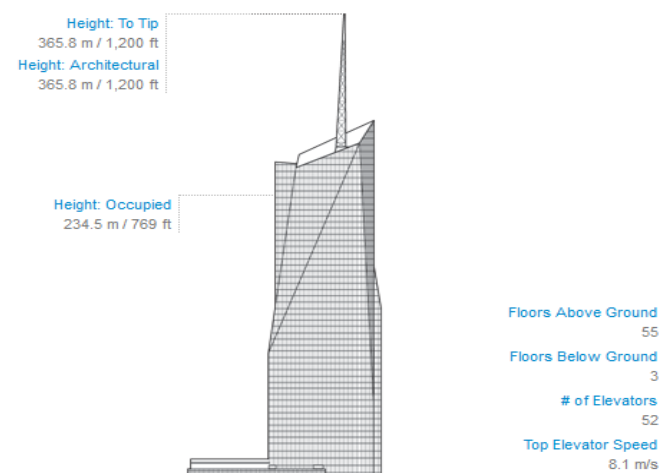
El edificio The Bank of America es “un buen ejemplo que demuestra los esfuerzos y las complejidades de la construcción sostenible” (T. Soutana Saroglou, 2017), esta torre que fue diseñada por el equipo Cook + Fox Architects en la ciudad de New York alcanzó los “336 metros de altura y fue completado en el año 2010”. (T. Soutana Saroglou, 2017). Esta torre que posee “aproximadamente 47000 m² de pisos comerciales y casi 10000 ocupantes por día” (T. Soutana Saroglou, 2017) fue diseñada con la finalidad de

⁶ LEED: Leadership in Energy and Environment Design, Liderazgo en Diseño de Energía y Medio Ambiente. (T. Soutana Saroglou, 2017)

“establecer nuevos estándares en el alto rendimiento de los edificios en altura, tanto para las personas que ocupan los espacios como para la ciudad en general”. (T. Soutana Saroglou, 2017).

El Bank of America fue certificado con LEED Platinum ‘Core and Shell’ otorgada por el departamento Green Building Council de los Estados Unidos, siendo el nivel más alto de certificación LEED (T. Soutana Saroglou, 2017), además, el Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano⁷ “le otorgó en el año 2010 el premio ‘Best Tall Building Award – Americas’”. En el gráfico 1 se puede observar la torre.

Gráfico 1: The Bank of America



Fuente: (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2020) “Fachada del Edificio”

⁷ Council of Tall Building and Urban Habitat. (T. Soutana Saroglou, 2017).

El Bank of America Tower posee especificaciones “que hacen del edificio una estructura altamente sofisticada y de alta calidad en términos de diseño y tecnologías utilizadas” (T. Soutana Saroglou, 2017), pero la ciudad de New York en el “año 2013 realizó un informe público sobre las operaciones del edificio que reveló que en el año 2012 tuvo una intensidad de uso de energía del sitio de 665 kWh/m² al año” (T. Soutana Saroglou, 2017), siendo por lo tanto un consumo “más alto que cualquier otro edificio de oficinas de tamaño comparable en Manhattan” (T. Soutana Saroglou, 2017). Arquitectos e Ingenieros empezaron a buscar las fallas que ocasionaron el excesivo gasto del Bank of America, llegando a la “conclusión de que gran parte de la alta energía consumida se debía al sistema de ventilación de gran tamaño que fue usado” (T. Soutana Saroglou, 2017), además hubo otros factores que también contribuyeron al problema tales como:

Las intenciones combinadas de cumplir con los requisitos del sistema de calificación sostenible, tratar con la interpretación jurisdiccional local y usar la práctica estándar

de la industria del diseño resultaron en un rendimiento excesivo del sistema; sin embargo, en el ejemplo del Bank of America, el consumo total de energía no solo se rige por las estrategias y especificaciones de diseño utilizadas, sino también por el uso del edificio (pisos comerciales con altos requisitos de energía informática) y el comportamiento de los ocupantes, que no fueron tomados en consideración.

Además, las altas tasas de consumo registradas en la torre evidenciaron las falencias de las pautas LEED como un procedimiento de certificación para alcanzar el desempeño ambiental de la estructura en su conjunto, y en determinar cuál es el rendimiento energético real del edificio (T. Soutana Saroglou, 2017); entonces, si bien es cierto que las certificaciones destinadas a salvaguardar el medio ambiente por medio de políticas públicas han beneficiado a la introducción de nuevos “productos ecológicos al mercado, el tema de la eficiencia energética sigue siendo un problema” (T. Soutana Saroglou, 2017), que no ha sido resultado y que en muchas ocasiones ha empeorado.

Según un estudio publicado por la HPB⁸ “en el año 2009, se determinó que calcular la intensidad del uso de energía (EUI) de un edificio es una tarea difícil” (T. Soutana Saroglou, 2017), este valor corresponde a una magnitud que consiste en “resumir toda la energía utilizada y dividida por el área del piso” (T. Soutana Saroglou, 2017) obteniendo de esta manera el EUI de la estructura; este dato por lo general se lo expresa como “kBtu / ft² o kWh / m² al año” (T. Soutana Saroglou, 2017).

La cifra del EUI es estimada durante el proceso de diseño, pero en el artículo publicado por la HPB establece que, aunque el modelo parece estar mejorando, existen inconsistencias sustanciales entre el EUI estimado a través del diseño y el EUI real cuando el edificio está ocupado (T. Soutana Saroglou, 2017), por lo tanto, los edificios de alto rendimiento que son aquellos que cumplen con las certificaciones correspondientes “están usando mucha energía de la prevista” (T. Soutana Saroglou, 2017) y como mejor ejemplo de este hecho podemos citar la torre Bank of America.

El conflicto para estimar el consumo energético real de un edificio radica en las problemáticas que representa el inmueble una vez que este ya ha sido ocupado, además, la eficiencia energética “debe prestar atención a las reducciones logradas a través del diseño” (T. Soutana Saroglou, 2017) y contemplar el consumo una vez que el edificio entre en operación; es decir cómo es el comportamiento del mercado y en qué medida este afectará al rendimiento previsto en las etapas de anteproyecto, además cómo afectan las variables ambientales en el consumo final, acaso se requieren de otras formas de evaluación para identificar los efectos aerodinámicos del viento en las estructuras y, como alcanzar cálculos más precisos para el diseño de los sistemas mecánicos.

1.6. Variables Ambientales que Afectan el Consumo Energético de los Edificios

A manera general podemos inferir que los edificios interactúan con el entorno exterior a través de la conducción (entre las superficies exteriores y el aire exterior), la convección (infiltración), y la radiación (a través de las aberturas de vidrio) (T. Soutana Saroglou, 2017). Además,

⁸ HPB: High Performing Buildings (T. Soutana Saroglou, 2017).

existen otros factores ambientales como es el caso de “la presión y la velocidad del viento” (T. Soutana Saroglou, 2017) que definirán el microclima de los edificios dependiendo de la altitud a la que se encuentra, por ejemplo “la velocidad del viento aumenta con la altitud, mientras que la temperatura disminuye” (T. Soutana Saroglou, 2017).

Todas las edificaciones que se levantan sobre la tierra están implantadas “dentro de la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, la cual se extiende desde el nivel del mar hasta aproximadamente 16 km de altura” (T. Soutana Saroglou, 2017).

Podemos inferir que en la troposfera “la temperatura disminuye con la altura a una velocidad casi lineal, de aproximadamente 1 C por 150m” (T. Soutana Saroglou, 2017), entonces, es fundamental analizar “la disminución de la temperatura con la altitud y sus efectos sobre el consumo de energía en las estructuras de gran tamaño” (T. Soutana Saroglou, 2017) pues estos cálculos son los que servirán para dimensionar los equipos de climatización en los edificios; en el caso de la torre Bank of America, una incorrecta interpretación de las variables ambientales causó que los

sistemas de ventilación no sean correctamente dimensionados.

La temperatura del viento juega un papel fundamental para diagnosticar la temperatura de un edificio, tomando en cuenta que “la altura típica de los anemómetros de las estaciones meteorológicas es de 10 metros sobre el suelo” (T. Soutana Saroglou, 2017), suele ser crítico “realizar cálculos adicionales para las velocidades del viento a altitudes más altas en el diseño de edificios” (T. Soutana Saroglou, 2017), ya sean estos de múltiples alturas, también hay que recalcar que las condiciones geográficas son aún más adversas en base a una topografía irregular lo que provoca que las altitudes sean aún más variadas al igual que la interpretación de los valores ambientales.

Existen términos y condiciones de consenso para calcular las velocidades del viento a partir de ecuaciones, por ejemplo, “según la ASHARAE del 2009, la velocidad media del viento por hora (UH), de un viento ininterrumpido que se acerca a un edificio en su terreno local se puede calcular” (T. Soutana Saroglou, 2017) usando la expresión representada en el en la siguiente ilustración:

Gráfico 2: Fórmula ASHARE.

$$U_H = U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^\alpha$$

Fuente: (T. Soutana Saroglou, 2017) “fórmula para calcular las implicaciones del viento.

Donde: “ U_H = la velocidad promedio del viento por hora, U_{met} = es la altura sobre el suelo” (T. Soutana Saroglou, 2017), mientras que los valores alfa y stigma se los puede escoger de la tabla que a continuación se expone.

Gráfico 3: Velocidades del Viento

Table 1. Wind Speed Profile Coefficients (ASHRAE Fundamentals 2005)

Terrain Category	Description	Exponent a	Layer thickness δ , m
1	Large city centers, in which at least 50% of buildings are higher than 21 m, over a distance of at least 2000 meters upwind	0.33	460
2	Urban, suburban, wooded areas, and other areas with closely spaced obstructions compared to or larger than single-family dwellings (over a distance of at least 2000 meters upwind)	0.22	370
3	Open terrain with scattered obstacles generally less than 10 meters height, including flat open country typical of meteorological station surroundings	0.14	270
4	Flat, unobstructed areas exposed to wind flowing over a large water body (no more than 500 meters inland)	0.10	210

Fuente: (T. Soutana Saroglou, 2017) “Coeficientes de Perfil de Velocidad del viento.

En el artículo “Quantifying Energy Consumption in Skyscrapers of Various Heights”, se realizó una serie de simulaciones térmicas para verifica los “efectos de la velocidad del viento y la temperatura del aire en un modelo de edificio independiente de 60 pisos de altura” (T. Soutana Saroglou, 2017), para lo cual se utilizó el software Energy Plus, que “incorpora una variable en sus simulaciones que estima la aceleración del viento con la altura” (T. Soutana Saroglou, 2017) en base a la expresión formulada por la

ASHRAE del año 2009 “y la tasa de caída de temperatura del aire por elevación” (T. Soutana Saroglou, 2017).

Las simulaciones mostraron que el efecto del cambio de la velocidad del viento fue dominante en los primeros 10 pisos, mientras que sobre el piso 25 el efecto de la caída de la temperatura fue primordial (T. Soutana Saroglou, 2017), por lo tanto, la estimación de estas dos variables fue de gran ayuda para lograr un mejor desempeño de los edificios en las etapas de diseño.

En el artículo “Quantifying Energy Consumption in Skyscrapers of Various Heights”, se detallan “otros estudios realizados en EnergyPlus, sobre el efecto del microclima cambiante en relación con la altitud” (T. Soutana Saroglou, 2017); lo que facilita la formulación de estrategias para alcanzar la eficiencia energética de las estructuras, como ejemplo podemos citar a la Torre Internacional de Teherán, de “165 m de altura” (T. Soutana Saroglou, 2017), este edificio se encuentra ubicado en un terreno totalmente abierto sin la sombra de edificios vecinos.

El clima de Teherán es cálido y árido durante el verano y frío durante en invierno, las simulaciones mostraron reducciones de 2,4% en el consumo de energía a mayores

altitudes (T. Soutana Saroglou, 2017), entonces, las estrategias que se tomaron fueron las siguientes:

La caída de temperatura y la velocidad del viento reducen la energía de enfriamiento durante el verano en los pisos superiores; mientras que las ventanas de 1,4 m x 3.0 m de la torre ubicadas dentro del hueco de concreto de 1.2 m de profundidad también reducen el consumo de energía para refrigeración al bloquear el sol del verano de ángulo alto; mientras que en invierno el sol calienta pasivamente el edificio, minimizando así la energía de calentamiento durante el invierno. (T. Soutana Saroglou, 2017). El edificio se lo puede apreciar en la siguiente ilustración:

Gráfico 4: Tehran International Tower



Fuente: (Council on Tall Buildings and Urban Habitat , 2020) “Tehran International Tower”.

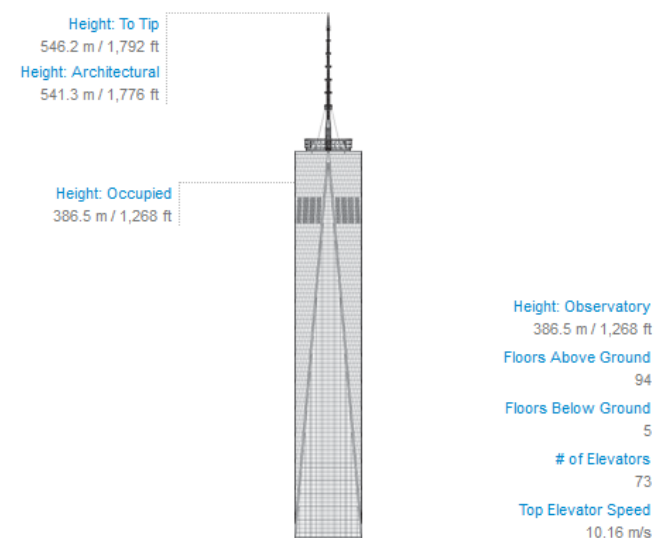
En la ciudad de New York se realizaron estudios para optimizar la Freedom Tower, un edificio cuyo contexto se caracteriza “por un entorno urbano denso y los efectos de la sombra de los edificios altos circundantes juegan un papel importante en las simulaciones” (T. Soutana Saroglou, 2017). Este edificio “se eleva a una altura de 541 m y se utiliza para fines comerciales” (T. Soutana Saroglou, 2017); los resultados de las simulaciones para determinar el EUI de la edificación determinó que la mayoría de la energía se la usaba para el funcionamiento de “luces, equipos de calefacción y refrigeración” (T. Soutana Saroglou, 2017), siendo de mayor trascendencia “el enfriamiento debido a las altas ganancias internas (luces, equipos y ocupantes)” (T. Soutana Saroglou, 2017).

La temperatura del viento y su velocidad fueron aspectos fundamentales para lograr la optimización energética, ya que en los niveles superiores se “redujo la energía de enfriamiento” (T. Soutana Saroglou, 2017) gracias a que el aire exterior es más frío y existe una mayor velocidad, mientras que “a altitudes más bajas el sombreado de otros edificios también redujo las cargas de enfriamiento”

(T. Soultana Saroglou, 2017). La temperatura del aire a diferentes altitudes varió “aproximadamente 1,85 C entre las elevaciones de 1,5 m y 284 m de altura mientras que el viento aceleró de 2,46 m/s a 7,75 m/s” (T. Soultana Saroglou, 2017).

El consumo de energía que se usa en los días de verano destinados para la refrigeración en los pisos superiores se redujo en “2,4 % mientras que con respecto al EUI anual se encontró un aumento neto del 9 % para refrigeración debido a la disminución de sombra en los pisos superiores” (T. Soultana Saroglou, 2017), razón por la cual se debió incluir ciertos elementos de protección para apalear el consumo en los pisos superiores. En el gráfico 5 se puede observar la fachada de la torre.

Gráfico 5: One World Trade Center



Fuente: (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2020). “Fachada del Edificio”.

Como se ha podido constatar en los ejemplos anteriores el EUI que utiliza un edificio depende de una serie de variables como, por ejemplo, el diseño de dispositivos de sombreado, la sombra de edificios circundantes, las ganancias internas de calor y la forma del edificio (T. Soultana Saroglou, 2017), donde la envolvente del edificio es fundamental, para enfrentar la aceleración del viento y su temperatura factores que alteran el consumo energético de un edificio.

Entonces, las implicaciones de la altitud son determinantes al momento de cuantificar los valores correspondientes a las variables ambientales como es el caso de la temperatura, presión y velocidad; si bien es cierto que se han logrado buenos resultados usando la fórmula propuesta por la ASHRAE, esta no contempla de manera independiente las variaciones del microclima en cada edificación ni los efectos aerodinámicos que configuraciones geométricas no tradicionales implican.

Cabe recalcar que se debe contemplar las demandas del mercado para gestar confiables modelos de evaluación energética, y en los últimos años las configuraciones

asimétricas son las que han ganado más acogida en la constitución morfológica de los edificios.

1.7. El Rechazo de las Configuraciones Tradicionales y una Alta Demanda por Edificios Novedosos para Enfrentar las Cargas de Viento y sus Efectos

Tradicionalmente a los edificios en altura se los ha construido con formas simétricas “con la finalidad de evitar las vibraciones torsionales inducidas sísmicamente debido a la excentricidad” (Bandi, 2013) que una forma con apariencia más libre puede ocasionar; esta tendencia se ha enmarcado con más fuerza sobre todo en países donde el riesgo sísmico es mayor, como es el caso de Japón. Pero en los últimos años los edificios “se han liberado del hechizo del diseño obligatorio de figuras simétricas, y el diseño de estilo libre está aumentando” (Bandi, 2013).

Los edificios en altura tomaron un nuevo rumbo en cuanto a su planificación refiere, una vez que el Burj Kalifa fue completado en el año 2010, al igual que otras super-tall

buildings⁹ que estaban en proyecto; en la actualidad el edificio más alto del mundo es el Burj Kalifa el cual posee 828 m de altura (Bandi, 2013), este edificio marcó el inicio de nuevas tendencias, soluciones y adversidades; porque para la “próxima década el edificio más alto será el Kingdom Tower (más de 1000m), el cual se calcula que estará terminado para el año 2018” (Bandi, 2013).

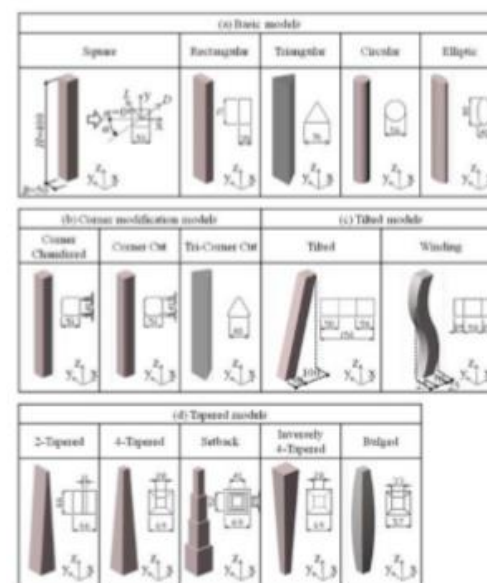
La construcción de edificios y rascacielos es un fenómeno que se lo conoce como manhattanization¹⁰, pero los procesos de densificación vertical que hoy en día se están gestando en muchos países difiere de la densificación experimentada por los Estados Unidos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, especialmente por el empleo y demanda de perfiles asimétricos y libres con los cuales se está edificando, dando cabida a una nueva expresión.

Este nuevo estilo bautizado como freewheeling¹¹ tiene ventajas no solo en el diseño arquitectónico que refleja el espíritu desafiante de los arquitectos a nuevas formas, sino también en el diseño estructural que reduce las cargas de viento (Bandi, 2013). Una mala respuesta a las cargas de

viento determinará “la seguridad y habitabilidad de los edificios” (Bandi, 2013).

“La efectividad de las modificaciones aerodinámicas para reducir las cargas de viento han sido ampliamente reportadas” (Bandi, 2013); entre las formas que mayor éxito han tenido son aquellas que “incluyen una forma seccional como polígono, tipo Y, tipo cono o también aquellos que han incluido aberturas” (Bandi, 2013), algunos ejemplos de estos nuevas formas se pueden apreciar en el gráfico 6.

Gráfico 6: Formas no Convencionales



Fuente: (Bandi, 2013) “Ejemplos de algunas formas no convencionales de edificios que poseen mejor desempeño estructural”.

Para poder entender los efectos aerodinámicos del viento sobre los edificios; sean estos de variadas alturas, muchos estudios se han “centrado en los efectos en una sola modificación aerodinámica que cambia sistemáticamente” (Bandi, 2013); en el artículo titulado “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations” se especifican algunas conclusiones que se han obtenido gracias a dichos análisis como, por ejemplo:

Para edificios con sus esquinas modificadas, se resaltaron varias maneras de modificarlas y varias longitudes de modificación, y para edificios cónicos; los efectos de diferentes proporciones de conicidad fueron la principal preocupación (Bandi, 2013).

Entonces, el autor Eswara Kumar Bandi, plantea la necesidad de investigar las características aerodinámicas de los edificios con configuraciones no convencionales para proporcionar al diseñador estructural datos completos de

⁹ Super-Tall Buildings: Edificios que tienen una altura igual a 1000 m o superior. (Bandi, 2013).

¹⁰ Manhattanization: Tendencia de una sociedad la cual empieza a construir edificios de variadas alturas. (Bandi, 2013).

¹¹ Freewheeling: Estilo libre exento de reglas estéticas comúnmente usado en los movimientos y estilos arquitectónicos tradicionales. (Bandi, 2013).

pruebas de túnel de viento que se pueda usar en las etapas preliminares de diseño (Bandi, 2013).

Por lo tanto, la finalidad de este estudio de fin de carrera, es tomar como marco de referencia dicho estudio para comprender cuales son los efectos del viento sobre la geometría de estas edificaciones y que efectos termodinámicos podemos interpretar en base a su configuración, permitiendo de esta manera explicar las simulaciones llevadas a cabo en base a cálculos CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), aplicadas a los edificios de variadas alturas en la ciudad de Quito y determinar cómo se ve afectado el consumo energético fruto de la intervención de factores tales como la presión, temperatura y velocidad.

1.8. La Dinámica de Crecimiento de las Ciudades Contemporáneas que Quito está Experimentando

La gran mayoría de ciudades hoy en día se caracterizan por “el aumento acelerado de las poblaciones, tanto por procesos migratorios como por el incremento natural de la población” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), factores que tienen un impacto directo sobre el consumo de los recursos; además la urbe

experimenta una expansión por el territorio y “se pierde la estructura de la ciudad” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) compacta.

El ritmo de crecimiento el cual experimentan las ciudades actuales sumado al aumento de la complejidad de sus sistemas “fundamenta el derroche del suelo, materia y energía” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), la problemática parece agravarse más porque no se persigue “el principio de maximización de la entropía en términos de información ni tampoco el de minimización de la entropía proyectada en el entorno.” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

Las problemáticas de la ciudad contemporánea con sus consecuentes conflictos poseen una “dimensiones de carácter local pero también se proyecta globalmente” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), resultando difícil explicar cualquier acontecimiento sin prestar atención ambas escalas. Es una realidad inexorable que cualquier actividad del ser humano acarrea un efecto positivo o negativo en el ambiente ya que el impacto siempre existirá, pero como se sostiene en el documento titulado “Plan de Indicadores de Sostenibilidad Urbana de Vitoria–Gasteiz”.

El funcionamiento de una ciudad tiene repercusiones en el entorno inmediato y también en escenarios mayores. Los circuitos de la materia y de la energía que se dan cita en las ciudades suponen una emisión de contaminantes y disipación energética y hacen aumentar la entropía y la degradación del suelo, del medio atmosférico y del medio acuoso, tanto a escala local como global. (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

Las ciudades son sistemas creados por la naturaleza propia del ser humano en las cuales se “producen la mayoría de relaciones e intercambios de materia, energía e información” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010). Las ciudades tienen que competir entre sí mediante la “explotación de recursos y otros sistemas con el propósito de mantener y aumentar la complejidad de su estructura” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

Entonces, es indispensable que se gestionen nuevos modelos de “contención, equilibrio y estabilidad, con nuevas propuestas de organización y funcionamiento” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) con la finalidad de reducir la entropía proyectada en el entorno. Las

ciudades, sin embargo, requieran de esfuerzos de transformación.

Estos cambios en la ciudad son necesarios para aliviar las cargas sobre el medio ambiente, y requiere como primer paso la definición de límites ecológicos, es decir, la definición de la cedula básica mínima para cubrir las necesidades básicas de mantenimiento de las personas y organizaciones del sistema urbano (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010); es decir establecer márgenes en los cuales la población pueda abastecer sus necesidades de manera particular en función de las capacidades de carga, condiciones climáticas, disponibilidad de recursos esenciales para el desarrollo de la vida como es el agua y el suelo.

El concepto referente a la capacidad de carga se “define en ecología, como la población máxima de una especie que puede mantenerse sustentablemente en un territorio sin deteriorar su base de recursos” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), siendo la base de referencia el nivel de “explotación y presión antrópica a que se puede someter a los ecosistemas que soportan nuestra

vida y organizaciones” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

Los sistemas urbanos que soportan las cargas de la vida tienen una capacidad limitada, entonces, una ciudad no debe explotar a “un ritmo superior a su generación o sustitución, ni producir unos niveles de contaminación por encima de su asimilación natural” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), pero una ciudad tampoco funciona si no es “capaz, recurriendo a sus propias infraestructuras y capacidades de carga, de satisfacer las necesidades” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) individuales de sus ciudadanos.

1.9. La Ocupación del Suelo por Parte de la Ciudad de Quito y la Densificación Vertical como la Solución más Viable

“Las ciudades ya no son núcleos aislados en el territorio sino que se extienden en áreas urbanas o metropolitanas” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), estas superficies poseen “diferentes grados de fragmentación, densidad y concentración de actividades y núcleos poblacionales” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), con el aumento gradual de los

sectores artificiales “la pérdida de superficies forestales y agrícolas de alto valor” es un hecho inexorable” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

La ciudad de Quito en los últimos 30 años ha experimentado un proceso de crecimiento poblacional y expansión de los sectores artificiales vinculados a zonas comerciales, industriales, de transporte (incluidas las redes viarias y terrenos asociados), zonas de extracción minera y de construcción y zonas verdes artificiales (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

El suelo considerado de naturaleza urbana ha crecido de una manera alarmante en los últimos 30 años, este crecimiento no está vinculado de manera directa por el uso de “estrategias de extracción de riqueza y empleo” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), vinculados a una estabilidad de mercado; ya que el Ecuador en general ha vivido una desestabilidad económica reflejada en las grandes recesiones de los años 2000 y 2016; producto del fracaso del sistema socialista del siglo XIX.

Por lo tanto, la gran expansión urbana de los últimos años en la ciudad de Quito se debe a un aumento en su población, producto de las migraciones provenientes de la

zona rural hacia las periferias de la urbe; este fenómeno se debe a las condiciones de extrema pobreza en las que está inmersa la población rural en comparación con las condiciones que puede ofrecer la ciudad. En el gráfico 7 y 8, se observa el crecimiento de la población entre los años de 1990 y 2010. La desviación estándar de los rangos percentiles correspondientes a la densidad poblacional del año de 1990 es de 411.10, en el año 2001 se calcula una desviación típica de 232.64 y finalmente el año 2010 se registra una dispersión correspondiente a 1642.41.

Si tomamos en cuenta que los promedios para cada año corresponden a 520, 294.289 y 2078.5; podemos concluir que el grado de dispersión para cada año resulta en 108.9, 61.649 y 436.09; entonces en el lapso de 10 años, correspondiente al período 2001-2010; podemos identificar una tendencia central que se ha mantenido al alza de manera significativa, cabe recalcar que esta tendencia se ha conservado hasta el año 2020; razón por la cual Quito hoy en día es la ciudad más poblada del país.

En un contexto urbano es deseable que exista “una suficiente masa crítica de personas para que se pueda desarrollar con fluidez las funciones urbanas” (Agencia

Ecología Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), ya sean estas metabólicas como por ejemplo (energía y materiales) o también aquellas relacionadas con la información (relación e intercambio); pero sin que “ello suponga una congestión excesiva a los habitantes de la ciudad” (Agencia Ecología Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

Para que el desarrollo de las funciones urbanas se gesten de forma equilibrada el intervalo de densidad adecuado “suele moverse entre 250 – 350 hab/ha, lo que se traduce en un número de viviendas más o menos variable en función a la ocupación media que tenga la ciudad”. (Agencia Ecología Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

En la figura 8 podemos constatar la desviación estándar de la densidad de construcciones existentes en la ciudad de Quito, cuyo valor corresponde a 16.40 y un promedio igual a 20.78, obteniendo de esta manera un grado de dispersión correspondiente a 4.38.

Entonces como se sostiene en el documento “Plan de Indicadores de Sostenibilidad Urbana de Vitoria – Gasteiz”:

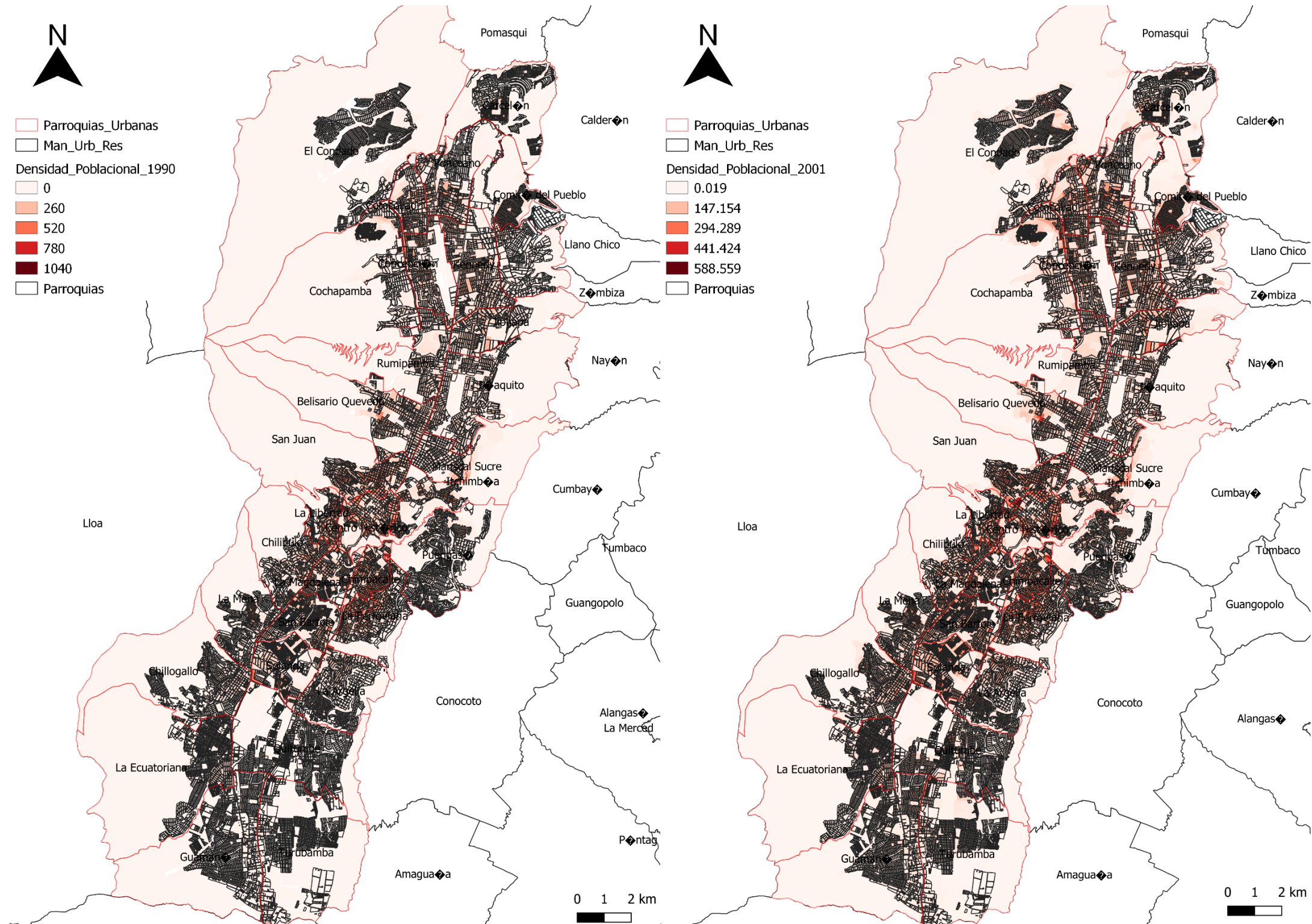
Las densidades que se encuentren muy por encima o por debajo de estos valores no son deseables en un escenario

más sostenible. El primer caso representa una congestión que supone un coste para la población en términos de espacio público y servicios y el segundo responde a una tipología edificatoria demasiado dispersa que conlleva a un mayor consumo de recursos y que no proporciona suficiente tensión para que se desarrollen con normalidad las funciones urbanas. (Agencia Ecología Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

La cuantificación de la densidad edificatoria es la forma más eficiente de diagnóstico que facilita constatar que la ciudad de Quito está experimentando un crecimiento desmesurado en su población y en un derroche de sus recursos debido a la implantación de cada vez nuevos asentamientos más dispersos que no contemplan lógicas de localización.

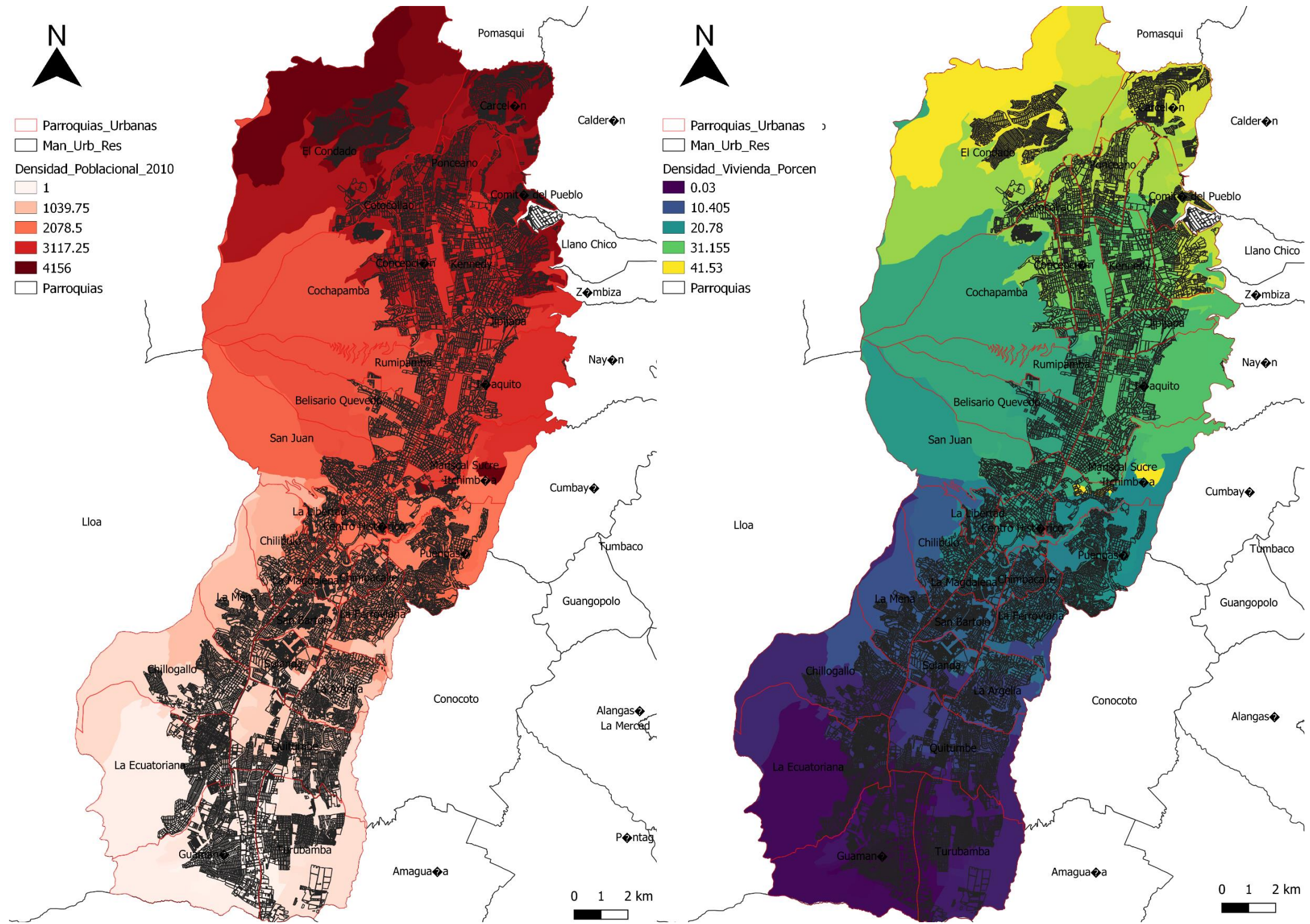
Por lo tanto, optar por una densificación en altura es la opción más adecuada porque facilita el intercambio y relación sin un gasto excesivo de materiales y energía, además de salvaguardar el suelo agrícola y natural de las periferias de la ciudad, es decir la construcción de edificios de variadas alturas como es el caso de rascacielos sería la opción más amigable con el ambiente.

Gráfico 7: Densidad Poblacional



Fuente: Densidad poblacional de los años 1990 y 2001, gráficos elaborados en base a los mapas referenciales de la fuente (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona, Diciembre 2010)

Gráfico 8: Densidad de Construcciones en Quito



Fuente: Densidad poblacional del año 2010 y densidad de construcciones, gráficos elaborados en base a los mapas referenciales de la fuente (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona, Diciembre 2010)

1.10. Las Limitaciones Geográficas de la Ciudad de

Quito

La ciudad de Quito también se caracteriza por su situación geográfica; ubicada en la hoya de Guayllabamba, con montañas y quebradas al lado Este, el Macizo de los Pichinchas ubicados al Oeste, al Norte cuyas planicies se estrechan limitando el espacio libre del Valle; mientras que otra es la historia al lado Sur, donde existe una mayor disposición de espacios libres, pero empiezan los conflictos administrativos, porque donde el valle parece ensancharse son territorios del cantón Mejía, otra zona administrativa independiente de la provincia de Pichincha.

En la figura 9 se puede identificar el paisaje que caracteriza a la ciudad, la cual parece encerrar a la capital del Ecuador entre montañas y quebradas que fragmentan el valle limitando las estrategias de expansión urbe.

Gráfico 9: Ciudad de Quito



Fuente: (Wikipedia La enciclopedia libre, 2020) "Paisaje de la ciudad".

Justificación

Como lo plantean los autores del artículo "Quantifying Energy Consumption in Skyscrapers of Various Heights", muchas ciudades en el resto del mundo están atravesando cambios al igual que la ciudad de Quito, la cual está experimentando una explosión demográfica que consume el suelo natural de manera alarmante. Además, la presión del volumen edificado disperso maximiza la entropía proyectada en el entorno y minimiza la entropía en términos de información e intercambio; producto de una localización ineficiente de las edificaciones que no persigue una lógica de mercado.

De forma similar a la ciudad de Tel Aviv, Quito está cambiando sus políticas de planificación para permitir la densificación vertical, estos esfuerzos se los puede constatar en el "Plan Especial Bicentenario para la Consolidación del Parque de la Ciudad y el Redesarrollo de su Entorno Urbano".

Lamentablemente el instrumento normativo actual de Quito no prevé de manera técnica ni científica el impacto ambiental que conlleva la construcción de edificios de variadas alturas, y se hecha a un lado iniciativas y estrategias

que faculten mitigar la alta demanda energética de los edificios en base a normas que permitan al mercado inversionista identificar mejores y peores desempeños en base a una comparación de la intensidad usada por las torres de mercados específicos.

Además, con la inserción de medidas basadas en reglas de métricas generales como es el caso de Edge, se promueve la limitación de datos y metodologías que modelen adecuadamente los patrones de consumo en función de los índices de ocupación, características de construcción y otros elementos de un edificio relacionados al diseño y el tipo de usuarios; limitando de esta manera la logística mercantil encargada de los proyectos.

La difusión pública de datos relevantes al proyecto debe ser fomentada para evitar la incertidumbre en el mercado de los inmuebles energéticamente eficientes con la finalidad de aumentar la demanda de estas edificaciones por medio de la innovación de estrategias de evaluación comparativa que permitan entender de una manera más profunda los patrones de consumo de energía de los edificios.

En el presente trabajo de titulación se exhibe una metodología de diseño aplicada a la optimización del

consumo energético de los edificios de variadas alturas de la ciudad de Quito; para lo cual se propone un modelo de evaluación comparativa específico de mercado para medir el rendimiento energético relativo en edificios similares por medio de un índice multifactorial que examine las numerosas determinantes del consumo de energía en una edificación.

La metodología de evaluación se lo enfoca a problemas de multivariantes y por lo tanto el arquetipo recomendado en esta tesis es un modelo predictivo basado en la técnica OLS (Ordinary Least Squares) que servirá para normalizar las características de los edificios y proporcionar una base para un factor de rendimiento energético variante.

Objetivo General

Diseñar una ecuación paramétrica de variables ambientales, físicas y de ocupación de edificios, para optimizar el consumo energético en base a un modelo estadístico de evaluación y predicción “Ordinary Least Square (Mínimos Cuadrados Ordinarios).

Objetivos Específicos

- Recopilar las variables significativas de una población existente por medio del uso de

metodologías de diseño de edificios en altura y aplicarlas como marco de referencia.

- Examinar por medio de técnicas de validación las determinantes del consumo energético en edificios de variadas alturas de la ciudad de Quito.
- Construir el modelo predictivo en base a un factor de desempeño de rendimiento energético correspondiente a los usos del suelo múltiple y residencial (R2 y R3).
- Aplicar el modelo estadístico de evaluación y predicción Ordinary Least Square (Mínimos Cuadrados Ordinarios) en edificios existentes y analizar los resultados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1. Metodologías de Diseño para Determinar las Variables Ambientales y el Consumo Energético

1.1. Características Aerodinámicas y de Flujo que Afectan el Consumo Energético en los Edificios Altos

Una de las causas que ha provocado el rechazo de las configuraciones simétricas tradicionales, “es una alta demanda por edificios novedosos, poco convencionales que arquitectos e ingenieros estructurales han tenido que planificar” (Bandi, 2013), además, las secciones bastante complicadas “son básicamente buenas con respecto a las propiedades aerodinámicas para las excitaciones del viento cruzado” (Bandi, 2013), aspecto que es fundamental para enfrentar a los esfuerzos provocados por este flujo y comprender cuáles son sus efectos sobre la geometría de las edificaciones, asimismo, es el punto de partida para deducir los efectos termodinámicos que se gestan en base a la configuración de la forma.

Hoy en día existen nuevas metodologías para determinar las propiedades térmicas de los edificios y sus

correspondientes manifestaciones de energía, por ejemplo, las simulaciones llevadas a cabo en base a cálculos CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), son aplicadas a los edificios de variadas alturas para determinar el efecto de las variables medioambientales en el consumo de recursos.

A continuación, se exponen la teoría básica para comprender esta forma de análisis, que en con el paso de los años ha ganado fuerza en base a resultados bastante fiables reportados en varios casos de estudio como es el caso de la investigación titulada “Comparative Analysis of Infrared Thermography and CFD Modelling for Assessing the Thermal Performance of Buildings”, en el cual se reporta que el uso de mediciones en base a dinámica de fluidos (CFD) “brinda respuestas confiables con la diferencia en los cambios térmicos inferiores a 0,5 C con respecto a los datos tomados in situ” (Carlos Morón, 2018).

1.1.1. Propiedades Atmosféricas

Hay ciertas leyes físicas que describen el comportamiento del flujo de aire y define las fuerzas aerodinámicas y los momentos que actúan sobre una superficie (H.H. Hurt, 2002), estas fuerzas y momentos actúan en gran medida “por las propiedades de la masa de aire

en la que opera la superficie” (H.H. Hurt, 2002), la cual está compuesta “aproximadamente por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de vapor de agua, argón, dióxido de carbono, entre otros” (H.H. Hurt, 2002); además, por razones prácticas al aire se lo “considera una mezcla uniforme de estos gases” (H.H. Hurt, 2002) siendo “las cantidades habituales utilizadas para definir las propiedades de una masa de aire las siguientes” (H.H. Hurt, 2002).

1.- Presión Estática: “La presión estática del aire a cualquier altitud resulta de la masa de aire soportada por encima de ese nivel” (H.H. Hurt, 2002). De manera estándar se considera que la presión estática del aire a nivel del mar “es de 2,116 psf (o 14,7 psi, 29,92 in, etc.) y a 4000 pies de altitud, esta presión estática disminuye aproximadamente el 19% del vapor del nivel del mar” (H.H. Hurt, 2002).

2.- Temperatura: La temperatura del aire es un factor fundamental para entender las fuerzas aerodinámicas que interactúan en la superficie siendo “la temperatura estándar de 15 grados C del nivel del mar la temperatura absoluta de 288 K” (H.H. Hurt, 2002).

3.- Densidad: La densidad del aire se entiende como “la cantidad de masa de aire por pie cúbico y es una medida

directa de la cantidad de materia en cada pie cúbico de aire” (H.H. Hurt, 2002). Se entiende que en condiciones normales el aire a nivel del mar “pesa 0,0765¹² libras por pie cúbico” (H.H. Hurt, 2002) y posee una “densidad de 0,002378¹³ slugs por pie cúbico” (H.H. Hurt, 2002), y a 40000 pies de altura “la densidad del aire es aproximadamente el 25% del valor del nivel del mar” (H.H. Hurt, 2002).

La ley de gases define una relación entre la presión la densidad y la temperatura; y se afirma que, si no hay cambio de estado o transferencia de calor, la densidad varía directamente con la presión e inversamente con la temperatura (H.H. Hurt, 2002).

4.- Viscosidad: La viscosidad del aire es importante para entender los efectos de la fricción y se define como “la proporción entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad para un flujo de fluido” (H.H. Hurt, 2002). Cabe recalcar que la viscosidad de los gases es poco común ya que está en función de la temperatura y si “aumenta la temperatura aumenta la viscosidad” (H.H. Hurt, 2002).

¹² 12254124.48 (H.H. Hurt, 2002).

¹³ 1225570.83541 (H.H. Hurt, 2002).

Otra forma muy común de medir la viscosidad de un flujo es por medio de la “proporción del coeficiente de viscosidad y densidad absoluta” (H.H. Hurt, 2002), la cual se la denomina como viscosidad cinemática; la viscosidad cinemática del aire “en condiciones estándar del nivel del mar es de 0,0001576¹⁴ pies cuadrados por segundo” (H.H. Hurt, 2002); mientras que a una altitud de “40000 pies la viscosidad cinemática aumenta a 0,0005059¹⁵ pies cuadrados por segundo” (H.H. Hurt, 2002).

1.1.2. Principio de Bernoulli y Flujo de Aire

1.1.2.1. Flujo Incomprensible (Incompressible Flow)

“Todas las fuerzas aerodinámicas externas en una superficie son resultado de la presión del aire o la fricción del aire” (H.H. Hurt, 2002), cabe recalcar que los efectos generados por la fricción “se limitan a una capa delgada de aire en la vecindad inmediata de la superficie y las fuerzas de fricción no son las fuerzas aerodinámicas predominantes” (H.H. Hurt, 2002). Entonces, se puede afirmar que las fuerzas de presión creadas en una superficie aerodinámica se pueden

¹⁴ 146.41519104 (H.H. Hurt, 2002).

¹⁵ 469.99647936 (H.H. Hurt, 2002).

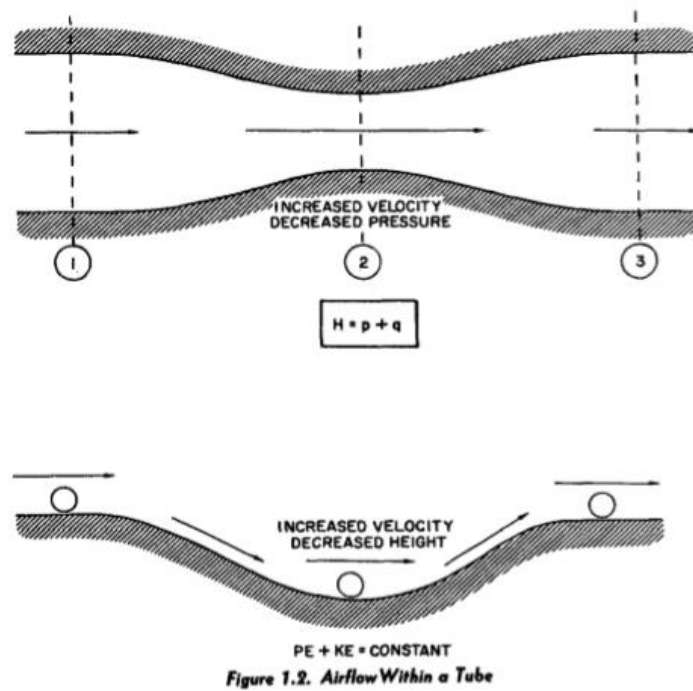
estudiar de forma simple que al principio descuida el efecto de la fricción y la viscosidad del flujo de aire (H.H. Hurt, 2002).

Las ecuaciones de Bernoulli describen las características del flujo de aire el cual “experimenta cambios de presión y la velocidad con cambios pequeños e insignificantes en la densidad” (H.H. Hurt, 2002), lo que se denomina comúnmente como flujo incomprensible. Si la densidad del flujo es constante, “la presión estática y la velocidad son las cantidades variables” (H.H. Hurt, 2002); además si las condiciones geométricas de la superficie con la cual interactúa el flujo cambian, la “velocidad debe aumentar para mantener el mismo flujo másico” (H.H. Hurt, 2002).

Podemos entender de mejor manera estos efectos si tomamos un tubo al vacío, donde el flujo de aire en el punto 1 del tubo “tiene cierta velocidad, presión estática y densidad” (H.H. Hurt, 2002), a medida que la corriente de aire se aproxima al punto 2, “se debe experimentar ciertos cambios, dado que el flujo de aire está encerrado dentro del tubo, la masa del flujo en cualquier punto debe ser la misma” (H.H.

Hurt, 2002); mientras que la presión y la velocidad son las que “deben cambiar para acomodar esta continuidad del flujo” (H.H. Hurt, 2002). El ejemplo del tubo al vacío y el flujo de aire se puede apreciar en el gráfico número 10.

Gráfico 10: Flujo Incomprensible



Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Flujo de Aire en Tubo al Vacío”

Además, gracias a estos experimentos se puede afirmar que a medida que aumenta la velocidad, la presión estática disminuirá y la disminución de la presión estática que acompaña al aumento de la velocidad se la puede verificar de dos maneras (H.H. Hurt, 2002):

1.- Se puede hacer uso de las leyes de movimiento propuestas por Newton, la cual sostiene que “el requisito de una fuerza desequilibrada para producir una aceleración (cambio de velocidad)” (H.H. Hurt, 2002). Si la corriente de aire “experimenta un aumento en la velocidad que se aproxima a la constricción, debe haber un desequilibrio de fuerza para proporcionar la aceleración” (H.H. Hurt, 2002). En pocas palabras para entender este postulado en el ejemplo del tubo al vacío, lo que se trata de decir es que “dado que solo hay aire adentro del tubo, la presión estática 1 es mayor que la presión estática en la constricción 2” (H.H. Hurt, 2002) y esta variación entre presiones es lo que ocasiona el cambio de velocidad.

2.- La energía total que posee la corriente de aire en el tubo al vacío “no cambia, sin embargo, la energía de la corriente de aire puede estar de dos formas” (H.H. Hurt, 2002), que puede ser energía potencial “ya que está relacionada con la presión estática y una energía cinemática (Kinetic) en virtud de la masa y movimiento” (H.H. Hurt, 2002). Como la energía total no cambia, “un aumento en la velocidad (energía cinética) estará acompañado por una disminución en la presión estática (energía potencial)” (H.H. Hurt, 2002).

Para comprender un poco más a fondo el punto dos se plantea el siguiente ejemplo:

Una pelota rodando a lo largo de una superficie lisa. A medida que la pelota rueda cuesta abajo, la energía potencial debido a la posición se cambia por energía cinética de movimiento. Si la fricción fuera insignificante, el cambio de energía potencial sería igual al cambio en K_i , energía neta. Este es también el caso del flujo de aire dentro del tubo (H.H. Hurt, 2002).

Partiendo al ejemplo presentado en gráfico número 10, la relación de presión estática y la velocidad se mantiene a lo largo del tubo. A medida que el flujo pasa a la constricción hacia el punto 3, la velocidad disminuye y la presión estática aumenta (H.H. Hurt, 2002).

En el gráfico número 11, se presenta las ecuaciones de Bernoulli las cuales sirven para determinar la energía cinética de un objeto, y como la corriente de aire “no tiene energía añadida o restada en ningún punto, la suma de la energía cinética y potencial debe ser constante” (H.H. Hurt, 2002).

Donde $K.E$ es igual a la energía cinética, M es la masa, V la velocidad y p la densidad del aire.

Gráfico 11: Escala de Bernoulli

$$K.E. = \frac{1}{2}MV^2$$

where K.E. = kinetic energy, ft.-lbs.
M = mass, slugs
V = velocity, ft./sec.

The kinetic energy of a cubic foot of air is:

$$\frac{K.E.}{ft.^3} = \frac{1}{2}\rho V^2$$

where $\frac{K.E.}{ft.^3}$ = kinetic energy per cu. ft., psf
 ρ = air density, slugs per cu. ft.
V = air velocity, ft./sec.

Fuente: (H.H. Hurt, 2002) "Ecuaciones de Bernoulli"

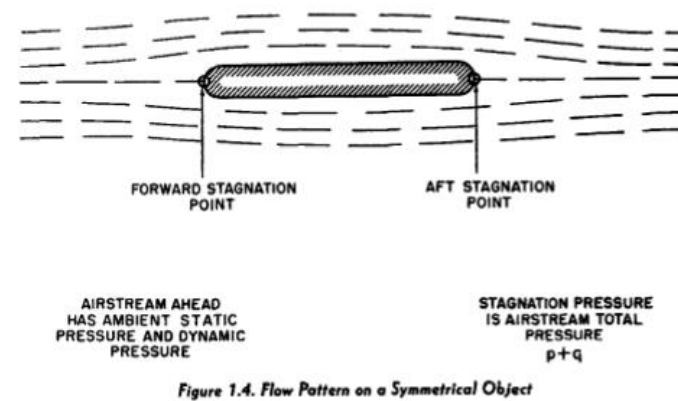
Cabe recalcar que la "presión dinámica de una corriente de aire libre es el único denominador común en todas las fuerzas y momentos aerodinámicos" (H.H. Hurt, 2002), la presión dinámica representa "la energía cinética de la corriente de aire y es un factor que representa la capacidad de producir cambios en la presión estática de la superficie" (H.H. Hurt, 2002). A la presión dinámica se la denomina como "q", esta variable varía directamente con "la densidad y el cuadrado de la velocidad" (H.H. Hurt, 2002).

1.1.2.2. Medición de la Velocidad del Aire

En el gráfico 12 se expone los efectos que se gestan "si se coloca un objeto de forma simétrica en una corriente de aire en movimiento" (H.H. Hurt, 2002). Se puede identificar en la imagen el "patrón de flujo típico de la figura" (H.H.

Hurt, 2002), además, se puede inferir que las corrientes de aire se estancarían al chocar con el objeto y "la velocidad del flujo relativa en este punto es cero" (H.H. Hurt, 2002).

Gráfico 12: Flujo de Aire en un Objeto



Fuente: (H.H. Hurt, 2002) "Patrón del Flujo de Aire en un Objeto Simétrico"

El flujo de aire adelante del objeto representado en el gráfico 12 también "supone cierta presión dinámica y presión estática" (H.H. Hurt, 2002), lo que trae como consecuencia que la "velocidad local cae a cero y la presión dinámica de la corriente de aire se convertirá en un aumento de presión estática en el punto de estancamiento" (H.H. Hurt, 2002). Por lo tanto, existirá una presión estática en el punto de estancamiento que es "igual a la presión total de la corriente de aire-presión estática ambiental más la dinámica" (H.H. Hurt, 2002).

El flujo de aire que interactúa alrededor de la superficie del objeto "se dividirá y la velocidad local aumentará de cero

en el punto de estancamiento a un máximo de los lados del objeto" (H.H. Hurt, 2002). Si no se toman en cuenta los momentos de fricción y viscosidad "el flujo de la superficie continúa hasta el punto de estancamiento donde la velocidad local es nuevamente cero" (H.H. Hurt, 2002). La medición de la presión dinámica "del flujo de aire libre es fundamental para la indicación de la velocidad del aire" (H.H. Hurt, 2002), además, la distribución de la presión causada por la variación del apilamiento local y las presiones dinámicas en una superficie es la fuente de las principales fuerzas y momentos aerodinámicos (H.H. Hurt, 2002).

1.1.2.3. Desarrollo de las Fuerzas Aerodinámicas

Una fuerza aerodinámica es "ejercida sobre un cuerpo por el aire en que se surge dicho elemento, y se debe al movimiento relativo entre la masa y el gas" (H.H. Hurt, 2002); las fuerzas aerodinámicas pueden suceder debido a dos factores que son la fuerza normal debido a la presión sobre una superficie del cuerpo y la fuerza de corte debido a la viscosidad del gas a la cual también se le conoce como fricción de la piel (H.H. Hurt, 2002).

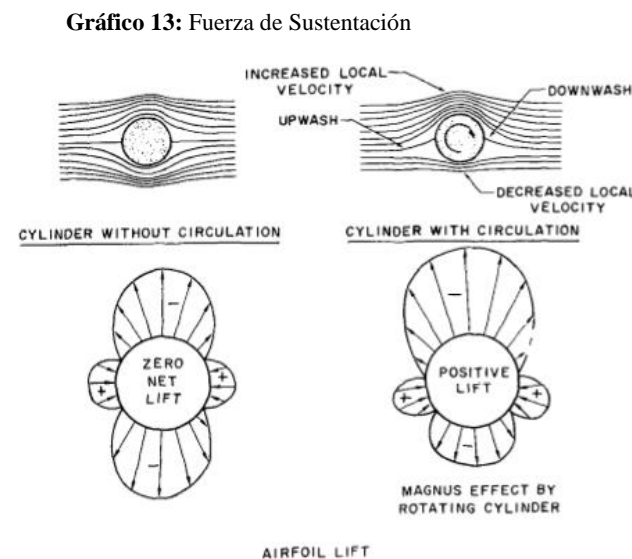
Se entiende que la “presión actúa normal a la superficie y la fuerza de corte actúa paralela a la superficie” (H.H. Hurt, 2002), ambas se ejercen localmente y la fuerza aerodinámica neta sobre el cuerpo es igual a la presión y las fuerzas de corte integradas sobre el área expuesta total del cuerpo (H.H. Hurt, 2002). Cuando a un perfil aerodinámico (airfoil¹⁶) se mueve con relación al aire “genera una fuerza aerodinámica en dirección opuesta, en un ángulo determinado por la dirección del movimiento relativo” (H.H. Hurt, 2002). Estas fuerzas aerodinámicas comúnmente se resuelven en dos componentes. “que se ejecutan a través del centro de presión del cuerpo” (H.H. Hurt, 2002), estas componentes son la resistencia y sustentación (drag y lift).

Drag: es la fuerza en la componente paralela a la dirección relativa del movimiento del gas.

Lift: es la fuerza en la componente perpendicular a la dirección relativa del movimiento.

1.1.2.4. Generación de la Fuerza Perpendicular o de Sustentación (Lift)

Un fenómeno importante que se asocia con la producción de fuerzas en el componente de sustentación (lift) en un perfil aerodinámico “es la circulación impuesta a la corriente de aire” (H.H. Hurt, 2002). En el gráfico 13 se puede identificar este fenómeno caracterizado “por las líneas de corrientes y las distribuciones de presión existentes en los cilindros de una corriente de aire” (H.H. Hurt, 2002).



Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Fuerza de Sustentación”

El gráfico se hace uso de un cilindro para explicar las fuerzas en la componente perpendicular, donde “el cilindro sin circulación tiene un patrón aerodinámico simétrico y una distribución de presión que crea una sustentación no neta” (H.H. Hurt, 2002). Si al cilindro se le somete a una “rotación en el sentido de las agujas del reloj e induce un flujo giratorio o circulatorio, se produce un cambio distinto en el patrón” (H.H. Hurt, 2002) de líneas de corriente y la distribución de la presión de igual manera se vería alterado.

Las velocidades que se gestan debido al vórtice de flujo circulatorio “causan un aumento de 104 velocidades en la superficie superior del cilindro y una disminución de la velocidad local en la superficie inferior del cilindro” (H.H. Hurt, 2002). Además la corriente circulatoria ocasiona “un flujo ascendente inmediatamente por delante y un flujo descendente inmediatamente por detrás del cilindro” (H.H. Hurt, 2002) y también se reducen los puntos de “estancamiento hacia adelante y hacia atrás” (H.H. Hurt, 2002).

¹⁶ Airfoil: Es la forma de inclinación media para determinar las características aerodinámicas de una sección de superficies (H.H. Hurt, 2002).

Al efecto de la “adición del flujo circulatorio se aprecia por el cambio en la distribución de presión en el cilindro” (H.H. Hurt, 2002). El aumento de la velocidad local en la superficie superior “provoca un aumento en la succión de la superficie superior” (H.H. Hurt, 2002) mientras que la velocidad local disminuida en la “superficie inferior provoca una disminución en la succión de la superficie inferior” (H.H. Hurt, 2002).

Entonces como se especifica en el texto titulado “Aerodynamics for Naval Aviators”:

Como resultado, el cilindro con circulación producirá una elevación neta. Esta circulación inducida mecánicamente, llamada efecto Magnus, ilustra la relación entre la circulación y levantamiento (H.H. Hurt, 2002).

La explicación de este principio es un método el cual sirve para señalar la relación entre la elevación y la circulación de un flujo. Cualquier perfil aerodinámico o elementos que interactúe con el viento “es capaz de producir elevación con una eficiencia relativamente alta” (H.H. Hurt, 2002), aspecto que se lo puede apreciar en el gráfico 14.

Gráfico 14: Generación de Fuerzas de Sustentación

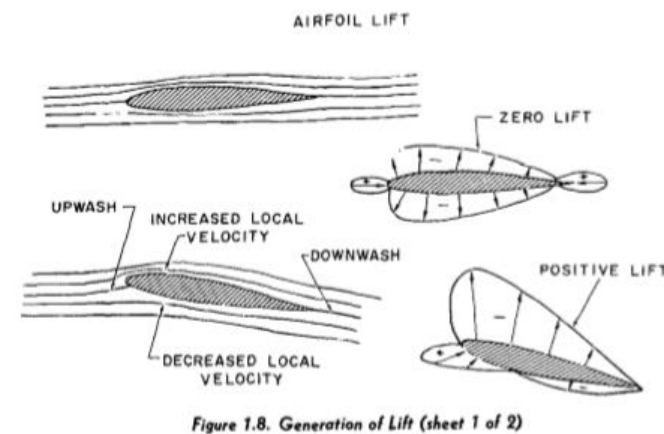


Figure 1.8. Generation of Lift (sheet 1 of 2)

Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Ángulo Positivo de Fuerza de Sustentación”.

Si se coloca un perfil simétrico contra la corriente de aire “el patrón de la línea de corriente y la distribución de presión dan evidencia de elevación cero” (H.H. Hurt, 2002), pero si se producen cambios en el “patrón aerodinámico y la distribución de la presión, son similares a los cambios causados por la adición de circulación al cilindro” (H.H. Hurt, 2002). El ángulo positivo como se describe en el gráfico 14 “ocasiona un aumento de la velocidad en la superficie superior con un aumento en la succión de la superficie superior” (H.H. Hurt, 2002), mientras que la velocidad “disminuye en la superficie inferior lo que provoca una disminución en la succión inferior de la superficie inferior” (H.H. Hurt, 2002).

1.1.2.5. Generación de la Fuerza Paralela o de Resistencia (Drag)

Denominada en inglés como drag o resistencia es la “fuerza aerodinámica neta paralela al viento relativo y su fuente es la distribución de presión y la fricción de la piel en la superficie” (H.H. Hurt, 2002), los cuerpos de un acantilado los cuales se caracterizan por ser grandes y gruesos “en una corriente de aire muestran un predominio del arrastre de forma debido a la distribución de la presión desequilibrada” (H.H. Hurt, 2002).

Pero los cuerpos aerodinámicos que presentan contornos suaves “muestran un predominio del arrastre debido a la fricción de la piel” (H.H. Hurt, 2002), de manera similar a otras fuerzas aerodinámicas, “las fuerzas de arrastre pueden considerarse en forma de un coeficiente que es independiente de la presión dinámica y el área de superficie”. (H.H. Hurt, 2002).

La ecuación que define a la resistencia de arrastre o drag expone en el gráfico 15; donde D es igual al arrastre, C_D es igual al coeficiente de arrastre, q corresponde a la presión dinámica y S corresponde al área de la superficie. La fuerza de resistencia al arrastre “se muestra como el producto de la

presión dinámica, el área de la superficie y el coeficiente de arrastre, C_d .” (H.H. Hurt, 2002). Para determinar el coeficiente de resistencia al arrastre en la expresión anterior “es similar a cualquier otro coeficiente de fuerza aerodinámica: es la relación entre la presión de resistencia y la presión dinámica” (H.H. Hurt, 2002).

Gráfico 15: Fuerza de Resistencia

where

$$D = C_d q S$$

D = drag, lbs.
 C_d = drag coefficient
 q = dynamic pressure, psf
 $= \frac{\sigma V^2}{295}$ (V in knots, TAS)
 S = wing surface area, sq. ft.

Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Ecuaciones que Definen la Fuerza de Arrastre”.

1.1.2.6. Los efectos de la Fricción sobre una Superficie

“Debido a la viscosidad del aire, este flujo encontrará resistencia para fluir sobre la superficie” (H.H. Hurt, 2002), la naturaleza viscosa del flujo de aire “reduce las velocidades locales en una superficie y explica el arrastre de la fricción en la piel” (H.H. Hurt, 2002). El retraso de las partículas de aire debido a la “viscosidad es mayor inmediatamente adyacente a la superficie” (H.H. Hurt, 2002).

En la superficie misma de un objeto, las partículas de aire se “reducen a una velocidad relativa cercana a cero y por encima de esta área, otras partículas experimentan un retraso sucesivamente más pequeño” (H.H. Hurt, 2002), hasta que en cierta distancia sobre la superficie de un objeto, la “velocidad local alcanza el valor total de la corriente de aire sobre la superficie” (H.H. Hurt, 2002). La capa de aire sobre la superficie que muestra el retardo local del flujo de aire debido “a la viscosidad se denomina capa límite” (H.H. Hurt, 2002).

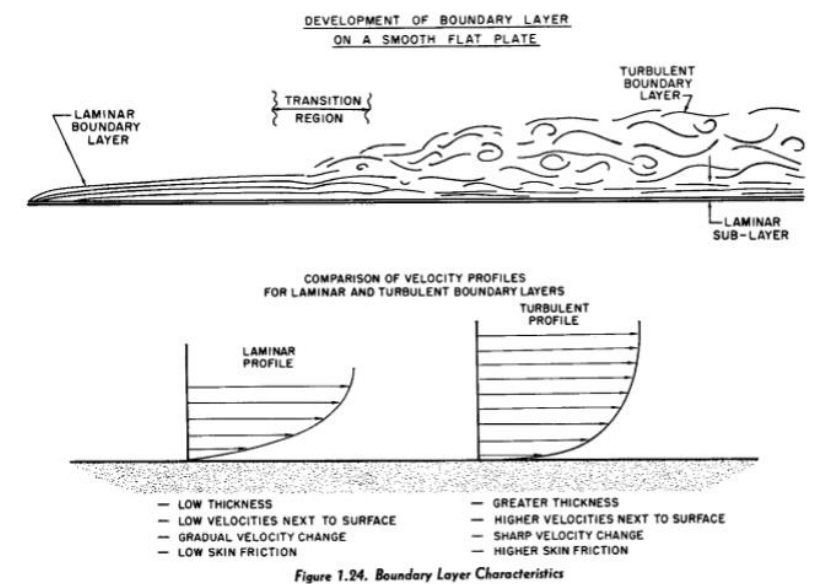
En el gráfico 16 se ilustra “las características de esta capa límite, con un flujo de aire sobre una placa plana lisa” (H.H. Hurt, 2002). Los flujos sobre la capa lisa dan evidencia de una “capa límite muy delgada que ocurre en laminaciones lisas” (H.H. Hurt, 2002), estas laminaciones se deslizan suavemente una sobre la otra y el término que se emplea para describir este efecto se lo conoce como “flujo laminar el cual existe son que las partículas de aire se muevan desde una elevación dada” (H.H. Hurt, 2002).

A medida que el flujo continúa desde el borde delantero, las fuerzas de fricción en la capa límite continúan disipando la energía de la corriente de aire y la capa límite

laminar aumenta de grosor con la distancia desde el borde delantero (H.H. Hurt, 2002).

Después de cierta distancia desde el borde a la capa límite laminar “comienza una perturbación oscilatoria que es inestable” (H.H. Hurt, 2002), las ondulaciones en la capa límite laminar que posteriormente se hace “más grande y más severa y destruye el flujo laminar suave” (H.H. Hurt, 2002).

Gráfico 16: Laminar y Turbulento



Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Características de Capa de Límite”

A la transición en la cual la capa límite laminar se desintegra “en una capa límite turbulenta, el mismo tipo de transición se puede notar en el humo de un cigarrillo” (H.H. Hurt, 2002), donde primero la cinta de humo es lisa laminar para pasar a desarrollar una ondulación definida que “se

desintegra en un patrón de humo turbulento al azar” (H.H. Hurt, 2002). Tan pronto sea la transición de laminar a turbulento, “la capa límite se engrosa y crece a un ritmo más rápido” (H.H. Hurt, 2002).

El flujo en la capa límite turbulenta permite “que las partículas de aire viajen de una capa a otra produciendo un intercambio de energía” (H.H. Hurt, 2002), sin embargo, sigue existiendo un “pequeño flujo laminar en los niveles más bajos de la capa límite turbulenta y se la conoce como la “subcapa laminar” (H.H. Hurt, 2002), dado que la capa límite turbulenta transfiere calor más fácilmente que la capa laminar, “las partículas de escarcha, agua y aceite se eliminarán más rápidamente del área de popa del punto de transición”(H.H. Hurt, 2002).

Además, se puede hacer un experimento que comprueba la existencia de estas dos capas, cual consiste en “conectar una pequeña sonda a un estetoscopio y colocarla en varios puntos a lo largo de una superficie” (H.H. Hurt, 2002), cuando la zona esté en la zona de flujo laminar “se escuchará un silbido; cuando la sonda está en el área turbulenta, se escuchará un crujido agudo” (H.H. Hurt, 2002).

Para comparar las características de las capas de límite (laminar y turbulenta); el perfil de la velocidad (variación de la velocidad de la capa límite con la altura sobre la superficie) “deben compararse en condiciones que pueda producir flujo laminar o turbulento” (H.H. Hurt, 2002). Los perfiles de velocidad típicos de las capas laminar y turbulenta que se exponen en el gráfico 16, corresponde a “un cambio inicial de la velocidad mucho más agudo” (H.H. Hurt, 2002) para el límite turbulento, aunque se requiere de mayor altura, a continuación, se representa la comparación entre ambos:

1.- La capa límite turbulenta posee un “perfil de velocidad más complejo y tiene velocidades locales más altas inmediatamente adyacentes a la superficie” (H.H. Hurt, 2002), además la energía cinética es “mayor en el flujo de aire al lado de la superficie” (H.H. Hurt, 2002).

2.- La capa límite laminar en la superficie posee un menor cambio de velocidad por encima de la superficie y como el esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad, el gradiente de velocidad más bajo de la capa límite laminar es evidencia de un arrastre de fricción (H.H. Hurt, 2002) más bajo en la superficie, entonces, se infiere que la relación entre la “fricción laminar de la piel sería

aproximadamente un tercio de la del flujo turbulento” (H.H. Hurt, 2002).

Cabe recalcar que el arrastre de bajo fricción de la capa límite del flujo laminar es deseable, pero la “transición tiende a tener lugar de manera natural y limita el desarrollo extensivo de la capa límite laminar” (H.H. Hurt, 2002).

1.1.2.7. Números de Reynolds

Para determinar las capas de límite laminar y turbulento se requiere contemplar los efectos “combinados de la velocidad, la viscosidad, la distancia, la densidad, entre otros” (H.H. Hurt, 2002). Entonces para entender el efecto de los factores que más importancia tienen en el desarrollo de las capas laminar y turbulento se hace una combinación “en un parámetro adimensional llamado “Números Reynolds, RN” (H.H. Hurt, 2002). Este número corresponde a “una relación adimensional que representa la magnitud relativa de las fuerzas dinámicas y viscosas en el flujo” (H.H. Hurt, 2002). En el gráfico número 17 se puede observar la expresión para obtener este valor.

Cabe recalcar que la “magnitud real del número de Reynolds no tiene importancia física, la cantidad se utiliza como índice para predecir y correlacionar varios fenómenos”

(H.H. Hurt, 2002) del flujo de fluido viscoso, entonces, cuando el RN es bajo se entiende que “predomina las fuerzas viscosas o de fricción; cuando el RN es alto predominan las fuerzas dinámicas de inercia” (H.H. Hurt, 2002). Es por esto que se recomienda que debe “entenderse el efecto de las variables en la ecuación para el número de Reynolds” (H.H. Hurt, 2002).

Gráfico 17: Número de Reynolds

$$RN = \frac{Vx}{\nu}$$

where

RN= Reynolds Number, dimensionless

V= velocity, ft. per sec.

x= distance from leading edge, ft.

ν = kinematic viscosity, sq. ft. per sec.

Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Expresión que sirve para determinar el número de Reynolds”.

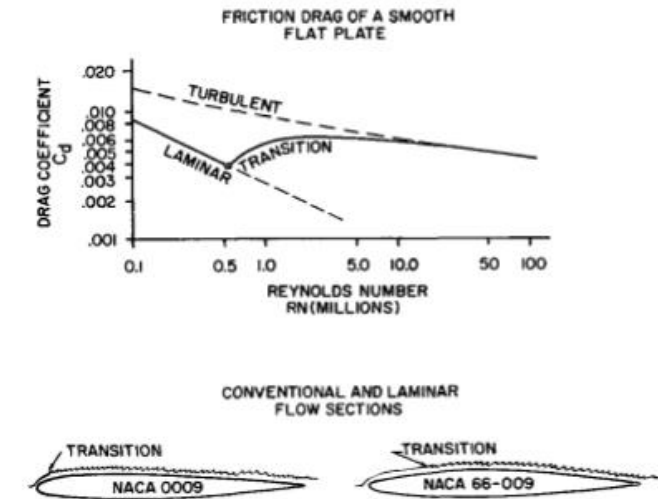
El RN “varía directamente con la velocidad y la distancia del borde e inversamente con la viscosidad cinemática” (H.H. Hurt, 2002); cuando se obtiene valores RN altos es porque el flujo intervino en “grandes superficies, altas velocidades y baja altitud” (H.H. Hurt, 2002); mientras que un RN bajo corresponde a “pequeñas superficies, velocidades

bajas y altitudes altas: altitudes altas que producen valores altos de viscosidad cinemática” (H.H. Hurt, 2002).

El uso más frecuente que se le da a este valor es para “indexar o correlacionar el arrastre de fricción de la piel de una superficie” (H.H. Hurt, 2002), en el gráfico número 18 se representa “la variación del arrastre de fricción de una placa lisa y plana con un número de Reynolds que se basa en la longitud o la cuerda de la placa” (H.H. Hurt, 2002); en el gráfico se puede observar las “líneas separadas del coeficiente de arrastre si el flujo debe ser completamente laminar o completamente turbulento” (H.H. Hurt, 2002).

Las dos curvas para el arrastre de fricción laminar y turbulento “ilustran la magnitud relativa del coeficiente de arrastre de fricción si pudiera existir cualquier tipo de capa límite” (H.H. Hurt, 2002). Finalmente, el coeficiente de arrastre que corresponde al flujo laminar y turbulento empieza a disminuir “con el aumento del RN ya que el gradiente de velocidad disminuye a medida que la capa límite se espesa” (H.H. Hurt, 2002).

Gráfico 18: Fricción en una Superficie



Fuente: (H.H. Hurt, 2002) “Fricción de Arrastre en una Superficie”

Además, si suponemos que la superficie es lisa y la corriente de aire que interactúa con el objeto no posee turbulencias, los números de Reynolds serán bajos y “existirá un flujo laminar puro” (H.H. Hurt, 2002), aspecto que es deseable y recomendado; pero una vez que inicia la “transición, el coeficiente de arrastre del área aumenta de la curva laminar a la curva turbulenta” (H.H. Hurt, 2002).

Entonces, una vez que el número RN se acerca a valores cada vez más altos “la curva de arrastre de la superficie se acerca, y casi iguala a los valores de la curva turbulenta” (H.H. Hurt, 2002), si bien es cierto que una superficie en la vida real no es en su totalidad plana y lisa, como en la superficie de sustentación típica de los ejemplos

mencionados, está es la “manera de ilustrar los fenómenos básicos de fricción de los fluidos” (H.H. Hurt, 2002).

La importancia de este tipo de análisis radica en su potencial para interpretar la interacción de las variables medioambientales en base a las connotaciones geométricas y a las turbulencias inducidas por la corriente de aire en un contexto dado.

Existen ciertas condiciones que se establecen para calcular los efectos del flujo de aire en los edificios, y que procesos termodinámicos se gestan en base a estas reglas; las cuales se exponen de acuerdo a las especificaciones que se usaron en el artículo titulado “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations”.

Estudio que sirvió como marco de referencia para gestar las simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), en los edificios con un área igual o mayor a 4000 m² de la ciudad de Quito: para posteriormente interpretar estos resultados que son determinantes en el consumo energético de las torres en base al factor de transferencia de calor que se produce en las fachadas.

1.2. Configuración Geométrica de los Edificios de Variadas Alturas

La información de los edificios testeados en el artículo titulado “Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations”, servirán como marco de referencia para interpretar las simulaciones realizadas en los edificios evaluados en la ciudad de Quito, en base a las especificaciones técnicas determinadas en mencionado estudio, salvo algunas modificaciones gestadas en base al contexto construido de la ciudad y obedeciendo a optimizar el factor de consumo energético, donde las especificaciones que se usaron en el documento de referencia fueron las siguientes:

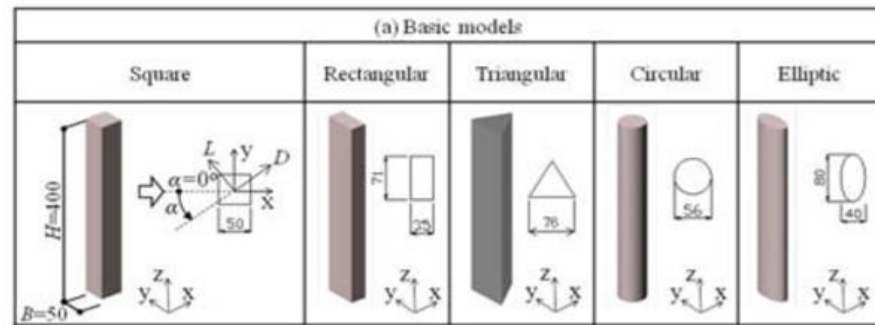
Una altura a gran escala y un volumen total de cada modelo de construcción se establece comúnmente en $H = 400\text{m}$ (80 pisos) y alrededor de $1.000.000\text{ m}^3$. El ancho B del modelo cuadrado que se muestra en la tabla 1(a) es de 50 m y su ratio corresponde a H/B que es 8. La escala geométrica de los modelos de túnel de viento se establece en $1/1000$. Los modelos de edificios altos examinados en este estudio se clasifican en 7 categorías de la siguiente manera (Bandi, 2013).

1.2.1. Modelos Básicos

Son considerados como modelos o formas básicas aquellas configuraciones “cuadradas, rectangulares, circulares y elípticas” (Bandi, 2013). Los ratios correspondientes para la “forma rectangular y elíptica es de 1:2” (Bandi, 2013), mientras que el número de Reynolds R_e y su efecto en las formas circulares y elípticas “debe discutirse al considerar la correspondencia con la estructura de escala” (Bandi, 2013).

La estimación del número R_e tiene ciertas limitaciones cuando evaluamos grandes escalas razón por la cual, el autor del artículo Eswara Kumar Bandi propone lo siguiente: en general, es bastante difícil simular R_e grande que es similar a la escala completa, por lo que, en el presente trabajo, R_e solo se menciona como referencia para los modelos de superficie lisa (Bandi, 2013). Entonces el valor R_e no se ve afectado si a los modelos se los aplica los correspondientes factores de escala y poder simularlos de una manera experimental. En el gráfico 19 se pueden observar algunas configuraciones consideradas como básicas.

Gráfico 19: Modelos Básicos



Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Básicos Testeados”

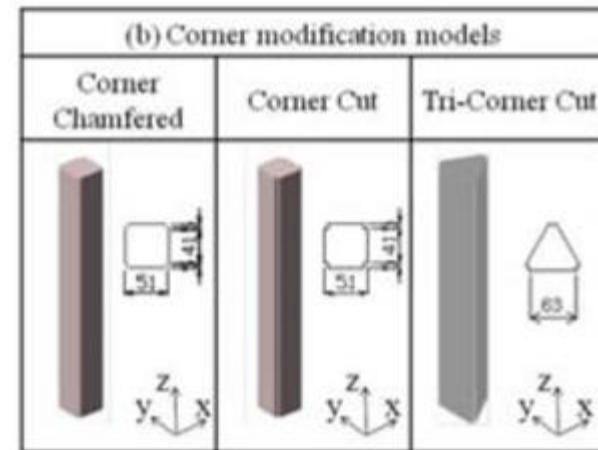
1.2.2. Modelos con Esquinas

Existen una gran variedad de métodos para alterar las esquinas de una figura geométrica, que pueden llevar a diferentes resultados de apariencia; en el estudio, solo se examinó a las construcciones que presentaban alteraciones en sus esquinas tales como: “cortes de esquina, biselado de esquinas, y un modelo de corte de tres esquinas” (Bandi, 2013) que da como resultado un perfil triangular.

A manera de recomendación y gracias anteriores investigaciones sobre las características aerodinámicas de estructuras y edificios con biselado de esquina y modelos de corte de esquina, la longitud de modificación se establece en $0.1B$, donde B es el ancho del edificio (Bandi, 2013). Los

edificios con modificaciones en las esquinas se presentan en el gráfico 20.

Gráfico 20: Modelos Esquinas Modificadas



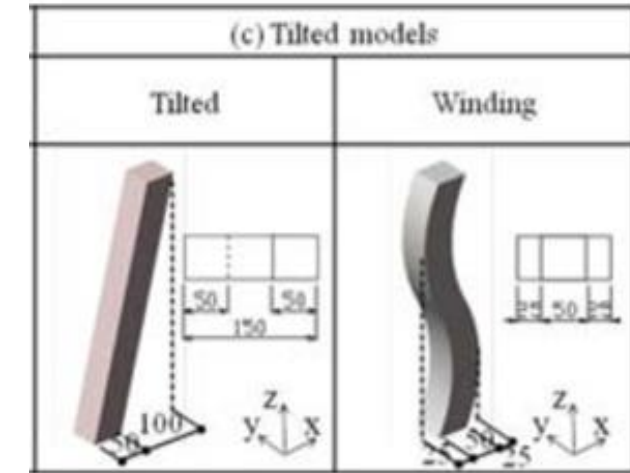
Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Esquinas Modificadas Testeados”

1.2.3. Modelos inclinados

Los modelos inclinados son aquellos que presentan un desplazamiento entre la posición inferior de la base y el techo, donde se recomienda que “la cubierta se desplace de la base del piso en una relación de $2B$ ” (Bandi, 2013) (dos veces el ancho); mientras que el modelo “Winding Model”¹⁷, los pisos se desplazan en una relación “de $0,5B$ hacia el lado izquierdo y derecho, respectivamente desde el piso medio y las paredes tienen superficies suavemente curvados” (Bandi, 2013).

Algunos ejemplos de edificios inclinados pueden contemplarse en el gráfico 21.

Gráfico 21: Modelos Inclinados



Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Inclinados Testeados”

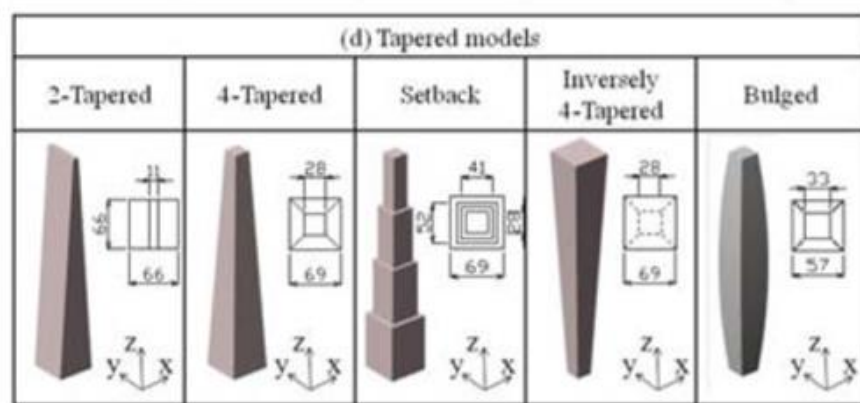
1.2.4. Modelos cónicos

El autor Eswara Kumar Bandi define como modelos cónicos a las estructuras que disminuyen su grosor con respecto al otro extremo, además se los clasifica en 5 grupos que son: un primer modelo el cual reduce su grosor en dos lados, un segundo modelo que cambia su grosor en cuatro lados, un tercer perfil que reduce su grosor de manera gradual y escalonada, una cuarta forma similar al segundo pero invertido y finalmente un quinto modelo abombado “cuya área de sección a media altura se expande” (Bandi, 2013)

¹⁷ Winding Model: Forma geométrica que se traduce como sinuoso. (Bandi, 2013)

estos modelos pueden ser observados en el gráfico 22. La correspondencia entre proporciones para los modelos mencionados con anterioridad corresponde a una “relación que está entre el 5% y 10% pero si esta es mayor el comportamiento aerodinámico mejora” (Bandi, 2013).

Gráfico 22: Modelos Cónicos



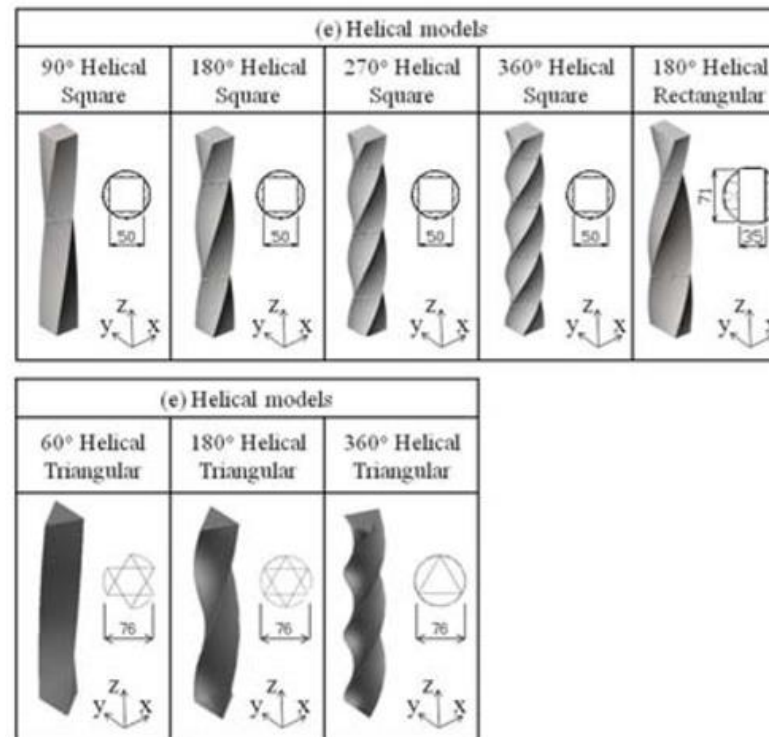
Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos Cónicos Testeados”

Es decir, que para el segundo modelo la proporción “de conicidad se estableció en 10% y la relación del área del plano de la cubierta al piso inferior se ajustó en 1/6” (Bandi, 2013). Para el primer modelo, cuarto modelo y tercer modelo también se adecuaron las mismas proporciones. Mientras que para el sexto modelo correspondiente al “abultado, la proporción del área del plano de los pisos intermedios con respecto al piso inferior posee una relación de 1/3” (Bandi, 2013).

1.2.5. Modelos Helicoidales

La forma base de la cual parten los modelos helicoidales “son cuadrados, rectángulos y triángulos; mientras que el ángulo de giro entre la base del piso y el plano de cubierta se establece en 60, 90, 180, 270 y 360 grados” (Bandi, 2013). Para evitar confusiones cabe recalcar que “las formas base junto con el ángulo de giro se utilizan como prefijo del nombre del modelo” (Bandi, 2013). Entonces, si nos referimos a la estructura cuadrada helicoidal de 180 grados, hacemos referencia al segundo edificio del gráfico 23.

Gráfico 23: Modelos Helicoidales

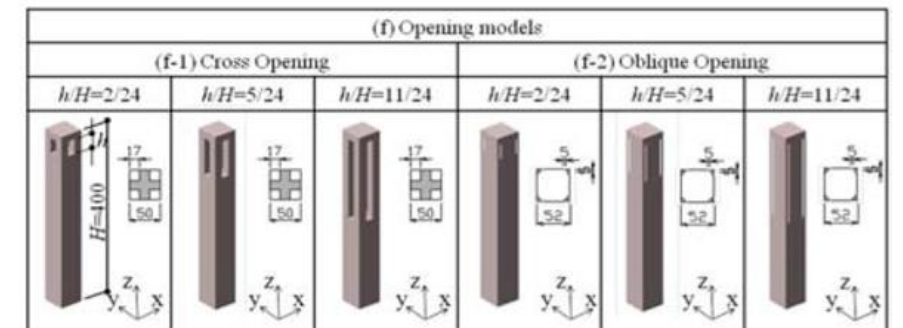


Fuente: (Bandi, 2013) “ Modelos Helicoidales Testeados”

1.2.6. Modelos con Aberturas

En el gráfico 24 se incluyen los edificios con aberturas que se contemplaron en el estudio de referencia para este trabajo de titulación; a estos perfiles se los puede clasificar en dos grupos que son: “tres modelos con abertura transversal y tres modelos con abertura oblicua” (Bandi, 2013), las aberturas se distribuyen en el centro superior y en las esquinas superiores separadas una de las otras. En el estudio planteado por el autor Eswara Kumar Bandi, “se considera tres aberturas diferentes $h=2H / 24$, $h=5H/24$ y $h=11H/24$. En cuanto al volumen de estos edificios se tomó en cuenta” (Bandi, 2013) las siguientes consideraciones:

Gráfico 24: Modelos con Aperturas



Fuente: (Bandi, 2013) “Modelos con Aperturas Testeados”

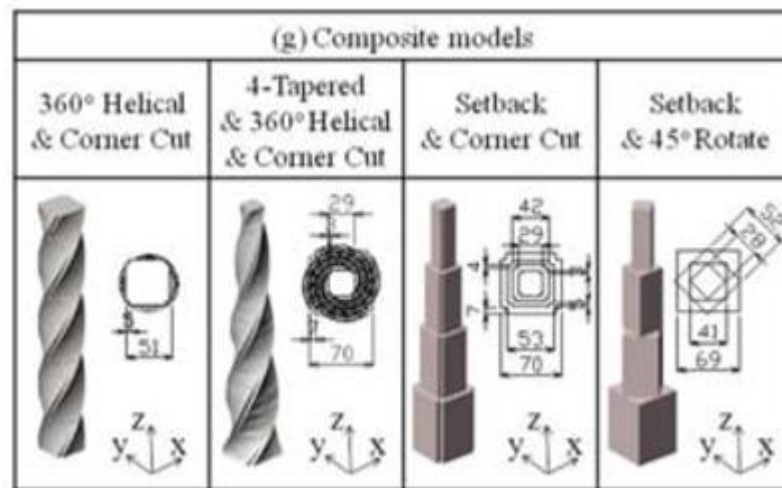
Para los tres modelos de abertura oblicua, el volumen de apertura no está incluido en el volumen de construcción, y dado que los volúmenes de esas construcciones son casi iguales, sus anchos son fijos. Sin embargo, para los tres

modelos de apertura cruzada, el volumen de apertura se incluye en el volumen del edificio, debido a la compatibilidad de la relación con respecto con los modelos (Bandi, 2013).

1.2.7. Modelos Compuestos

Los modelos compuestos poseen configuraciones combinadas de las anteriores categorías, en el artículo del autor Eswara Kumar Bandi se delimita el estudio solamente a 4 modelos compuestos que se pueden observar en el gráfico 25.

Gráfico 25: Modelos Compuestos



Fuente: (Bandi, 2013)“Modelos Compuestos Testeados”

El primer modelo corresponde a un edificio helicoidal de 360 grados cuyas esquinas fueron cortadas, el segundo modelo corresponde a un edificio cónico que varía sus dimensiones desde el plano del piso hasta el plano de la cubierta en sus cuatro lados, el giro es sobre su base en 360

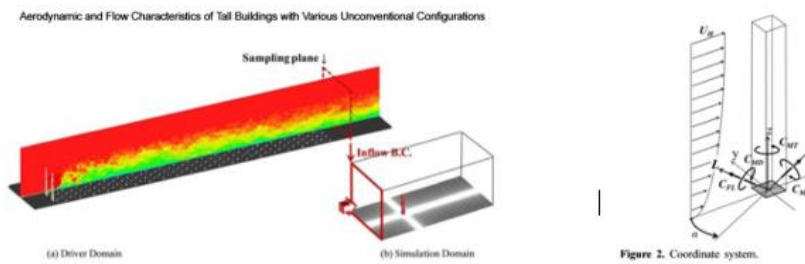
grados y sus esquinas fueron cortadas; un tercer modelo de retroceso y cuyas esquinas fueron cortadas y finalmente un cuarto modelo de retroceso con un ángulo de giro de 45 grados.

1.3. Medición de Fuerzas Aerodinámicas

1.3.1. Ajuste de las Variables de Entrada para Realizar las Simulaciones

En la investigación en la investigación llevada a cabo por Eswara Kumar Bandi, se menciona que “los experimentos se realizaron en un túnel de viento de circuito cerrado cuya sección de trabajo tiene 1.8m de alto por 2.0m de ancho” (Bandi, 2013) en el gráfico 26 se observa las “condiciones de flujo turbulento” (Bandi, 2013) a la cual ha sometido a los diferentes modelos especificados con anterioridad, para realizar las respectivas simulaciones se requiere especificar las siguientes condiciones de entrada:

Gráfico 26: Túnel de Viento



Fuente: (Bandi, 2013) “Túnel de Viento, Sistema de Coordenadas y Dominios”

a.- Ajustar la velocidad del viento y la intensidad de turbulencia en la parte superior de nuestro modelo” (Bandi, 2013), que en el artículo titulado “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations” se lo ajustó “aproximadamente en $U_H = 7.0$ m/s u $L_{un} = 92\%$, respectivamente (Bandi, 2013).

b.- La escala turbulenta que interactúa cerca de la parte superior del modelo también debe ser establecida, en la investigación que ha servido de referencia para la realización de este trabajo se la ajustó en 365m.

c.- Las fuerzas dinámicas del viento deben ser contempladas en base a la variación del ángulo de dirección “el cual cambia de 0 grados, que es normal en la superficie de una pared; a 45 o 180 grados o cada 5 dependiendo la configuración del edificio” (Bandi, 2013), es decir cuando se detecta un cambio en el ángulo de la dirección del viento es probable que se han gestado una serie de fuerzas en esa superficie.

d.- El factor “ q_H es la presión la presión de la velocidad a la altura H, y B se establece comúnmente en el ancho del modelo” (Bandi, 2013), estos valores servirán para

normalizar las fuerzas del viento y obtener los “momentos aerodinámicos medidos para obtener los coeficientes de fuerza del viento” (Bandi, 2013); en el capítulo III de este trabajo de titulación al factor qH se lo define solamente como P, el cual servirá para identificar en qué medida existe un cambio de temperatura en base a la interacción del fluido del aire sobre la geometría de los edificios testeados, y no es alcance de esta tesis determinar las fuerzas producidas por las cargas del viento.

1.3.2. Medidas de Presión del Viento

Determinar la magnitud de la presión tiene como finalidad “examinar en detalle las características de las fuerzas locales del viento y los fenómenos aerodinámicos” (Bandi, 2013) que se gestan en base a la interacción de otros factores; como ya se ha mencionado con anterioridad, este trabajo solamente se enfocará en los fenómenos aerodinámicos que se describen usando como marco de referencia el trabajo de investigación titulado “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations” (Bandi, 2013), además la elaboración de este marco teórico puede servir de material de consulta para futuras investigaciones que tengan como

objetivo dar respuesta a los esfuerzos del viento en base al empleo de presiones.

Para la toma de muestras correspondientes a la medición de la presión, se recomienda el uso de alrededor de “20 puntos de medición en un nivel de 4 superficies” (Bandi, 2013), es decir las 4 caras correspondientes a los modelos. Además, “los coeficientes de la presión del viento se normalizan en base a las fluctuaciones producidas por acción de la velocidad de la misma presión” (Bandi, 2013). Cabe recalcar que si se desea encontrar los valores correspondientes a la fuerza del viento y momentos torsionales se debe encontrar “la integral de los coeficientes de presión del viento” (Bandi, 2013).

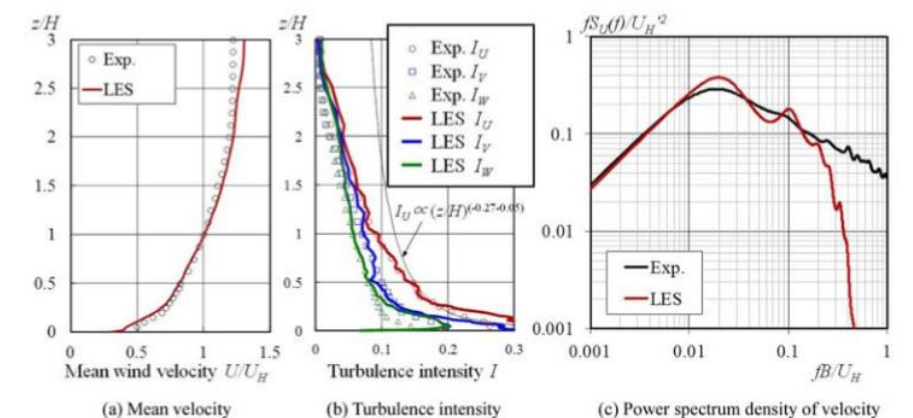
1.4. Esquema de las Simulaciones Numéricas

1.4.1. Simulaciones Large-eddy

Las simulaciones se hacen en base al modelo numérico LES (Large-Eddy Simulation); el cual requiere de los parámetros especificados en el tema “Ajuste de las Variables de Entrada para Realizar las Simulaciones”; estas variables se las aplica a un modelo 3D de las torres o edificios que requieran ser testeados y se ajusta un procedimiento de cálculo conocido como K-Omega; esta técnica ejecuta

cálculos de predicción de turbulencia mediante dos ecuaciones diferentes para las variables $k - \omega$, donde k es la energía cinética producida por el fluido y ω es la disipación de esa energía cinética en energía térmica interna (Omega). En el gráfico 27 se puede observar los resultados que comúnmente se obtiene una vez gestado los respectivos procesos.

Gráfico 27: Resultados de las Simulaciones



Fuente: (Bandi, 2013) “Resultados de las Simulación”

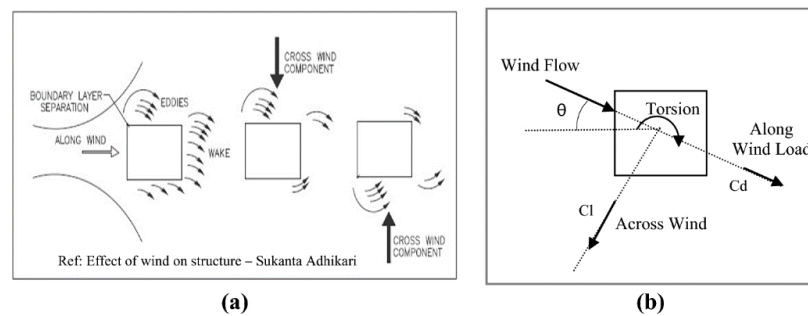
1.5. Mediciones de las Fuerzas de Viento

1.5.1. Definición de Algunas Variables y su Nomenclatura (Coeficientes de Momento de Vuelco).

A la variación del flujo de viento que choca contra la superficie de un edificio se lo denomina como C_{MD} mientras que los vórtices que se forman una vez que el flujo de viento

se ha desviado debido a la interacción con la geometría del modelo se lo denota como C_{ML} , en el gráfico 28 se identifica los esquemas en los cuales se ejemplifica estos dos momentos siendo el C_{MD} el mean-long-wind y el C_{ML} el mean-across-wind.

Gráfico 28: Long - Wind Cross - Wind



Fuente: (Sabareesh, 2018) “Esquemas del Long-Wind y Cross Wind”

El valor máximo de los valores C_{ML} y C_{MD} considera todas las direcciones del viento y estas se definen como mximun-along-wind y across-wind mean y son abreviaos como: $IC_{MLI_{max}}$ y $IC_{MDI_{max}}$ (Bandi, 2013), cabe recalcar que en algunas bibliografías a los coeficientes de las variaciones C_{ML} y C_{MD} se los nombra también como along-wind y across-wind fluctuating (Bandi, 2013); estos coeficientes corresponde a los valores de las desviaciones

estándar del C_{ML} y C_{MD} (Bandi, 2013), a las cuales se las denomina como C_{ML}' y C_{MD}' .

1.5.2. Definición de los Coeficientes Medios de Momento y de Vuelco en Base a Simulaciones

La variación de los valores de los valores $IC_{MLI_{max}}$ y $IC_{MDI_{max}}$; y de los coeficientes C_{ML}' y C_{MD}' pueden observarse en el gráfico número 29 y 30, donde se llegó a las siguientes conclusiones una vez llevado a cabo las correspondientes evaluaciones descritas en el artículo “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations”

En el gráfico 29 se describen los resultados para la variación del maximun-long-wind $IC_{MLI_{max}}$ y del cross wind mean $IC_{MDI_{max}}$. Los modelos cónicos y en mayor medida el volumen setback¹⁸ cuyas áreas seccionales decrecen conforme va aumentado la altura, poseen un “valor $IC_{MLI_{max}}$ relativamente pequeño” (Bandi, 2013); mientras que los valores $IC_{MDI_{max}}$ para las volumetrías “de esquinas cortadas y

con chaflán son pequeños” (Bandi, 2013). El coeficiente D_{ML}' para el modelo cuadrado helicoidal y el volumen de apertura transversal $h/H = 11/24$, cuyo tamaño de apertura es el más grande, posee un coeficiente “ C_{ML}' pequeño (Bandi, 2013).

Gráfico 29: Características Aerodinámicas

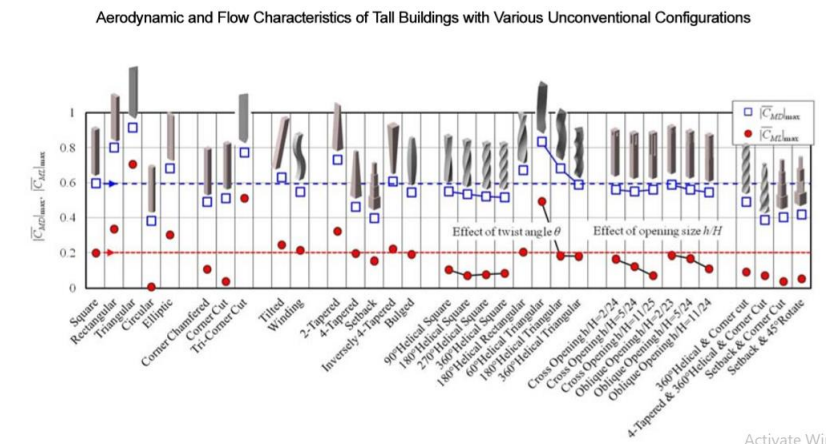


Figure 7. Comparison of maximum mean overturning moment coefficients.

Fuente: (Bandi, 2013) “Comparación de Momento Máximo de los Coeficientes de Vuelco”

El modelo helicoidal cuadrado / triangular con un ángulo de giro mayor “tiende a mostrar valores más pequeños (Bandi, 2013) correspondientes a la desviación estándar de los valores $IC_{MLI_{max}}$ y $IC_{MDI_{max}}$, además la variación de los coeficientes C_{ML}' y C_{MD}' del modelo de 180 grados de base cuadrada y helicoidal tienen a “mostrar una

¹⁸ Setback: Volumetría de la familia de los modelos cónicos cuya geometría se reduce igual que su grosor de manera gradual y escalonada al se más alta (Bandi, 2013).

variación en la velocidad del viento muy pequeña” (Bandi, 2013).

Los modelos que poseen una sección rectangular tales como: (el volumen rectangular helicoidal de 180 grados y las formas en general en base rectangular) y las geometrías de sección triangular tales como: (volúmenes de esquina cortada de sección triangular, volumen de sección triangular y el modelo helicoidal de base triangular); estos dos grupos “presentan coeficientes C_{ML} ’ y C_{MD} ’ más grandes que los edificios de sección cuadrada.” (Bandi, 2013).

Mientras que las características aerodinámicas de los modelos compuestos que son aquellos que presentan múltiples modificaciones “poseen un coeficiente C_{ML} ’ y C_{MD} ’ muy superiores que aquellos que presentan una sola modificación” (Bandi, 2013).

1.5.3. Coefficientes de Momento de Vuelco Fluctuantes

En el gráfico 30, se especifican las desviaciones estándar de los valores maximun-long-wind y del across-wind-mean denotados como $C_{ML\ max}$ ’ y $C_{MD\ max}$ ’, donde el $C_{MD\ max}$ ’ de los modelos de esquinas alteradas como es el caso del volumen de esquinas con chaflán, esquinas cortadas; y los

modelos cónicos tales como el volumen 4-Tapered, el setback, el helicoidal de base cuadrada y el modelo que presenta una abertura cuya relación es de 11/24 “muestran valores muy pequeños” (Bandi, 2013).

Gráfico 30: Características Aerodinámicas Fluctuantes

Figure 7. Comparison of maximum mean overturning moment coefficients.

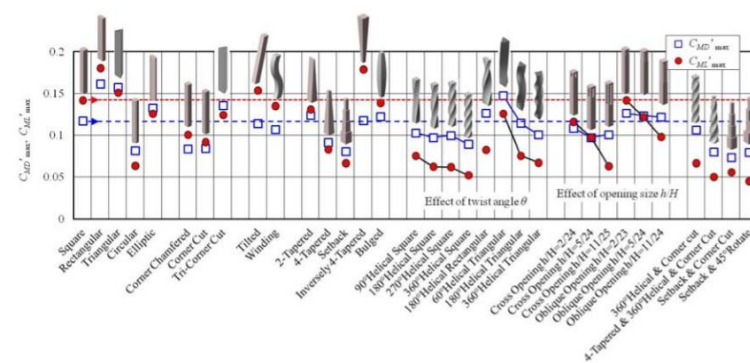


Figure 8. Comparison of maximum fluctuating overturning moment coefficients.

Fuente: (Bandi, 2013) “Comparación los Coeficientes de Momento Fluctuante de Vuelco”

Además, cabe recalcar que esta tendencia se aplica de la misma manera para todos los modelos de helicoidales de base cuadrada y triangular y para los edificios con aberturas; estos comportamientos se deben al “efecto provocado por el ángulo de giro” (Bandi, 2013).

1.6. Análisis de Respuesta Inducidas por el Viento

1.6.1. Análisis de Presión

En el estudio realizado por Eswara Kumar Bandi se especifica que la presión del viento fue evaluada en “12 modelos, incluyendo 8 con modificaciones simples y 4

volúmenes con modificaciones compuestas” (Bandi, 2013), aspecto que se trató con anterioridad en el punto titulado “Configuración Geométrica de los Edificios de Variadas Alturas”. Las geometrías con una sola modificación simple que se tomaron en cuenta fueron los siguientes: modelo cuadrado, modificación de esquina tipo chaflán, modificación de esquina, sección cónica, setback, dos modelos helicoidales de 90 y 180 grados y un modelo con abertura correspondiente a $(h/H = 5/24)$ (Bandi, 2013); mientras que los modelos compuestos que fueron contemplados son: un volumen helicoidal de 180 grados y con sus esquinas seccionadas, una geometría helicoidal con una sección cónica y dos geometrías helicoidales con sección cónica de (180 y 360 grados) pero con sus esquinas seccionadas (Bandi, 2013); cabe recalcar que las secciones cónicas que se usaron para medir la interacción de la presión corresponden a una sección en la cual sus cuatro lados cambian de dimensión conforme avanza la altura del volumen.

Los análisis de respuestas para estas 12 geometrías se las desarrolló de la siguiente manera:

1.- Modelar el marco de un edificio, por ejemplo, un modelo cuadrado de un edificio de 80 pisos cuya densidad de construcción es de 170 a 190 kg/m². La densidad del edificio que fue contemplada en las simulaciones realizadas en los edificios de variadas alturas testados en la ciudad de Quito, fue en base a los parámetros de entrada del software (FreeCAD) y en las compacidades calculadas a partir de los vectores de los archivos shapes de la ciudad de Quito.

2.- Modelar las diferentes geometrías y rellenar los campos requeridos en base a los parámetros de entrada especificados en el punto “Ajuste de Variables de Entrada para Realizar las Simulaciones”.

1.6.2. Evaluación de las Cargas de Viento

Las simulaciones que se llevan a cabo deben contemplar el “análisis de respuesta para la velocidad del viento de diseño en la parte superior del edificio, que oscila entre 30m/s a 71m/s; en intervalos de 1m/s” (Bandi, 2013). La velocidad del viento varía en base a la altura del edificio y al contexto construido, pero también se puede hacer “uso del rango de velocidades del viento que se registra en la ciudad” (Bandi, 2013).

Los valores que se exponen en el gráfico 31 corresponden a “los valores más grandes para todas las direcciones del viento dentro de los rangos de velocidad de viento de diseño” (Bandi, 2013); teóricamente y experimentalmente se conoce que la aceleración del viento en “los modelos con modificaciones de esquina y los modelos helicoidales reducen considerablemente en comparación con los modelos cuadrados” (Bandi, 2013). En el gráfico 31 también se grafican los valores de los esfuerzos correspondientes a corte, desplazamiento y torsión.

Gráfico 31: Respuesta del Viento

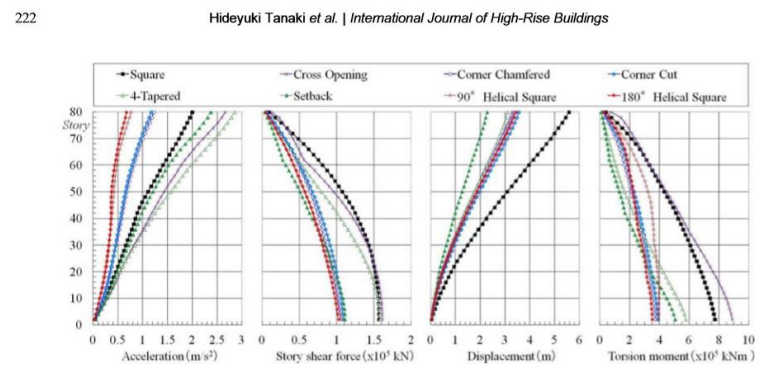


Figure 13. Vertical profile of wind-induced responses with single modification for 500-year return period design wind speed. Fuente: (Bandi, 2013) “Respuestas a las Cargas del Viento en Edificios de una sola Modificación.”

Además, los esfuerzos de cortante en los modelos con modificaciones de esquina, setback; y los modelos helicoidales también se reducen si los comparamos con los modelos cuadrados (Bandi, 2013); en el caso de los desplazamientos todos “los modelos muestran valores más

pequeños que los del modelo cuadrado” (Bandi, 2013). En el caso de los esfuerzos de torsión, el efecto del ángulo de torsión se ve claramente, es decir el momento de torsión más grande en la altura superior se vuelve más pequeño cuando se cambia el ángulo de perfil de 90 a 180 grados (Bandi, 2013).

En el gráfico 32 se describen los siguientes esfuerzos: aceleración máxima, el coeficiente de cizallamiento máximo del piso, el desplazamiento máximo, el ángulo máximo de deformación del piso, la fuerza máxima de corte del piso, el momento máximo de vuelco y el momento de torsión, donde los modelos de modificación única que muestran respuestas más pequeñas para todos los elementos son el perfil de esquina cortada, esquinas con chaflán, los volúmenes helicoidales de 90 y 180 grados (Bandi, 2013).

Gráfico 32: Diseño Velocidad del Viento

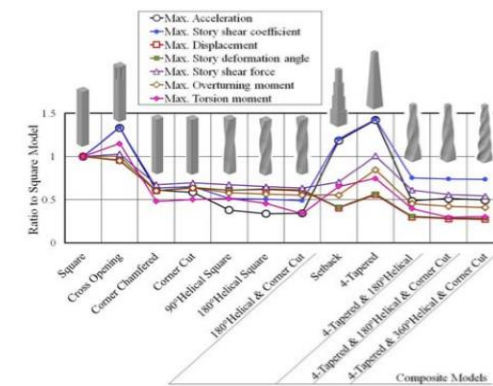


Figure 14. Comparison of wind-induced responses for 500-year return period design wind speed.

Fuente: (Bandi, 2013) “Comparación de las Respuestas a la Carga del viento”

Para el caso de las geometrías cónicas que cambian su dimensión en todos sus lados, la figura de retroceso y las que poseen aperturas transversales, “la aceleración máxima y el coeficiente de cizallamiento máximo son mayores” (Bandi, 2013) si los comparamos con los modelos cuadrados. Todos los modelos compuestos “muestran valores más pequeños para todos” (Bandi, 2013) los esfuerzos especificados en el gráfico 32.

1.7. Discusiones de las Características del Flujo de

Viento Alrededor de los Edificios

1.7.1. Visualización del Desprendimiento de Vórtices Alrededor de los Edificios

En el gráfico 33 se expone la “distribución horizontal de los coeficientes de presión” (Bandi, 2013), en el artículo “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations”, solamente se discute 4 modelos de una sola modificación que corresponde al “modelo cuadrado, modelo de corte de esquina, el modelo de retroceso y al modelo helicoidal de 180 grados” (Bandi, 2013).

Para el perfil cuadrado “se forman grandes regiones de presión negativa como resultado del desprendimiento

periódico de los vórtices” (Bandi, 2013), este efecto se desarrolla en gran medida “en la parte superior del edificio” (Bandi, 2013); aspecto que se puede apreciar en el gráfico 33.

Gráfico 33: Estructuras de Vórtices

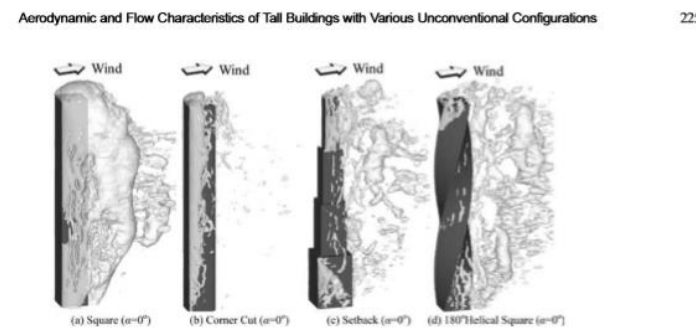
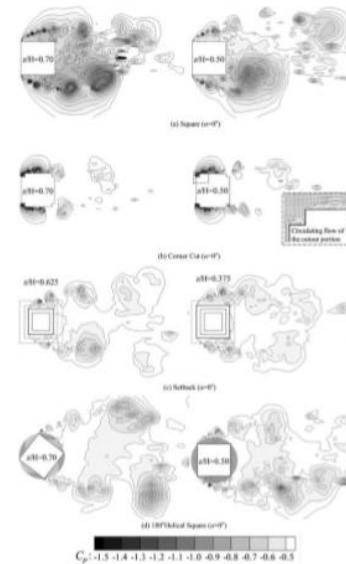


Figure 20. Visualization of instantaneous vortex structures around buildings (Isosurface of pressure coefficient $C_p = 0.7$).



Fuente: (Bandi, 2013) “Visualización de las Estructuras de Vórtice Instantánea Alrededor de los Edificios”

Este efecto puede “observarse en lo más alto” (Bandi, 2013) de los modelos en general, lo que trae como consecuencia que existan mayores esfuerzos producidos por el viento. Para el modelo cuyas esquinas fueron modificadas se encontró una “series de estructuras de vórtices uniformes”

(Bandi, 2013) al igual que en el modelo cuadrado, es decir que estas zonas donde se desprenden los vórtices, existen una mayor cantidad de presión.

La causa de estos efectos se debe a que la circulación “fluye cerca de las regiones de corte de las esquinas en los bordes delanteros que se aproximan a las capas de corte separadas de las superficies laterales del edificio” (Bandi, 2013), una vez que el fluido interactúa con los bordes se “altera el desprendimiento periódico de los vórtices” (Bandi, 2013) y su magnitud va creciendo de forma gradual, además la energía cinética que se produce en base a la fricción con la superficie del edificio trae como resultado que esta se caliente. Estos detalles se los puede observar en el gráfico 33.

En el caso del modelo cónico como es el caso del perfil de retroceso y el modelo helicoidal de 180 grados; sus formas de construcción se modifican en la dirección transversal, lo que produce unas “estructuras de vórtice que son significativamente diferentes de las del modelo cuadrado” (Bandi, 2013). En el artículo del autor Eswara Kumar Bandi se detallan los efectos en estas geometrías que son:

Los vórtices vertidos son bastante pequeños, y los componentes del vórtice a cada altura se elimina a diferentes intervalos de tiempo, lo que resulta en fuerzas de viento cruzado más pequeñas, además la aleatoriedad o irregularidad del desprendimiento de vórtices es más profunda en el modelo helicoidal de 180 grados que en el modelo de retroceso (Bandi, 2013).

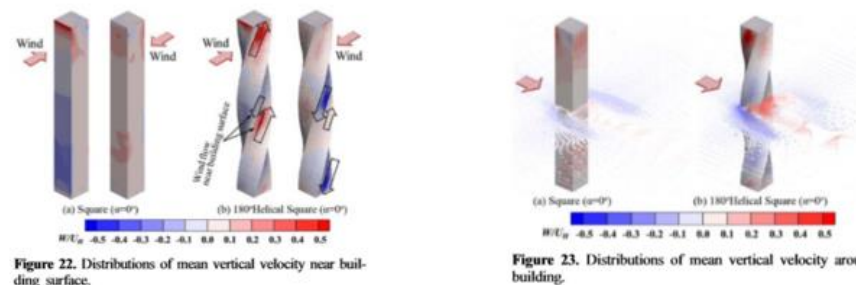
Para todos los modelos con excepción del modelo cuadrado “los vórtices se forman en una posición más alejada de la superficie de sotavento del edificio” (Bandi, 2013), lo que ocasiona que el sentido de las presiones sean más heterogéneas y provoca que “disminuya las fuerzas a lo largo del viento” (Bandi, 2013). Entonces, estas tres formas son adecuadas para “mitigar el desprendimiento de vórtices” (Bandi, 2013) de los valores mean-long-wind y el mean-across-wind.

1.7.2. Efecto de la Forma Helicoidal en las Características de Flujo Alrededor de los Edificios

En el gráfico 34, se exponen las condiciones de flujo vertical donde el “modelo cuadrado helicoidal de 180 grados, supone una mitigación del desprendimiento de vórtices”

(Bandi, 2013). Cabe recalcar que este modelo, sin embargo, presenta “flujos verticales medidos en la parte superior del eje Z” (Bandi, 2013). Este efecto se “produce posiblemente porque las presiones positivas y negativas se mezclan en la misma superficie” (Bandi, 2013), aspecto que se lo puede apreciar en el gráfico 35.

Gráfico 34: Flujo Vertical del Viento



Fuente: (Bandi, 2013) “Promedio del Flujo Vertical de Presiones y Velocidad Alrededor de los Edificios.”

Gráfico 35: Combinación de Presiones

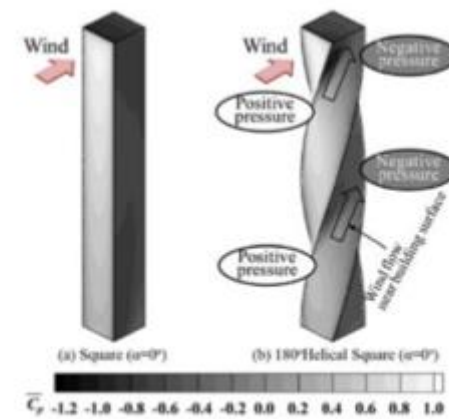


Figure 24. Distributions of mean pressure coefficient.

Fuente: (Bandi, 2013) “Distribución de Presiones”

Una sección conjunta de los fluidos verticales y los fluidos que interactúan alrededor de la geometría hace que “el

desprendimiento de vórtices se aleatorio o irregular” (Bandi, 2013), es decir, que existe una “formación de vórtices desde la superficie de sotavento del edificio” (Bandi, 2013).

1.8. Interacción de las Variables Medio Ambientales en los Edificios de Variadas Alturas.

En el artículo “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations”, se llevó a cabo una serie de mediciones y evaluaciones “de las fuerzas aerodinámicas” (Bandi, 2013) con la finalidad de entender como es la influencia de variables como es el caso de la presión y el viento; para ello se utilizó las simulaciones de tipo LES (Simulaciones de Gran Eddy), y gracias a una “comparación y discusión de las características aerodinámicas de los edificios altos llevaron a las siguientes conclusiones” (Bandi, 2013):

- 1.- Para los coeficientes de momento y de vuelco los módulos cónicos y los modelos de retroceso “muestran mejor comportamiento aerodinámico en la dirección del viento” (Bandi, 2013) (along-wind-direction), mientras que los modelos cuyas esquinas fueron modificadas, modelos helicoidales y los perfiles con aperturas cruzadas cuyas

perforaciones son de $h/H=11/24$ “muestran mejores comportamientos aerodinámicos en la dirección del viento transversal” (Bandi, 2013) (across-wind-direction).

2.- Para los momentos máximos las geometrías cuyas esquinas fueron modificadas, los modelos cónicos de tipo 4-Tapered y los modelos de retroceso “muestran mejores comportamientos aerodinámicos en dirección a lo largo del viento” (Bandi, 2013), mientras que el modelo de apertura cruzada $h/H=11/24$ y los modelos helicoidales “también muestran mejores comportamientos en la dirección del viento cruzado” (Bandi, 2013).

3.- Para todos los modelos testeados las correlaciones entre los coeficientes medidos máximos y los coeficientes fluctuantes “son altos tanto para las direcciones a lo largo del viento como para el viento cruzado” (Bandi, 2013).

4.- Las características aerodinámicas de los modelos compuestos “son en su mayoría superiores a las modificaciones de los modelos de una sola modificación” (Bandi, 2013).

5.- En el estudio antes mencionado, se sostiene que “los modelos de modificación de esquina, los modelos

helicoidales y todos los modelos compuestos muestran un buen desempeño en el diseño de seguridad” (Bandi, 2013). Pero lamentablemente los modelos compuestos con secciones cónicas y los modelos cuyas esquinas fueron alteradas “tienen desventajas en la evaluación de la habitabilidad” (Bandi, 2013). Además, los modelos helicoidales que no poseen componentes cónicos “muestran comportamientos aerodinámicos superiores tanto en diseño de seguridad como de habitabilidad respecto al modelo cuadrado” (Bandi, 2013).

La carga de viento para los modelos helicoidales de 180 grados es en “70% superior a los modelos cuadrado” (Bandi, 2013), por lo tanto, la evaluación de las “características geométricas en los edificios de altura son indispensables” (Bandi, 2013).

6.- El modelo cuadrado sus componentes de vórtices se eliminan casi al mismo tiempo en toda la altura, mientras que en los modelos de retroceso y el modelo cuadrado helicoidal de 180 grados pasa todo lo contrario porque los vórtices que se forman en la superficie “varían mucho con la altura y para estos la fuerza del viento transversal resultante disminuye” (Bandi, 2013).

7.- Solamente para el modelo helicoidal de base cuadrada y de 180 grados “los vórtices se eliminan de forma irregular a lo largo de la altura y da como resultado mejores comportamientos aerodinámicos” (Bandi, 2013).

8.- Las simulaciones numéricas dan a conocer que “los flujos verticales hacen que la caída de vórtice sea aleatoria, formando un vórtice más alejado de la superficie” (Bandi, 2013).

2. Componentes del Consumo Energético Variables Arquitectónicas y su Relación con las Variables Ambientales

Para evaluar cuantitativamente que tan eficiente energéticamente es un edificio con respecto a su diseño, el autor Pham Thi Hai Ha presentan un factor de eficiencia energética para edificios de variadas alturas (K_{hqn}), y la fórmula respectiva para su correspondiente cálculo. Como se ha mencionado con anterioridad las variables ambientales por medio de las simulaciones Large Eddy facultan determinar los efectos de la temperatura sobre el edificio con un margen de error de 0,5 grados centígrados.

“Los cálculos termales actuales en edificios muestran que el 86% del total de la transferencia de calor entra por las

ventanas” (Ha, 2016). Entonces, para la deducción del coeficiente K_{hqn1} dependerá “de la capacidad de protección solar de las ventanas que pueden calcularse aproximadamente como factor de eficiencia energética de ventana” (Ha, 2016), es decir el factor K_{hqn1} contabiliza de una manera cuantitativa las estrategias de eficiencia que se apliquen a un edificio.

Además, el autor Pham Thi Hai Ha, enfatiza que las 6 principales características arquitectónicas que afectarán de forma directa el consumo energético de un edificio deben ser evaluadas en base a un factor que establezca una relación matemática entre las variables ambientales y el desempeño de las características físicas de la edificación, a continuación se explica a detalle las 6 características físicas que mayor relación tienen con respecto al uso de energía en los edificios de variadas alturas.

2.1. Introducción al Factor de Eficiencia Energética en Edificios

Hoy en día “los seres humanos estamos enfrentando la contaminación medio-ambiental, un desgaste de recursos naturales, una crisis energética y el cambio climático” (Ha, 2016). En este contexto diferentes países han decidido tomar

medidas y estrategias direccionadas hacia la sostenibilidad, donde la eficiencia energética es la que más atención recibe.

Por ejemplo, en Vietnam, se promulgó los estándares No. QCVN 09:2013BXD, en la cual se estipulan especificaciones técnicas para el diseño de construcciones civiles, nuevas construcciones o renovaciones que superen 2500m² de área con el fin de asegurar la eficiencia energética (Ha, 2016), de acuerdo a los datos promulgados por el ministro de construcción y corporación financiera internacional:

El consumo energético en edificios civiles en Vietnam abarcar los siguientes componentes: 1 enfriamiento, 2 iluminación, 3 equipos eléctricos, 4 agua caliente, 5 elevadores, 6 ventiladores, 7 bombas de agua, 8 calefacción; donde el uso de sistemas de aire acondicionado constituye una parte importante del consumo de energía eléctrica (29%-47%), luego iluminación, agua caliente, equipos eléctricos, y ascensores (Ha, 2016).

Como datos relevantes producto de la auditoría que se llevó a cabo en el año 2013, reveló que el aire acondicionado era responsable del 55% del uso total de energía, iluminación

17%, ascensores, equipos de oficina y otros electrodomésticos el 28% (Ha, 2016).

Según el artículo “A Concept for Energy-Efficient High-Rise Buildings in Hanoi and a Calculation Method for Building Energy Efficiency Factor” el diseño arquitectónico está estrechamente relacionado con tres componentes del uso de energía que son: 1 aire acondicionado para calentar y enfriar, 2 iluminación artificial durante el día, cuando la luz del día no es suficiente, 3 calentamiento de agua (Ha, 2016).

Las soluciones arquitectónicas en edificios de variadas alturas y sobre todo en rascacielos que son de vital importancia para afrontar las componentes antes mencionadas son: “forma construida, orientación del edificio, diseño sobre el edificio (protección solar, aislamiento térmico, y color sobre la superficie)” (Ha, 2016). En el gráfico 36 se exponen algunas expresiones que se usarán en las ecuaciones que sirven para determinar el factor de consumo energético y que se utilizaron como marco de referencia para la elaboración de la base de datos de los edificios de variadas alturas en la ciudad de Quito.

Gráfico 36: Nomenclatura Índice Energético

Nomenclature	
AC	Air conditioning
$\alpha_w; \alpha_m; \alpha_k$	radiation heat absorption coefficient of wall, roof or glazed surface
τ_k	radiation penetration coefficient of glass
λ_k	heat transfer coefficient of glass
t_{ig}	overall outdoor temperature for walls or roofs; $t_{ig} = t_o + \frac{\alpha_w I_o}{h_n}$
$t_o; t_w$	outdoor and indoor average temperature to be calculated
I_o	total solar radiation on wall or roof surfaces
S_g	direct solar radiation intensity on windows

D_g	sky diffuse radiation intensity on windows
SHGC	solar heat absorption coefficient of window glass, $SHGC = \tau_k + \frac{\alpha_k}{R_{o,ea} \cdot h_n}$
$R_{o,ig}; R_{o,m}; R_{o,cs}$	total heat resistance value of walls, roofs or windows
C	covering coefficient of window transom
$h_i; h_o$	heat transfer coefficients (inner and outer surface of roofs and curtain walls)
$K_{sh}; K_{sd}$	lighting coefficient and sky diffuse radiation coefficient of sun-shading elements, as specified in documents [4, 6].

Fuente: (Ha, 2016) “Nomenclatura Índice Energético”

2.2.Recomendaciones para el Factor de Eficiencia Energética en Edificios

Para evaluar cuantitativamente la eficiencia energética de un edificio en relación con el diseño del mismo, se debe recomendar un factor de eficiencia energética del edificio (simbolizado como K_{hqn1} y especificado de la siguiente manera (Ha, 2016) en el gráfico número 37.

Gráfico 37: Consumo Energético de los Aires Acondicionados

$$K_{hqn1} = \frac{(E_o - E_c)}{E_n} = 1 - \frac{E_c}{E_n} \quad (1)$$

$$E_o = E_{1,0} + E_{2,0} + E_{3,0}; \quad W \quad (2)$$

$$E_c = E_{1,c} + E_{2,c} + E_{3,c}; \quad W \quad (3)$$

in which:

E_o – Total energy consumption of air conditioners ($E_{1,0}$), artificial lighting during daytime ($E_{2,0}$) and warm water supply ($E_{3,0}$), in case building design solutions do not help to reduce the heat transfer from the outside to the inside, as well as do not meet day lighting standards, and the energy for warm water is entirely provided by electricity;

E_c – Total energy consumption of air conditioners ($E_{1,c}$), artificial lighting during daytime ($E_{2,c}$) and warm water supply ($E_{3,c}$), when building design solutions are effective enough to reduce the heat transfer from the outside to the inside, as well as meet day lighting standards, and the energy for warm water is provided by solar energy.

Thus, building energy efficiency factor “ K_{hqn1} ” is the ratio of the total amount of energy reduction in a building with a number of building design solutions for the three purposes mentioned above to the total amount of energy consumption in that building, when no building design solutions are applied.

Fuente: (Ha, 2016) “Consumo Energético de los Aires Acondicionados Ecuaciones”

Donde: E_o es igual al consumo total del aire acondicionado ($E_{1,0}$), iluminación artificial durante las horas del día ($E_{2,0}$), suministro de agua caliente ($E_{3,0}$); aplicar en el caso que las soluciones de diseño no ayuden a reducir la transferencia de calor del exterior al interior; así como no cumplen con los estándares de iluminación diurna, y la energía para el agua caliente provista por la electricidad.

E_c es igual al consumo total de aire acondicionado ($E_{1,c}$), iluminación artificial durante las horas del día ($E_{2,c}$), suministro de agua caliente ($E_{3,c}$), aplicar cuando las soluciones de diseño son lo suficientemente efectivas para reducir la transferencia de calor del exterior al interior, así como cumplen con los estándares de iluminación y la energía para el agua caliente es provista de energía solar.

Por lo tanto, el factor K_{hqn1} de eficiencia energética se entiende como “la relación de la cantidad total de reducción de energía de un edificio con una serie de soluciones de diseño de edificios para los tres propósitos” (Ha, 2016).

2.3.Características de la Arquitectura de Ahorro y Eficiencia Energética

En las ecuaciones anteriores se analizaron los parámetros de diseño y su efecto en la eficiencia energética, por lo tanto, es posible notar que para un mejor uso de energía y una mayor conservación de electricidad en los edificios, un gran número de soluciones pueden ser aplicadas, como protección solar para ventanas, y un buen aislamiento térmico para para techos con el fin de minimizar la capacidad de carga térmica de los aires acondicionados (Ha, 2016).

Con respecto a las condiciones climáticas externas se hacen las siguientes recomendaciones según el autor Pham Thi Hai Ha:

Una buena ventilación cruzada para edificios cuando se aseguran condiciones climáticas exteriores confortables para reducir el tiempo de funcionamiento de los aires acondicionados, tamaño de la ventana apropiado para garantizar una buena iluminación diurna y así evitar el uso de luz eléctrica durante el día; las superficies externas del edificio deben pintarse de colores claros para minimizar la absorción de la radiación solar y; la selección de la orientación del edificio debe hacerse, de modo que el edificio

pueda aprovechar el buen viento de verano, evitar el viento frío de invierno y reducir la ración solar (Ha, 2016).

La orientación del edificio muchas veces representa una serie de problemas, por ejemplo, en muchas ocasiones la ubicación del inmueble depende de la planificación urbana y su trazado, por lo tanto, “los propietarios, los desarrolladores del proyecto, y los arquitectos no siempre pueden escoger una orientación óptima” (Ha, 2016).

Ante dicha problemática el autor propone hacer uso de 6 propiedades de la construcción con la finalidad de “minimizar el consumo de energía y maximizar la eficiencia energética en los edificios” (Ha, 2016), cabe recalcar que el autor Pham Thi Hai Ha, hace referencia a Vietnam, aunque las recomendaciones que más adelante se explican pueden ser aplicados a cualquier parte del planeta tierra.

2.3.1. Ventanas y Protección Solar

Todos los edificios energéticamente eficientes necesitan elementos de protección solar, con la finalidad de minimizar la radiación solar que puede penetrar en los edificios a través de las ventanas, además estos elementos son vitales para controlar el deslumbramiento que puede causar molestias visuales. “Estos elementos de protección pueden

ser filtros flexibles, tanto dentro como fuera de las ventanas, o entre ventanas acristaladas” (Ha, 2016).

Para el acristalamiento del edificio se presentan las siguientes alternativas:

El acristalamiento puede cubrirse con una capa delgada de óxido metálico que ayuda a reflejar la radiación solar que brilla directamente sobre la superficie del acristalamiento o se puede escoger un vidrio de baja emisividad (Ha, 2016).

En cuanto a la configuración geométrica de los elementos de sombra de proyección solar pueden tomar varias formas, por ejemplo, losas horizontales, losas verticales, cajas de rejilla fija, listones horizontales fijos o ajustables / móviles y listones verticales, toldos, terrazas, respiraderos, aleros de lona, balcones, logias, entre otros (Ha, 2016). Estos elementos de protección solar no son solamente útiles para prevenir una incidencia directa del sol sino también ayudan a evitar que en el edificio llueva intensamente, sin evitar que el viento sople en el edificio (Ha, 2016).

Además de los elementos exteriores, también existen elementos de protección interna los cuales presentan las siguientes características según el autor Pham Thi Hai Ha:

Los elementos de protección interna pueden ser, por ejemplo, cortinas, persianas o pantallas de bambú, rejillas entre otros. Estos serán eficaces en términos de control de deslumbramiento interior, pero incapaz de reducir considerablemente la penetración del calor del sol, porque una vez que la radiación solar ha penetrado en una habitación a través de las ventanas acristaladas o muros cortinas, es difícil ir en la dirección opuesta (Ha, 2016).

El uso de vidrios de baja emisividad se ha incrementado considerablemente en los últimos años y se los utiliza en muchos países para proteger los edificios de gran altura de la radiación solar, este material es muy bueno para filtrar los rayos infrarrojos y ultravioleta, sin embargo, presentan una gran desventaja ya que “el vidrio no permite la ventilación natural y que este producto de alta tecnología es bastante caro” (Ha, 2016).

2.3.2. La Planta Arquitectónica Debe ser Bien Diseñada

La planta puede estar abierta para ventilación natural en caso que las condiciones climáticas exteriores estén aseguradas y cerradas si es necesario para fines de aire acondicionado (Ha, 2016), entonces, si el clima no es caliente ni frío tranquilamente se puede lograr la comodidad en el interior del edificio. La ventilación natural no solamente será beneficioso para el ahorro energético, además, se reducirán los costos de operación y habrá efectos positivos en la salud de los ocupantes.

En el caso de requerir el uso de aire acondicionado “el edificio debe ser hermético para reducir la pérdida por enfriamiento” (Ha, 2016). El manejo de las presiones en los edificios de altura también es fundamental para poder controlar las corrientes de viento y que ventilarán el edificio de forma natural. En edificios de gran altura, la ventilación natural puede ser horizontal (debido a la presión del viento), o vertical (debido a la presión del viento y a la diferencia de temperatura (Ha, 2016).

2.3.3. Ventanas en Edificios Energéticamente Eficientes

Las ventanas deben ser lo suficientemente grandes y estar organizadas de manera óptima para aprovechar al máximo la iluminación diurna en todo el edificio durante el día. (Ha, 2016) Es recomendable revisar los índices de difusión de radiación en el cielo, mientras más alto sean mejor iluminación diurna habrá.

2.3.4. Radiación Solar en las Superficies

Según el documento “A Concept for Energy-Efficient High-Rise Buildings in Hanoi and a Calculation Method for Buildings Energy Efficiency Factor”, “la radiación en los techos es de 5 a 9 veces mayor que la de los muros cortina” (Ha, 2016). La excesiva transferencia que ocurre en el techo de los edificios ocasiona que los pisos superiores puedan ser afectados de manera significativa, por lo tanto, el autor del artículo con anterioridad mencionado recomienda que:

El techo debe estar aislado como sea posible, por ejemplo, con un espacio vacío que permita la circulación de aire debajo del techo, una capa de aislamiento hecha de un material liviano, como lana mineral, fibra de vidrio, paja,

hormigón celular esterilizado en autoclave, techo húmedo o techo verde, entre otros (Ha, 2016).

Los estándares No. QCVN 09:2013/BXD requiere que:

El valor total de resistencia al calor ($R_{0,m}$) no debe ser inferior a $1.00\text{m}^2\text{K/W}$ y el valor de resistencia al calor general de una pared en cualquier dirección, ($R_{o,tg}$) no debe ser inferior a $0,56\text{m}^2\text{K/W}$, para que el edificio cumpla con los últimos estándares de eficiencia energética (Ha, 2016).

Es recomendable el uso de paneles fotovoltaicos en techos y muros cortinas con la finalidad de calentar el agua, este sistema puede remplazar el uso de tanques eléctricos. Con respecto al color de las fachadas, “la pintura de color claro para superficies externas de edificios ayuda a reducir la absorción del calor solar” (Ha, 2016); además se plantea las siguientes recomendaciones para el uso del color en superficies externas de edificios de gran altura.

El coeficiente de absorción de radiación solar (α) depende del color externo de la pintura del edificio y se sugiere que se apliquen los siguientes colores con los coeficientes correspondientes (α): azul claro $\alpha=0.64$, azul

cobalto $\alpha=0.58$, púrpura $\alpha=0.83$, amarillo $\alpha=0.44$, lámina metálica de color claro $\alpha= 0.26$, chapa metálica de color oscuro $\alpha=0.86$ y teja roja o marrón $\alpha=0.65-0.72$ (Ha, 2016).

2.4. Factor de Eficiencia Energética del Edificio

(K_{hqn}) con Aire Acondicionado

Como ya ha mencionado con anterioridad el aire acondicionado conforma una parte importante en el uso de energía en los edificios, razón por la cual en el proceso de “diseño y construcción de los edificios, es esencial calcular el flujo de calor a través de la envolvente, OTTV (Overall Thermal Transfer Value W/m²)” (Ha, 2016). La fachada es el principal elemento que determina la sub carga global para el sistema de aire acondicionado y evaluar la eficiencia en términos de uso de energía que un edificio debe alcanzar a través de soluciones de diseño (Ha, 2016).

Entonces, los edificios que poseen sistemas de aire acondicionado su consumo energético está directamente relacionado con la transferencia de calor que ocurre en su envolvente o fachada. Para calcular la eficiencia energética en estas condiciones se puede hacer uso de las siguientes fórmulas, representadas en los gráficos 38, 39, 40, 41 y 42.

Gráfico 38: Ecuación para Calcular la Transferencia de Calor

$$K_{hqn} = 1 - \frac{E_c}{E_0} = 1 - \frac{Q_{en}}{Q_0} \quad (4)$$

$$Q_0 = Q_{cs,0} + Q_{m,0} + Q_{t,0}; W \quad (5)$$

$$Q_{en} = Q_{cs,cn} + Q_{m,cn} + Q_{t,cn}; W \quad (6)$$

in which:

Q_0 – Overall heat transfer through the building envelope (windows, roof, curtain walls) into the building, when there are no sun-shading elements for windows ($Q_{cs,0}$), the roof is not specially insulated ($Q_{m,0}$), and curtain walls go without insulation boards ($Q_{t,0}$);

Q_{en} – Overall heat transfer through the building envelope (windows, roof, curtain walls) into the building, when there are sun-shading elements for windows ($Q_{cs,cn}$), the roof is specially insulated ($Q_{m,cn}$), and curtain walls have insulation boards installed ($Q_{t,cn}$);

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor a Través de la Fachada”

Donde: Q_0 es igual a la transferencia general de calor a través de la envolvente del edificio (ventanas, techo/cubierta, muros cortina) hacia el interior del edificio, cuando no hay elementos de sombra para las ventanas ($Q_{cs,0}$), para el techo/cubierta no aislada específicamente ($Q_{m,0}$), y muros cortina sin paneles de aislamiento ($Q_{t,0}$).

Q_{en} es igual a la transferencia general de calor a través de la envolvente del edificio (ventanas, techo/cubierta, muros cortina) hacia el interior del edificio, cuando existe elementos de sombra para las ventanas ($Q_{cs,cn}$), para el techo/cubierta aislada especialmente ($Q_{m,cn}$), y muros cortina con paneles de aislamiento ($Q_{t,0}$).

Estos métodos de cálculo son aplicables para la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio y para el uso del factor de eficiencia energética (K_{hqn}) tomando en cuenta para ello el empleo de sistemas de climatización

como es el caso de aire acondicionado, pero también se requiere determinar “la transferencia de calor promedio diaria al edificio a través de la envolvente del edificio en el horario de verano se aplica de la siguiente manera” (Ha, 2016).

Valor de la Transferencia de Calor (Envoltura Opaca del Edificio).

Gráfico 39: Ecuación para Calcular la Transferencia de Calor a Través de las Ventanas (Envoltura Opaca)

Heat transfer value (opaque building envelope):

$$Q_{t,m} = F \cdot \frac{t_{ig} - t_{tr}}{R_0}; W$$

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor (Envoltura Opaca)”

Valor de Transferencia de Calor a Través de las Ventanas (Sin elementos de sombra y de alta emisividad).

Gráfico 40: Transferencia de Calor a Través de Ventanas sin Elementos de Protección

Heat transfer value through windows (without sun shading elements):

$$Q_{cs,0} = F_{cs} \cdot SHGC \cdot (S_d + D_d); W$$

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor (Sin elementos de Sombra)”

El valor de la transferencia de calor para ventanas de baja emisividad se lo puede calcular mediante el uso de la fórmula expuesta en el gráfico número 40; pero para el cálculo del valor $Q_{cs,0}$ de ventanas de baja emisividad el SHGC puede determinarse en función del coeficiente de penetración de radiación (W_k) y el coeficiente de absorción

de radiación (Dk) de tipo de vidrio de baja emisividad seleccionado (Ha, 2016).

Determinación del Valor de Transferencia de Calor por Radiación a Través de Ventanas con Elementos Fijos de Protección Solar Exterior:

Gráfico 41: Transferencia de Calor a Través de Ventanas por Radiación (Sin Elementos de Protección)

The value of radiation heat transfer through windows with fixed outer sun shading elements can be determined with the following formula:

$$Q_{cs,cs} = F_{cs} \cdot SHGC \cdot (K_{cs} \cdot S_g + K_{gl} \cdot D_d); W \quad (9)$$

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor por a Través de Ventanas por Radiación (Sin elementos de Protección)”

Transferencia de Calor a Través de las Ventanas con Diferencia de Temperatura del Aire Interior y Exterior

La transferencia de calor a través de las ventanas cuando hay una diferencia en la temperatura interna y externa “ya sea que existiera estructuras de protección solar para ventanas o no, en todas las direcciones se puede determinar con la siguiente fórmula” (Ha, 2016):

Gráfico 42: Transferencia de Calor a Través de Ventanas (Elementos de Protección)

$$Q_{\Delta t} = F_{cs} \cdot \frac{t_{in} - t_{ex}}{R_{o,ext}} ; W$$

Fuente: (Ha, 2016) “Transferencia de Calor a Través de Ventanas Cuando Existe una Diferencia entre la Temperatura Exterior e Interior”.

3. El Consumo Energético: Determinantes de Ocupación y Actividad

Se atribuye que al existir un incremento de las posibilidades de “contacto, regulación, intercambio y comunicación entre los distintos agentes de un sistema urbano” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), la ciudad ostenta un papel competitivo basado en el “conocimiento y la información y no en el consumo masivo de recursos” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), a continuación se presenta la definición del índice de Shannon-Wiener; el cual sirve para calcular el nivel de complejidad urbana.

3.1. Cálculo de Complejidad Urbana y Definición del

Índice de Shannon-Wiener

La complejidad urbana es un tejido constituido de componentes heterogéneos relacionados entre sí, el cual posee dos características fundamentales que son su unidad y multiplicidad. La complejidad en un lugar determinado implica la presencia de distintos elementos portadores de información (actividades, asociaciones, instituciones) que establecen relaciones múltiples y variadas entre ellos (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

En urbanismo se sostiene que cuando existe una fuerte correlación entre los diferentes sistemas que componen la ciudad, el intercambio y el contacto incrementa y para medir cuantitativamente los niveles de relación se hace uso de la fórmula de Shannon-Wiener, el cual establece de manera numérica la relación existente entre las diferentes especies que componen un ecosistema.

El aumento o la disminución de la información organizada en un sistema dependerá de las probabilidades que tengan los individuos para establecer “contacto, intercambio y comunicación entre ellos” (Moreno, 2001), y para poder determinar su valor se hace uso de la fórmula representada en el gráfico 43.

Gráfico 43: Fórmula de Shannon – Wiener

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

Fuente: (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) “Fórmula de Shannon-Wiener”

Donde S representa al número de especies o también denominado como riqueza de especies, p_i ¹⁹ es la proporción de individuos que existen un área determinada con respecto al total de individuos de una especie, a la variable p_i también se la denomina como abundancia relativa de especies que se obtiene aplicando la siguiente expresión (n_i/N); de la cual n_i ²⁰ es el número de individuos de una especie específica y N el número total de los individuos de todas las especies, finalmente el $\ln p_i$ corresponde al logaritmo neperiano del p_i .

El índice de Shannon-Wiener es la base para entender el “grado de centralidad y organización del territorio” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010), las zonas que presentan valores más altos son muestra de los principales sectores de concentración de actividad y también de mayor flujo peatonal derivado de los procesos de atracción e intercambio ejercido por las personas (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

Se recomienda 4 puntos como “unidad mínima para garantizar cierto grado de organización del sistema urbano” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010),

¹⁹ P_i : Valor que se calcula usando la expresión n_i/N . (Moreno, 2001).

y se estima 6 puntos para obtener “una media de 100 actividades a 75 actividades distintas” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010) que se gestan en la zona de estudio, en el capítulo IV se explica con más detalle cómo se gestó el índice de Shannon-Wiener para calcular el grado de actividad relativo correspondiente a cada edificación.

4. Métodos Comparativos y Modelos de Desempeño Energético

Hasta el momento se han explicado las determinantes más trascendentales que describen el comportamiento energético de los edificios y definen su respectivo consumo energético, el objetivo de este trabajo no es profundizar en los sistemas utilizados para medir el gasto energético; sin embargo, hoy en día existen una gran cantidad de métodos para medir y evaluar el rendimiento de energía, los cuales son muy útiles para arquitectos e ingenieros; estos pueden ser divididos en cuatro categorías que son: “métodos basados en simulaciones, sistema de puntos, métricas de uso final y modelos de regresión” (Kontokosta, 2014).

²⁰ n_i : Se obtiene dividiendo el área para la densidad poblacional. (Moreno, 2001).

4.1. Métodos Basados en Simulación

Los modelos basados en simulaciones “estiman el perfil de uso de energía en función de especificaciones de diseño y parámetros de uso” (Kontokosta, 2014), como ejemplo podemos citar el software DOE-2. Estos modelos son bastante útiles durante el proceso de diseño, pero las diferencias entre los patrones de consumo de energía reales simulados limitan la funcionalidad de dicho método para estimar el rendimiento de un edificio (Kontokosta, 2014).

La imprecisión de estos modelos aumenta en función del paso del tiempo, ya que pueden gestarse cambios posteriores al diseño original del edificio o también en base a los patrones de uso y gestión, aspectos que no son simulados, además las variaciones climáticas no proveídas también afectaran al resultado final.

4.2. Métodos Basados en Sistemas de Puntos

Este método utiliza una lista de verificación y un sistema de puntuación para tener en cuenta una amplia variedad de componentes de diseño y características de rendimiento (Kontokosta, 2014). En Estados Unidos se ocupa

el sistema (LEED)²¹, este sistema consiste en asignar puntos para incluir ciertas prácticas de diseño sostenible, selección de materiales, y métodos de construcción y operación de un edificio existente (Kontokosta, 2014).

El sistema LEED es una guía para procesos de diseño y operación que “proporciona un certificado claro y reconocible de calidad general y e impacto ambiental de un edificio” (Kontokosta, 2014), pero la información que proporcionan los métodos basados en puntos es insuficiente como para comparar el rendimiento energético relativo de los edificios con diferentes puntos totales (niveles de certificación) o entre aquellos que han sido certificados y aquellos que no tienen (Kontokosta, 2014).

Además, como sostiene el autor del artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index”:

No sería preciso afirmar que un edificio con certificación LEED Gold sería más eficiente energéticamente que un edificio con certificación LEED Silver basado

únicamente en el nivel de certificación, ni que un edificio con certificación LEED es, necesariamente, más eficiente energéticamente que un edificio sin certificación LEED (Kontokosta, 2014).

Cabe recalcar que una ventaja importante de la LEED es sus permanentes actualizaciones y que en un futuro incluyan parámetros comparativos que sirvan para evaluar el desempeño energético; además que estos sean validados desde una rigurosidad científica.

4.3. Métricas de Uso Final.

Este método “se centra en el rendimiento de los sistemas individuales y proporciona reglas generales para las operaciones de construcción” (Kontokosta, 2014). Para llegar a una aproximación de la eficiencia energética operativa de los sistemas, los métodos de métrica final hacen uso de relaciones bivariados simples.

Estos métodos son usados por los administradores de los edificios e instalaciones como una guía intuitiva para aproximar el funcionamiento adecuado de los equipos

específicos (Kontokosta, 2014). La desventaja que presenta este método es la ausencia del control simultáneo de una gama completa de factores, lo que trae como consecuencia que no se pueda llevar un proceso comparativo eficaz entre el consumo de dos o más edificios ya que la información se vuelve precaria al comparar un solo sistema y no todo conjunto de sistemas que compone el edificio.

El EUI²² usa el método de métricas de uso final, sin embargo, según el autor Constantine E. Kontokosta, este proceso de evaluación ha sido muy criticado ya que:

La intensidad del uso de energía es la métrica más común utilizada para describir la intensidad de todo el edificio, y ha sido criticado por la mala integración del EUI con un indicador de eficiencia energética. Si bien esta métrica es fácil de comunicar, no es efectiva como medida confiable del rendimiento energético relativo cuando existen variaciones no triviales en las condiciones físicas, de ocupación y de otro tipo en los edificios (Kontokosta, 2014).

²¹ LEED: Sistema de medición energética propuesto por el Green Building Council's (LEED), por sus siglas en inglés “Leadership in Energy and Environmental Design”. (Kontokosta, 2014)

²² EUI: Energy Use Intensity. (Kontokosta, 2014)

4.4. Métodos Estadísticos Comparativos Basados en Regresión

Son técnicas utilizadas para controlar numerosas características de construcción por medio de procesos comparativos, pero “estos métodos de evaluación comparativa necesitan una gran muestra para ser estadísticamente significativos” (Kontokosta, 2014). En Estados Unidos la EPA “utiliza la muestra CBERCS como conjunto de datos de referencia para sus modelos estadísticos” (Kontokosta, 2014), la base de datos proporcionada por la CBERCS sin embargo, presenta observaciones que son limitadas lo que provoca que técnicas de estimación tengan poca confiabilidad (Kontokosta, 2014).

Además, los métodos de estadística comparativa usados para medir el rendimiento energético dependerán de varios elementos y factores; muchos de los cuales no son contemplados por las instituciones públicas que realizan las bases de datos, para que los métodos estadísticos comparativos sean eficaces dependerá de los siguientes elementos:

1.- Una suficiente cantidad de datos.

2.- Los datos que estén disponibles deben incluir una variedad de características del edificio. En la ciudad de New York existen nuevas fuentes de datos de energía de edificios, así como características físicas, operativas y de ocupación; que tienen el potencial de comprender mejor los patrones de consumo de energía del edificio (Kontokosta, 2014).

3.- Los modelos comparativos tienen que ser claros en la relación entre las variables dependientes e independientes.

4.- “Los resultados del modelo deben resumirse en una medida común que pueda ser fácilmente comprendida e interpretada” (Kontokosta, 2014). Los resultados, por lo tanto, deben ser entendidos por propietarios, gerentes, inversores, prestamistas e inquilinos.

Según el autor Constantine E. Kontokosta, el éxito de los modelos comparativos que tiene como objetivo el rendimiento energético relativo requieren de: un grupo de referencia apropiado del cual comparar el consumo de energía esperado como un modelo que capture con precisión y que

tenga en cuenta características similares entre edificios para establecer grupos pares apropiados (Kontokosta, 2014).

La comprensión y determinación del desempeño energético en edificios es fundamental para “crear un soporte de operaciones y toma de decisiones para los propietarios de edificios, inversores, inquilinos y administradores” (Kontokosta, 2014), mediante la comparación del consumo de energía “con un grupo de referencia de edificios coincidentes” (Kontokosta, 2014).

Los datos que se obtienen en base a la medida del desempeño energético de los edificios son para comparar el rendimiento de un edificio optimizado con los datos reales de edificios con similares características tipológicas “monitorear los cambios a lo largo del tiempo y evaluar una variedad de medidas de conservación de energía” (Kontokosta, 2014).

4.4.1. Técnicas de Optimización Mediante el Uso de la Técnica (OLS)²³ Ordinary Least Squares

Las regresiones lineales tienen como finalidad “modelar la relación que existe entre dos variables ajustando

²³ Mínimos Cuadrados Ordinarios (Abuín, 2017).

una ecuación lineal a los datos observados” (Reed, 2019), en las regresiones lineales simples existe una “variable explicativa y una variable dependiente” (Reed, 2019); siendo la variable explicativa la correspondiente al eje de las abscisas, mientras que la variable dependiente pertenece al eje de las ordenadas.

Cuando existe más de una variable explicativa que impacta en el comportamiento de la variable dependiente se procede al uso del análisis de regresión múltiple; que es un arquetipo que intenta “modelar la relación entre múltiples variables explicativas a una sola variable dependiente” (Reed, 2019).

Las regresiones múltiples pueden ofrecer la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente, realizar estimaciones más precisas (Abuín, 2017), entonces, si se presenta un determinado problema el objetivo principal será responder “de un vasto conjunto de variables explicativas: X_1, X_2, \dots, X_k , cuáles son las que más influyen en la variable dependiente Y ” (Abuín, 2017), entonces se entiende “que los valores de la variable dependiente Y han sido generados por una combinación lineal de los valores de una o más variables explicativas” (Abuín,

2017) y consecuentemente de un valor aleatorio. En el gráfico 44 se expone la expresión que define toda regresión lineal simple y múltiple.

Gráfico 44: Regresiones Lineales

Modelo de regresión simple:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + u$$

Modelo de regresión múltiple:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_k \cdot x_k + u$$

Fuente: (Abuín, 2017)“Modelos de Regresiones Simples y Múltiples”

La regresión lineal múltiple más común es denominada (OLS), o también conocida como mínimos cuadrados ordinarios, donde los coeficientes que establecen el modelo forman “la suma de cuadrados entre los valores observados y los pronósticos sea mínima” (Abuín, 2017), por lo tanto, al aplicar los coeficientes a un determinado problema “se va a minimizar la varianza residual” (Abuín, 2017), aspecto que es prioridad en este trabajo de final de carrera el cual consiste en optimizar el consumo energético en los edificios de variadas alturas de la ciudad de Quito.

Al agregar más variables se puede “modelar fenómenos más complejos, pero también hay pasos adicionales que se deben seguir” (Reed, 2019) con la

finalidad de asegurar que el “modelo sea sólido y robusto” (Reed, 2019).

4.4.2. Consideraciones a Tomar en Cuenta en los Modelos (OLS)

Existen ciertas reglas que deben ser aplicadas antes de comenzar a construir y codificar nuestro modelo de mínimos cuadrados ordinarios y estas son:

- 1.- Los residuos de la regresión deben distribuirse normalmente.
- 2.- Se hace una suposición en la cual se establece una “relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes” (Reed, 2019).
- 3.- Los residuos deben tener una forma aproximadamente rectangular es decir que exista homocedasticidad, lo que significa que “la hipótesis establece que la variabilidad de los residuos es independiente de las variables explicativas” (Abuín, 2017).
- 4.- Es deseable la “ausencia de multicolinealidad en el modelo, lo que significa que las variables independientes no están demasiado correlacionadas” (Reed, 2019).

5.- No debe existir autocorrelación de los residuos.

4.4.3. Errores que Deben Evitarse al Tratar la Muestra y Construir el Modelo

Los errores más comunes que se cometen cuando se trata la muestra y que deben evitarse son:

1.- Pasar por alto o “no controlar el factor de tamaño” (Abuín, 2017) de la muestra de la población de estudio.

2.- En el caso de haber usado un factor de ponderación este debe ser contemplado, y establecer como afecta los correspondientes resultados.

3.- “Al calcular los grados de libertad en los contrastes de la hipótesis” (Abuín, 2017).

4.- Se deben incluir las variables más relevantes y excluir las que afectan el modelo en base a los efectos de la multicolinealidad.

A continuación, se procede con la exposición del capítulo correspondiente a la metodología; donde se toma como referencia dos casos de estudio que servirán para la elaboración de la base de datos y la construcción del modelo

de evaluación del consumo energético aplicado a los edificios de variadas alturas de la ciudad de Quito.

En el capítulo III y IV que corresponden a la metodología y a la propuesta, se explicará de forma más detallada como se elabora el modelo OLS para optimizar el consumo energético, y exponer la aplicación de los diferentes conceptos y consideraciones estadísticas que ya se han mencionado con anterioridad.

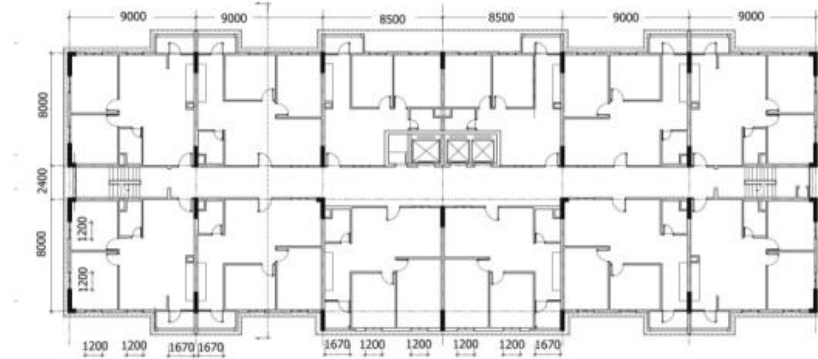
METODOLOGÍA APLICADAS

1. Metodología para Calcular el Factor de Eficiencia Energética de Edificios Interacción de Variables Ambientales

La finalidad de estos cálculos es demostrar la importancia de los sistemas de protección de ventanas, con el objetivo de reducir la transferencia de calor desde la envolvente del edificio o fachada hacia el interior, con la reducción de la transferencia de calor el factor K_{hqn1} mejorará.

En el caso de estudio se presenta una inspección que se realizó en la que los valores generales de transferencia de calor a través de ciertos tipos de envolventes de edificios (techos, muros cortina y ventana) se midieron por separado en un típico día caluroso de verano en Hanoi (Ha, 2016). La finalidad de medir por separado los componentes de la fachada fue para obtener el porcentaje de cada una de las partes de la envolvente, el edificio evaluado puede observarse en el gráfico 45 y 46 respectivamente y es un edificio de apartamentos de gran altura, el edificio 17T10 Nguyen Thi Dinh calle, Trung Hoa; se seleccionó la nueva área urbana de Nhan Chinh (Hanoi) como estudio de caso (Ha, 2016).

Gráfico 45: Planta Arquitectónica



Fuente: (Ha, 2016) "Planta Arquitectónica del Edificio 17T10 Nguyen"

Gráfico 46: Fachada del Edificio

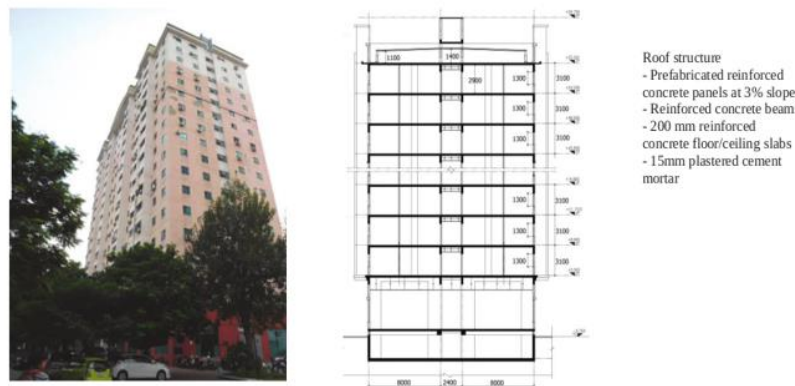


Fig 3. 17T10 residential building

Fig 2. Cross section of 17T10 residential building

Fuente: (Ha, 2016) "Fachada del Edificio 17T10 Nguyen"

Las características físicas del edificio son las siguientes:

1.- Es un edificio residencial de 17 pisos, cada uno tiene una altura de 3.1m, y hay 12 apartamentos por piso. Las dimensiones típicas de cada piso son de 18,4x53.22m.

2.- Los parámetros para los cálculos se dieron de la siguiente manera: Techo plano $\alpha_m = 0,65 \text{ W/m}^2\text{*K}$ con un

piso de techo superior pobremente ventilado de 1,1m a 1,4m de altura $R_{o,m} = 0,763\text{m}^2\text{*K/W}$.

3.- Las paredes están hechas de ladrillo horneados de dos orificios de 220mm de espesor, con 15mm de mortero enlucido a cada lado, $R_{o,tg} = 0,625 \text{ m}^2\text{*K/W}$; $\alpha_t = 0,65 \text{ W/m}^2\text{*K}$.

4.- Ventanas de aluminio acristalado, el vidrio es de 7mm con $\lambda_k = 0,78 \text{ W/m}^2\text{*K}$; $R_{o,es} = 0,179\text{m}^2\text{*K/W}$; $T_k = 0,89$; $\alpha_k = 0,076 \text{ W/m}^2\text{*K}$; $C = 0,82$; por lo tanto, el valor SHGC = 0,744, la expresión para hallar este valor se lo puede observar en el gráfico 47.

Gráfico 47: Fórmula para Calcular el Factor SHGC

$$C \times \left(\tau_k + \frac{\alpha_k}{R_{o,cs} \times h_n} \right) = 0.82 \times \left(0.89 + \frac{0.076}{0.179 \times 25} \right) = 0.744.$$

Fuente: (Ha, 2016) "Cálculo del factor SHGC"

5.- Factor de intercambio de calor de la superficie interior para paredes y ventanas $h_t = 7,692 \text{ W/m}^2\text{*K}$; para el techo $h_t = 5,882 \text{ W/m}^2\text{*K}$. Factor de intercambio de calor de la superficie exterior de la envolvente del edificio $h_n = 25 \text{ W/m}^2\text{*K}$.

Además, se especifican las propiedades de las ventanas que son:

“En términos del área: como 17T10 es un edificio diseñado para residentes de bajos ingresos, se aplicó un estándar para residentes de bajos ingresos” (Ha, 2016), donde el estándar de iluminación bajo para reducir costos del edificio; aspecto que se puede observar en los gráficos 44 y 45, “cada uno de las dos habitaciones en un departamento en el medio tiene una sola ventana pequeña de 1,2m de ancho y 1,3 m de alto = a 1,56 m²” (Ha, 2016).

Además, “hay una pequeña ventana para una cocina (0,89m x 1,27m = 1,13m²) y una puerta acristalada de (0,78m x 2,185m = 1,7m²)” (Ha, 2016). El área total de ventanas y puertas de un apartamento “de tres habitaciones es de 2 X 1,56 m² + 1,13 m² + 1,70 m² = 5,95 m²” (Ha, 2016).

Las losas y pisos fueron contemplados de la siguiente manera: el área del piso es de 66,59m², por lo tanto, su ratio puede ser calculado por medio de la expresión que se muestra en el gráfico 48.

Gráfico 48: Ratio de Losas y Pisos

$$\frac{S_{cs}}{S_{sàn}} = \frac{5.95}{66.59} = 0.0893 \text{ or } \frac{1}{11.2}$$

Fuente: (Ha, 2016) “Fórmula para Calcular el Ratio de Losas y Pisos”

En base a lo que se estipula por la norma China, “un día con iluminación diurna estándar para edificios civiles de

tipo B, el ratio debe ser” (Ha, 2016) en base a la fórmula que se especifica en el gráfico 49.

Gráfico 49: Fórmula para Calcular el Ratio del Edificio 17T10

$$\frac{S_{cs}}{S_{sàn}} = \frac{1}{4} \div \frac{1}{7}$$

Fuente: (Ha, 2016) “Fórmula para Calcular Ratio de Edificios Tipo B (Edificios Residenciales)”

En la norma china también se recomienda que para los edificios de categoría D o E los estándares mínimos del ratio deben ser en base a la siguiente fórmula especificada en el gráfico 50.

Gráfico 50: Fórmula para Calcular el Ratio del Edificio Tipo D o E

$$\frac{S_{cs}}{S_{sàn}} = \frac{1}{10}$$

Fuente: (Ha, 2016) Fórmula para Calcular el Ratio de Edificios Tipo D O E”

Los ratios resultantes en base a la norma china siguen siendo más altos que el edificio 17T10. El edificio 17T10 presenta ciertas características de forma, en las esquinas también existe vidrio “cada uno con 1,56m²” (Ha, 2016), Es por está razón que la fachada del edificio tiene 8 direcciones y que el área de ventanas tenía que ser alterado con la finalidad de tener el calor del ratio optimo, para este fin se utilizó la fórmula representada en el gráfico 51. Entonces, el

área total de acristalamiento de cada uno de los 3 cuartos de cada departamento fue de 13,32 m².

Gráfico 51: Ratio Óptimo de Ventanas

$$\frac{S_{cs}}{S_{sàn}} = \frac{1}{5}$$

Fuente: Fórmula para Calcula el Ratio Óptimo de Ventanas para Ventanas.

El promedio de temperatura externa “(t_n) =360 C, mientras que la temperatura del cuarto con aire acondicionado es de (t_{tr}) = 25 C” (Ha, 2016). El promedio correspondiente a intensidad de radiación (I_n), en los meses más significativos se obtuvieron de una base de datos nacional.

La intensidad de radiación debe contemplar su incidencia en techo, paredes, ventanas. A continuación, se presenta una tabla en la cual se indica el promedio de la intensidad de la radiación en techos, aspecto que se lo puede observar en el gráfico 52.

Gráfico 52: Intensidad de Radiación Solar

Table 1. Total average day solar radiation intensity (I_a) on building surfaces (W/m²) in Hanoi [3]

Quantity	Roof	Wall (window)				
		South	East and West	SE and SW	NE and NW	North
Total solar radiation (I _a), W/m ²	679.02	92.39	311.34	220.76	263.28	153.13

Fuente: (Ha, 2016) “Intensidad de Radiación Sola en Cada Dirección”

Es de vital importancia además calcular los valores de la transferencia de calor global que se gesta en techos, paredes y ventanas; para lo cual se hace uso de las fórmulas representadas en los gráficos 39, 40 y 41. Estos cálculos deben ser realizados en base de datos de temperatura y también en la orientación del edificio, en el caso del edificio 17T10; posee 8 direcciones debido a su forma. En el gráfico 53 se presenta una tabla donde se detallan los resultados de la transferencia de calor.

Gráfico 53: Tabla Resumen Transferencia de Calor

Table 2: Calculations of heat transfer through the walls, roof and windows into the building for the top floor in 8 directions

Quantity	Direction for main facade				
	South	East and West	SE and SW	NE and NW	North
Overall heat transfer through the roof (W)	25282.80	25282.780	25282.780	25282.780	25282.780
Overall heat transfer through the walls (W)	3343.372	3766.853	3677.545	3727.583	3343.372
Overall heat transfer through the windows (W)	22286.276	42941.760	35815.010	35793.136	22286.276
Overall heat transfer through the building envelope (W)	50912.428	71991.393	64775.335	64803.499	50912.428
- Percentage of heat transfer through the roof (%)	49.66	35.12	39.03	39.01	49.66
- Percentage of heat transfer through the walls (%)	6.57	5.23	5.68	5.75	6.57
- Percentage of heat transfer through the windows (%)	43.77	59.65	55.29	55.24	43.77

Table 3: Calculations of heat transfer through the walls and windows into the building for the middle floors in 8 directions

Quantity	Direction for main facade				
	South	East and West	SE and SW	NE and NW	North
Overall heat transfer through the walls (W)	3343.372	3766.853	3677.545	3727.583	3343.372
Overall heat transfer through the windows (W)	22286.276	42941.760	35815.010	35793.136	22286.276
Overall heat transfer through the building envelope (W)	25629.648	46708.613	39492.555	39520.719	25629.648
- Percentage of heat transfer through the walls (%)	13.04	8.06	9.31	9.43	13.04
- Percentage of heat transfer through the windows (%)	86.96	91.94	90.69	90.57	86.96

Fuente: (Ha, 2016) “Tabla Resumen Transferencia de Calor en Techo, Paredes y Ventanas”.

1.2.Observaciones de la Metodología Planteada

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes: “para el piso superior el porcentaje de transferencia de calor a través de las paredes es menor, entre

el 5,23% y 6,27%” (Ha, 2016), el porcentaje de transferencia de calor en el techo en cambio es más alto, el cual corresponde entre el “35,12% al 49,66%” (Ha, 2016), mientras que la transferencia de calor en ventanas es la más alta con valores que van desde los “43,77% a 59,65%” (Ha, 2016).

En la envolvente del edificio la transferencia de calor global es bastante variada, ya que está depende de las direcciones; sin embargo, como ya se ha mencionado con anterioridad, con la finalidad de mejorar el factor de eficiencia energética en el último piso “es necesario proteger las ventanas de la radiación solar y mejorar el aislamiento del techo” (Ha, 2016).

Para los pisos más bajos el porcentaje de la transferencia de calor al edificio a través de las paredes es menor, registrando valores que van desde los “8,06% a 13,04%” (Ha, 2016); a través de las ventanas es mucho más significativos con porcentajes que van desde los “86,96% a 91,94%” (Ha, 2016) y la transferencia de calor global a través de la envolvente depende de las direcciones. Para poder alcanzar un factor de eficiencia adecuado en los pisos intermedios “es necesario proteger las ventanas de la radiación solar” (Ha, 2016).

El factor de eficiencia “ K_{hqnl} ” en los edificios de altura depende de la protección solar en ventanas, para poder medir la capacidad de protección solar de ventanas se usa la siguiente fórmula representada en el gráfico número 54.

Gráfico 54: Medir la Capacidad de Protección de Ventanas

$$K_{hqnl} = 1 - \frac{Q_{cn}}{Q_o} = 1 - \frac{K_{cn} \cdot S_d + K_{bt} \cdot D_d}{S_d + D_d}$$

Fuente: (Ha, 2016) “Fórmula para Medir la Capacidad de Protección de Ventanas”

1.3. Información que Representa el Factor K_{hqnl}

El factor “ K_{hqnl} ” es una buena herramienta que sirve para medir que tan eficiente es un edificio en términos de uso de energía en medida en que las soluciones de diseño de edificios se aplican en cierto grado (Ha, 2016), cabe recalcar que las fórmulas para calcular el factor “ K_{hqnl} ” ya han sido establecidas en una norma vigente.

Basados en las soluciones aplicadas a la eficiencia energética se puede destacar las características que mayor jerarquía, y que tienen estrecha relación en este propósito, las cuales son:

- 1.- Protección para todas las ventanas, 2.- un diseño de apartamento abierto para la ventilación natural y una envolvente cerrada del edificio para aire acondicionado, 3.-

superficies de iluminación diurna para todo el edificio, 4.- buen aislamiento para todo el techo, 5.- instalación de paneles fotovoltaicos en el techo y muros cortina, 6.- colores claros para superficies externas de edificios para reducir la absorción de calor (Ha, 2016).

2. Metodología Específica de Mercado para Generar un Índice de Rendimiento Energético para Edificios Comerciales

La información necesaria para realizar el método de auto regresión propuesto se la obtuvo de la “New York’s Local Law 84 (LL84)” (Kontokosta, 2014), en esta ley se establece “un reporte anual de consumo de energía para edificios grandes” (Kontokosta, 2014), y estos reportes de energía según las autoridades de New York deben ser aplicados a inmuebles que presentan las siguientes características:

1.- Edificios que excedan los 50000²⁴ pies cuadrados de construcción de área bruta.

²⁴ 50000 pies² = 4645,12 m². (Kontokosta, 2014)

²⁵ 10000 pies² = 9290,304 m² (Kontokosta, 2014)

²⁶ 2,9 billones de pies² de construcción = 269.418.816 m² (Kontokosta, 2014).

2.- Dos edificios que estén en la misma manzana y que excedan entre ambos los 10000²⁵ pies cuadrados de construcción de área bruta.

3.- Dos o más edificios que estén implantados en la misma manzana y que estén bajo el mismo régimen de administración y que en conjunto superen los 10000 pies cuadrados de área bruta.

En la ciudad de New York la ley “LL84 se aplica a más de 15000 edificios de propiedad privada a lo largo de los cinco municipios en la ciudad” (Kontokosta, 2014). Donde el 45% del consumo de energía corresponde a “2,9 billones²⁶ de pies” de construcción. Los datos que se obtuvieron fueron “geo-codificados y se los fusionó con el uso del suelo, y los datos geográficos a nivel de lote de los archivos de salida del uso primario del suelo (PLUTO)²⁷” (Kontokosta, 2014). Esta información fue clasificada por el Departamento de Planificación de la Ciudad de New York²⁸; también la

²⁷ PLUTO: Es una base de datos que sirve para recolectar la información de los índices de consumo estipulada por la ley LL84. (Kontokosta, 2014)

²⁸ New York City Department of City Planning. (Kontokosta, 2014).

información antes de ser publicada de manera oficial fue sometida a un proceso de depuración.

Los archivos vectoriales de información de los usos del suelo primario deben incluir una serie de campos entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

1.- Definir el tipo de instalación o también conocido como uso primario.

2.- Consumo de energía en base al uso del suelo primario.

3.- Información correspondiente al área de la edificación.

4.- Materiales de construcción.

5.- Estado de la construcción.

6.- Gastos operativos anuales.

En el gráfico 55 se puede identificar la distribución espacial de los edificios a los que fue posible recopilar

información de los mismos. La base de datos se la geocodificó mediante el uso de la técnica de coincidencia multidimensional; que consiste en empear las entradas de datos por medio de números de identificación como es el caso de las coordenadas, dirección y el número de identificación del inmueble (BIN)²⁹

Gráfico 55: Distribución Espacial de Edificios con Información Geo – Espacial



Fig. 1 Map of Properties Contained in LL84 and CoStar Databases

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Mapa de las Propiedades contenidas en la Ley LL84 y la Base de Datos CoStar”

La información recolectada por CoStar³⁰ e integrada a la base de datos PLUTO, también “incluyó variables adicionales no incluidas en el conjunto de datos LL84, como la clase del edificio en base a la certificación LEED” (Kontokosta, 2014), además del tipo de materiales de construcción, estado de la construcción y gastos operativos anuales que corresponden a los puntos 4, 5 y 6 ya antes mencionados. La muestra correspondiente a “los edificios que cumplían todos los requisitos que contempló CoStar fue de un total de 685 inmuebles de oficinas” (Kontokosta, 2014).

2.1. Estadística Descriptiva

El número total de edificios a los cuales se aplicó la evaluación de desempeño energético es de 8648, lo cuales representan más de 1,4 billones³¹ de pies cuadrados de espacio, “aproximadamente el 63% del total de espacio corresponde a edificios multi - familiares” (Kontokosta, 2014), además según el autor Constantine E. Kontokosta, los resultados de consumo de energía en función de la muestra obtenida son los siguientes:

Para los 948 edificios de oficinas incluidos en los datos reportados, la fuente mediana de EUI es de 213,3; y el promedio es de 233,8; con una desviación estándar de 111,0. Para la muestra fusionada de 685 edificios de oficinas que toman la base de este análisis, la fuente mediana de EUI es de 211,0 y el promedio es de 224,1 con una desviación estándar de 92,4. Por lo tanto, la muestra de edificios para los cuales los datos CoStar son disponibles, consiste en edificios en promedio, con EUI más bajos que la muestra completa de edificios de oficinas recolectadas a través de LL84, y esta prueba representa una diferencia estadísticamente significativa (Kontokosta, 2014).

Es decir, que la base de 685 edificios que tomó como referencia CoStar ya sea por la disponibilidad de datos o porque poseen algún tipo de certificación, ostentan un índice de consumo EUI similar al conjunto universo de edificios de oficinas en New York el cual corresponde a 948 edificios, entonces, los edificios que poseen las certificaciones no están cumpliendo su meta de eficiencia energética. En los gráficos 56, 57 y 58 se puede observar el análisis descriptivo de las

²⁹ BIN: Número de identificación del inmueble usando en la ciudad de New York, similar a la clave catastral. (Kontokosta, 2014)

³⁰ CoStar: Grupo encargado de recolectar la información e integrarlo a la base de datos de la ley LL84 conocida como PLUTO. (Kontokosta, 2014).

³¹ 1,4 billones de pies de construcción = 130.064.256 (Kontokosta, 2014).

variables usadas para la evaluación energética realizada para determinar el consumo energético de los edificios, donde:

El primer histograma representa las frecuencias correspondientes al área de los 948 edificios de oficinas que existe en New York, donde en su gran mayoría los edificios poseen un área menor a los 500000 pies cuadrados. El segundo histograma representa al EUI de 210 edificios que no poseen la certificación LEED y finalmente el tercer histograma corresponden a la evaluación del EUI realizada a los 685 edificios clasificados en base a la certificación LEED. Si comparamos el uso intensivo de energía de los edificios que poseen la certificación LEED con aquellos que carecen de tal certificación de eficacia energética, podemos concluir que la eficiencia no se alcanzado ya que las frecuencias de ambos grupos son muy cercanas.

Gráfico 56: Frecuencias Correspondientes al Área de 948 Edificios

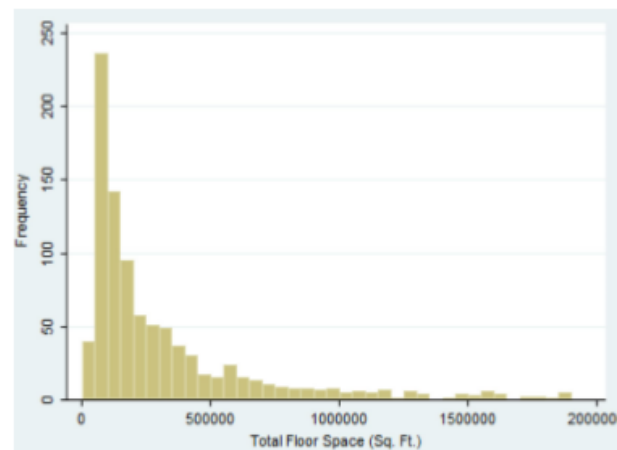


Fig. 2 Histogram of Building Size, Office Buildings Only, Full LL84 Sample (n=948)

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Histograma de Área de los Edificios, Solo Edificios de Oficinas de la Muestra de la LL84 (n=948)”

Gráfico 57: Intensidad del Uso de Energía de la Muestra de 948 Edificios

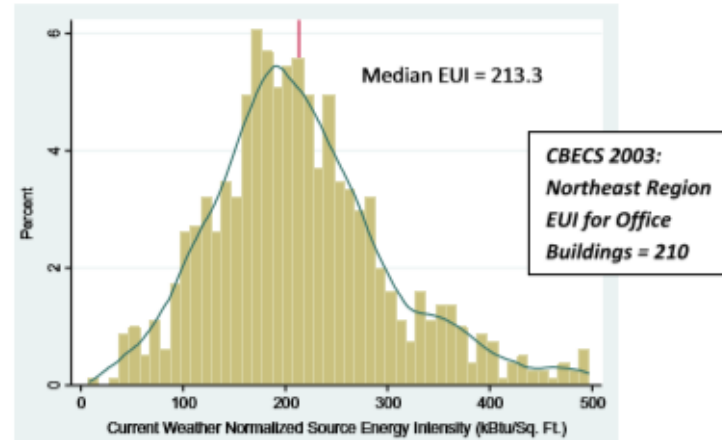


Fig. 3 Histogram of Source EUI with Kernel Density Plot, Office Buildings Only, Full LL84 Sample (n=948)

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Histograma de la Fuente de EUI con un Gráfico de Densidad de Kernel, de los Edificios de Oficinas de la Muestra de la Ley LL84 (n = 948)”

Gráfico 58: Intensidad del Uso de Energía de la Muestra de 685 Edificios de la Muestra CoStar.

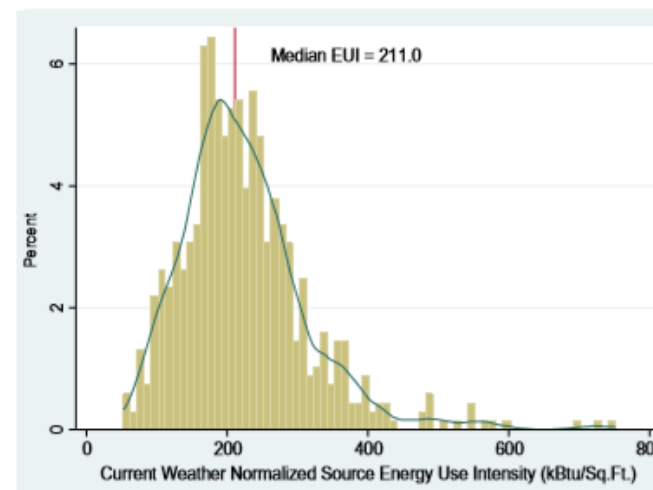


Fig. 4 Histogram of Source EUI, LL84-PLUTO-CoStar Sample (n=685)

Fuente: (Kontokosta, 2014) ” Histograma de la Fuente EUI, de la Muestra CoStar – PLUTO (n = 685).

Existen varios factores que producen estos resultados, por ejemplo, la energía que se contabilizó en el sitio puede incluir “formas de energía primaria y secundaria” (Kontokosta, 2014); y la comparación que se llevó a cabo en función del consumo de energía en el sitio “no contempla la equivalencia termodinámica de los diferentes tipos de combustible” (Kontokosta, 2014).

En el gráfico 59, se puede observar la distribución espacial de los edificios en base a la intensidad del uso de energía eléctrica o EUI. En el mapa podemos identificar que el consumo de energía más alto se encuentra “particularmente en los submercados de Midtown y Downtown” (Kontokosta, 2014). Los lugares con un mayor consumo de energía pueden ser sometidos “a políticas específicas, inversión en infraestructura y aplicaciones potenciales de generación de energía distribuida” (Kontokosta, 2014).

2.2. Análisis de las Determinantes de la Intensidad Energética en Edificios Usando la Metodología de la LL84 y Energy Star

Para mejorar los análisis antes expuestos y obtener una información mucho más detallada el autor Constantine E. Kontokosta, propone un procedimiento para determinar la

intensidad energética de las construcciones en base a un modelo “predictivo del rendimiento energético del edificio y establecer un marco de referencia para la comparación de eficiencia entre pares” (Kontokosta, 2014).

Gráfico 59: Distribución Espacial de los Edificios en Base EUI.

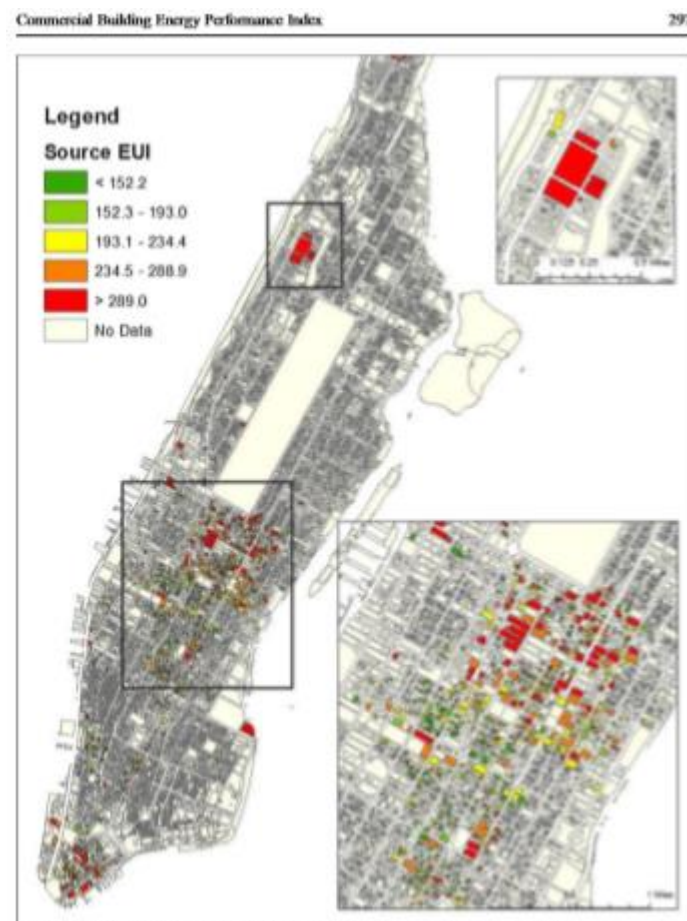


Fig. 5 Spatial Distribution of Office Buildings by Source Energy Use Intensity (n=948)

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Distribución Espacial de los Edificios de Oficinas en Base a la Intensidad del Uso de Energía (n = 948)”

La finalidad es desarrollar un índice de rendimiento en base a un modelo predictivo que se pueda utilizar para estimar

la eficiencia en base a patrones de consumo en edificios para los que no se dispone de datos energéticos reales (Kontokosta, 2014). Como se puede observar en los mapas anteriores, no existe disponibilidad de información para todos los inmuebles, por lo tanto, un índice de eficiencia “podría ser particularmente útil para modelar edificios” (Kontokosta, 2014), además se lograría “estimar el consumo de edificios en otras ciudades” (Kontokosta, 2014).

2.2.1. Limitaciones de los Modelos Actuales

Los modelos de comparación usados para estimar la eficiencia energética deben estar estructurados en función de las condiciones de mercado para la cual fue diseñado un inmueble, ya que las características tipológicas de los edificios difieren sustancialmente, y trae como consecuencia que “los modelos y estimación de coeficientes resultantes en una muestra nacional” (Kontokosta, 2014), puedan ser no válidos en un contexto mercantil.

Debido a la gran variedad de condiciones que los mercados establecen, las muestras nacionales presentan “relaciones entre variables que exhiben diferentes patrones en diversas clasificaciones de construcción, y la suposición de

correlación lineal entre variables a menudo falla” (Kontokosta, 2014); razón por la cual las bases de datos nacionales dedicadas al registro de consumo energético no son del todo confiables para alcanzar datos precisos.

Las condiciones de mercado pueden ser usadas como puntos de partida para poder predecir de una manera más elaborada el desempeño energético en base a la comprensión de las actividades que se desarrollan en las ciudades y específicamente en los edificios, además se pueden incluir procesos para cuantificar las emisiones de carbono de los edificios, también como sostiene el autor Constantine E. Kontokosta; “los inversores y los propietarios de edificios a menudo evalúan el rendimiento de los activos dentro de un contexto específico de mercado” (Kontokosta, 2014); agregar un sistema de evaluación “competitiva de energía focalizada debería ayudar a catalizar las inversiones en propiedades más eficientes o mejoras de energía” (Kontokosta, 2014).

En la expresión representada en el gráfico 60, se puede identificar la fórmula de evaluación más utilizada en el sistema de calificación de Energy Star de la EPA de EE. UU; se basa en una muestra nacional de consumo de energía de edificios comerciales (Kontokosta, 2014).

Gráfico 60: Fórmula de Evaluación Usada por el Sistema de Certificación Energy Star de la EPA de EE.UU.

$$y = \alpha + \beta_1 \log CWorkerDensity + \beta_2 \log COpHours + \beta_3 PCDensity + \beta_4 \log FloorArea + \beta_5 HDD + \beta_6 CDD + \varepsilon$$

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Fórmula de Evaluación de Energy Star”

Donde: $\log CWorkerDensity$: algoritmo natural de número de trabajadores dentro del edificio por cada 1000³² pies cuadrados (centrado en el valor medio de la muestra).

$\log COpHours$: algoritmo natural de las horas de funcionamiento semanal promedio del edificio (centrado en el valor medio de la muestra).

$PCDensity$: el número de computadoras personales por cada 1000 pies cuadrados.

$\log FloorArea$: algoritmo natural de la superficie bruta del edificio.

HDD : cantidad de días del grado de calefacción anuales.

CDD : cantidad de días del grado de enfriamiento anuales.

³² 1000 pies² = 92,903 m² (Kontokosta, 2014).

“La variable independiente “y” se la obtiene de la fuente EUI y CBECS, la cual se utiliza como muestra de referencia” (Kontokosta, 2014). Si bien, las bases de datos EUI y CBECS suministra una importante información en base al uso de energía de un edificio, “el alcance de la encuesta limita el tamaño de la muestra para cualquier tipo de edificio en particular” (Kontokosta, 2014), aunque podemos destacar que la importancia del estudio antes expuesto subyace en una metodología de referencia para clasificar edificios en base a los campos propuestos por estas fuentes.

Las limitaciones que la fórmula de evaluación antes expuesta impone a la muestra es realmente significativa, ya que una vez aplicado el método de valoración en base a los parámetros impuestos por la ley LL84, se encuentra que explica menos del 11% de la variación del EUI normalizada en el clima en los edificios de oficinas de la ciudad de New York (Kontokosta, 2014), aspecto que inclusive contradice las exigencias de la norma ya que se estipula que el valor EUI que debe ser descrito en un 0,33%; por lo tanto, esta metodología no es conveniente usarla para comparar el rendimiento de la construcción entre pares, y determinar de

³³ 200.000 pies² = 18.580.608 m². (Kontokosta, 2014)

esta manera si se ha llegado a optimizar el consumo de los edificios de altura en la ciudad de New York.

Las variables más afectadas por la limitación en la muestra producto de la aplicación de la fórmula de evaluación, según el autor del artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index” son:

1.- Imprecisión, al contemplar la variable “WorkDensity” cuyo diagrama de dispersión puede observarse en el gráfico 61; donde se puede identificar que la totalidad de la fluctuación no se contempla en el modelo, es decir la “colinealidad con la variable densidad” (Kontokosta, 2014), donde existe un sesgo en relación con la ocupación en función de la densidad de trabajadores y las horas de funcionamiento.

2.- La falta de precisión al contemplar el área total de los edificios, la cual muchas veces se ve incentivada por rangos impuestos, por ejemplo, “edificios de más de 200,000³³ pies cuadrados se los clasificó como equivalentes a 200,000 pies cuadrados de área bruta” (Kontokosta, 2014),

entonces, de los 684 edificios “333 poseen un área superior y fueron ingresados en base a los límites estipulados por los rangos, afectando un 48% de la muestra” (Kontokosta, 2014). En el gráfico 62, se “muestra un diagrama de dispersión de EUI por tamaño de construcción” (Kontokosta, 2014); en la gráfica no solamente se incluyen los edificios con áreas menor o igual a 200.000 pies cuadrados, además se añadieron rangos que van desde los 200.000 a 1,000,000 de pies cuadrados y más de 1,000,000 pies cuadrados. En el diagrama del gráfico número 62 se puede comprobar la impresión al contemplar los rangos cerrados.

Gráfico 61: Diagrama de Dispersión Correspondiente a la Densidad de Trabajadores y Horas de Funcionamiento

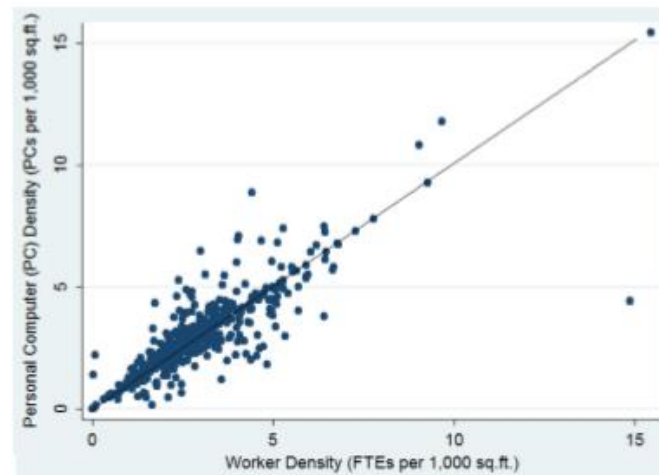


Fig. 6 Scatterplot of PC Density and Worker Density

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Diagrama de Dispersión de la Densidad de Computadoras y Densidad de Trabajadores.”

Gráfico 62: Multicolinealidad Debido al Uso de Rangos Cerrados

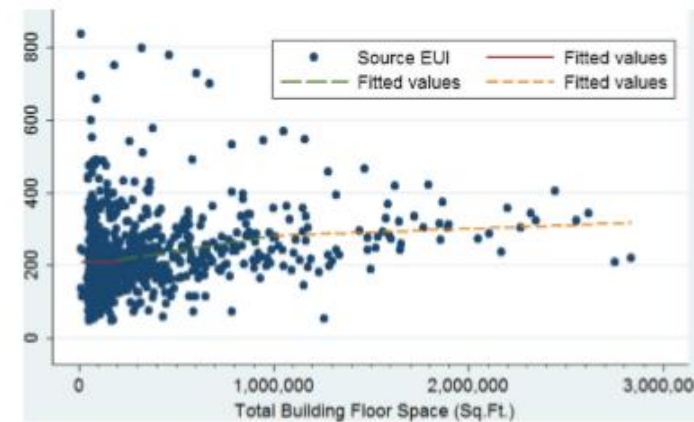


Fig. 7 Scatterplot of Building Size (Gross Floor Area) and Source EUI, with Linear Fit Line

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Diagrama de Dispersión del Área Bruta y la Fuente de la Uso Intensivo de Energía EUI con una Línea de Ajuste”

3.- No se toma en cuenta la edad del edificio, aspecto que muchas veces es determinante en las tendencias de mercado.

2.2.2. Determinantes de la Intensidad de Energía de los Edificios Comerciales

Varios son los factores que determinan la intensidad energética en los edificios, los cuales pueden servir para construir modelos energéticos mediante el uso de técnicas de regresión, estos modelos son óptimos para predecir la intensidad de energía del edificio y proporcional la base computacional para un índice de rendimiento energético a partir de los datos de New York (Kontokosta, 2014), y que también pueden ser aplicados en otras ciudades ya que se hace

uso de “modelos de coeficientes y pruebas de significación” (Kontokosta, 2014).

Los modelos de regresión son bastante eficientes para controlar los diferentes parámetros de manera autónoma, sin embargo, estos modelos también presentan una serie de limitaciones, por ejemplo, puede existir el riesgo de no abarcar toda la información por efectos de colinealidad entre las variables; aunque es el más indicado para manejar este tipo de estudios dada la naturaleza multivariante de los datos.

Para aplicar el modelo, se toma como marco de referencia las especificaciones representadas en el gráfico 63 para estimar la intensidad de energía:

Gráfico 63: Expresión para Predecir el EUI de las Edificaciones

$$y = \alpha + \beta BLDG_i + \gamma OCC_i + \phi CONST + \delta ECO_i + \varepsilon$$

Fuente: “Expresión Propuesta para el Cálculo del EUI y Alternativa a la Metodología de Cálculo de Energy Star”

Donde: BLDG consiste en una variedad de características físicas del edificio, que incluyen la edad, el tamaño y la ubicación del lote.

OCC: incluye variables de ocupación, tales como la densidad de trabajadores y las horas de operación.

CONST: para materiales de construcción y estatus de innovación.

ECO: representa la mezcla del tipo de combustible y la presencia de las etiquetas ecológicas, estas pueden ser certificación LEED y la certificación Energy Star.

$\beta \gamma \phi \delta$: son vectores de parámetros a estimar.

E: Es el término de error.

Y: es la variable dependiente del algoritmo natural de la fuente EUI.

Como el consumo de energía entre edificios fluctúa de forma significativa en función a las variables especiales, el modelo debe ser aplicado a cada edificio de forma individual en base al uso del suelo, y las variables que deben ser registradas son:

1.- Tamaño del Edificio: Área bruta del edificio de acuerdo a las normas y especificaciones de cada país.

2.- Edad del edificio, dato que debe ser aplicado el algoritmo natural.

3.- Renovación: Valor binario iguala 1 si el edificio ha sido renovado y 0 de ser el caso contrario.

4.- Número de Pisos: Número total de pisos de la edificación.

5.- Relación de área de piso construido: Actual relación del área de piso construida del edificio (FAR); el valor se lo calcula como el área de construcción dividida para el área del lote.

6.- Lote Interior: Una variable binaria que sirve para saber si el edificio está emplazado en un lote interno o un lote de esquina.

7.- Fuente Primaria de Energía: Una variable binaria igual a 1 para el tipo de combustible o fuente de energía dominante en el edificio, e igual a 0 en caso de ser contrario; un tipo de combustible o fuente de energía se la considera dominante si representa más del 50% del consumo total de energía del inmueble.

8.- % Arriendo: Porcentaje de espacio arrendado.

9.- Certificación LEED: Variables binarias para cualquier certificación o para niveles de certificación específico.

10.- Etiqueta Energy Star: Una variable binaria igual a 1 si el edificio tiene una etiqueta de certificación Energy Star.

11.- LEED y Energy Star: Una variable binaria de interacción igual a 1 si el edificio tiene certificación LEED y etiqueta Energy Star, y o en caso contrario.

Para el caso de edificios de oficinas, las siguientes variables son base de los 11 puntos antes expuestos:

Office Worker Density / Densidad de Oficinistas: número de empleados por cada 1000 pies cuadrados (valor predeterminado = 2,3).

Office Weekly Operating Hours / Horario de Atención Semanal de las Oficinas: Número de horas por semana que un edificio está ocupado por al menos el 75% de los empleados e inquilinos (valor predeterminado = 65 h por semana).

%Air – Conditioned Space / Espacio de Aire Acondicionado: Proporción de espacio con aire acondicionado.

% Data Center / % Centro de Datos: Proporción de espacio clasificado como uso de centro de datos.

Building Class / Clase de Construcción: Como medida de calidad de construcción.

Construction Material / Materiales de Construcción: Tipo de construcción estructural.

2.3.Resultados en Base a las Modificaciones

Propuestas a la Metodología EUI en Función a Métodos de Regresión

Los métodos de regresión lineal con errores estándar robustos fueron aplicados a dos categorías de edificios en la ciudad de New York y se lo aplico de manera individual, “cada modelo uso como base el algoritmo natural de la fuente EUI como variable independiente” (Kontokosta, 2014); la razón por la cual se hace uso del algoritmo natural es para permitir interpretar las estimaciones de coeficientes para variables independientes como el efecto de un cambio de una

unidad sobre el cambio porcentual en la variable independiente (Kontokosta, 2014).

Las variables continuas son recolectadas como categóricas, es decir a los datos que corresponden a la densidad de trabajadores y tamaño del edificio; también se deben contemplar el cálculo de los factores de inflación de la varianza o también (VIF) con la finalidad de prevenir problemas relacionados a la multicolinealidad.

En el artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Buildings Energy Performance Index”, se presentan los resultados correspondientes a la aplicación del modelo de regresión robusta, sin embargo en este documento se detalla que no se contempló variables explicativas de la intensidad del uso de energía, como es el caso de los sistemas de construcción o equipos usados para la climatización de los inmuebles, razón por la cual en el desarrollo de este trabajo se usó como alternativa para obtener esta información el uso de las especificaciones para medir el rendimiento energético exigido en Vietnam, aspectos que se detallan el artículo “A Concept for Energy-Efficient High-Rise Buildings in Hanoi and a Calculation Method for Building Energy Efficiency Factor”.

En el gráfico 64 se puede observar la matriz base en la cual se recopilan todos los datos que se usaron para medir el rendimiento energético de los edificios en New York por medio del uso del modelo de regresión robusto.

Gráfico 64: Matriz Base de Estadística Descriptiva Usada para Construir el Modelo de Regresión Lineal

Class	Bldg. Size	ES Score	Source EUI	Occ. Density	Water Use (psf/Floors)	Building Age	Avg. Direct Rent	OpEx (psf)	Taxes (psf)		
A	Observations	246	246	246	245	59	245	245	66	228	235
	Median	539,039.50	65.00	248.15	2.66	19.87	31.00	48.00	55.05	18.24	10.45
	Mean	678,725.50	59.61	256.61	3.04	34.13	30.78	51.35	58.87	18.50	11.07
	Std.Dev.	538,107.60	23.24	79.04	1.70	76.76	12.94	24.09	16.60	5.37	4.58
	Skewness	1.56	-0.96	0.98	3.44	7.07	0.36	0.36	0.64	1.16	0.78
	Kurtosis	5.78	3.46	5.67	23.60	52.87	3.57	2.35	3.04	7.03	5.45
B	Observations	311	311	311	311	23	310	310	113	297	303
	Median	144,200.00	65.00	208.10	2.30	16.82	14.00	90.00	42.00	13.18	6.58
	Mean	218,595.60	56.36	224.79	2.70	60.58	15.18	88.83	43.05	14.05	7.22
	Std.Dev.	214,261.20	30.44	94.27	1.21	182.35	6.71	18.71	8.88	6.27	3.36
	Skewness	2.97	-0.73	1.77	1.57	4.36	1.41	-1.72	0.30	2.53	1.98
	Kurtosis	14.94	2.28	8.34	7.62	20.37	6.63	6.90	2.43	17.47	10.77
C	Observations	128	128	128	128	10	127	127	56	122	124
	Median	106,017.00	79.50	145.20	2.30	15.30	12.00	96.00	35.00	9.78	4.63
	Mean	128,846.60	63.36	160.10	2.57	17.80	13.17	94.30	36.05	10.54	5.03
	Std.Dev.	89,977.80	36.57	77.70	1.29	10.80	4.27	12.35	8.23	4.22	1.97
	Skewness	2.79	-0.96	4.10	1.33	1.36	0.39	-1.19	0.77	1.05	2.12
	Kurtosis	12.61	2.25	29.01	5.09	3.91	3.49	9.31	3.36	3.81	11.36

* Opex and Tax data from 2011 or 2012 (based on most current available)

Fig. 9 Descriptive Statistics, by Building Class, Office Buildings, LL84-PLUTO-CoStar Sample (n=685)

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Estadística Descriptiva por Tipología de los Edificios de Oficinas, Muestra LL84-PLUTO-CoStar (n=685)”

2.4.Determinantes de la Intensidad de Energía para Edificios Comerciales

Mientras más información se tenga a predisposición mayor exactitud tendrá el modelo para predecir la intensidad de energía en el edificio de altura, en el gráfico 65 se puede observar una tabla en la cual se exponen todos los coeficientes de las diferentes variables, estos valores pueden interpretarse “como el cambio porcentual en el EUI de origen para un cambio unitario en la variable independiente” (Kontokosta, 2014).

Gráfico 65: Coeficiente de las Variables y Margen de Confiabilidad Correspondiente al 99% y 90%.

Commercial Building Energy Performance Index			
	Full Sample	Class A Only	Class B Only
Number of obs	635	229	288
F(25, 609)	17.05	F(23, 205) = 8.98	F(22, 265) = 7.11
Prob > F	0.000	0.000	0.000
R-squared	0.334	0.370	0.226
Building Quality			
	Coef.	Coef.	Coef.
Class B	-0.008		
Class C	-0.269 ***		
Physical Characteristics			
Floor Area >200k <1M sq.ft.	-0.039	-0.189 ***	-0.002
Floor Area >1M sq.ft.	-0.083	-0.268 **	-0.186
Number of Floors	0.010 ***	0.009 ***	0.017 *
As-built Floor Area Ratio	-0.014 ***	-0.006	-0.024 **
% Air Conditioned Space	0.000	0.003 *	-0.002
Inside Lot	-0.091 ***	-0.020	-0.120 **
Building Age			
Built 1991 to 2010	0.401 ***	0.278 ***	0.401 ***
Built 1971 to 1990	0.091	-0.013	0.130
Built 1951 to 1970	0.030	0.010	-0.145
Built 1931 to 1950	0.011	-0.100	0.028
Renovated Since Built	0.013	-0.005	-0.020
Occupancy and Use			
Operating Hours (log)	0.288 ***	0.161	0.265 *
Operating Hours (quadratic)	-0.00002 **	0.000	0.000
Worker Density (log)	0.085 ***	0.083 **	0.133 ***
% Data Center	3.441 ***	9.611 ***	3.942 ***
% Leased	0.000	0.000	0.003
Construction Type			
Masonry	-0.070 **	0.095 *	-0.130 ***
Reinforced Concrete	0.007	-0.019	0.059
Energy and Eco-labels			
Electric (>50% of total consumption)	0.057	-0.027	0.039
District Steam (>50% of total consumption)	0.004	0.010	-0.252
LEED Certified	0.134	0.084	0.046
Energy Star Labeled	-0.104 ***	-0.141 ***	-0.156 ***
LEED Certified & Energy Star Labeled	-0.200 **	-0.166 **	omitted
Constant	4.207 ***	4.476 ***	4.254 ***

***Significant at the 99% confidence level
 **Significant at the 95% confidence level
 *Significant at the 90% confidence level

Fig. 10 Regression Results, log Source EUI as Dependent Variable. ***Significant at the 99% confidence level, **Significant at the 95% confidence level, *Significant at the 90% confidence level

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Resultados de la Regresión, Log EUI como la Variable Dependiente. Nivel de Significancia del 99% / Nivel de Significancia del 95% / Nivel de Significancia del 90%”

Los resultados que se pueden identificar en la tabla muestran un nivel de confiabilidad del 90% al 99%, además podemos inferir que “los edificios construidos en 1990 tienen mayores intensidad de energía que los que tienen más de 80 años” (Kontokosta, 2014), mientras que los edificios más actuales “consumen un 40% más de energía por pie cuadrado,

en promedio, que los edificios construidos antes de 1930” (Kontokosta, 2014). Entonces la edad de los edificios se “correlaciona negativamente con los factores EUI” (Kontokosta, 2014). Los edificios que se levantaron en las décadas de entre 1930 y 1990 “no muestran una diferencia estadísticamente significativa” (Kontokosta, 2014).

“Estos hallazgos son consistentes en todas las clases de edificios que se han construido en las dos últimas décadas” (Kontokosta, 2014), entonces; porque los edificios más antiguos tienen un mejor desempeño energético si los comparamos con los edificios actuales, la respuesta a tal interrogante son las pautas de diseño que antes se contemplaban con mucha cautela, ya que estas estructuras se construyeron en un momento en que la luz natural y el aire eran los principales medios de iluminación y ventilación del espacio (Kontokosta, 2014), además las envolventes o fachadas de aquellos edificios “se diseñaron con relaciones de acristalamiento más bajas (del orden del 20-40%) frente al 50-75% para el muro cortina de vidrio moderno” (Kontokosta, 2014). Las paredes de la mampostería tanto interna como externa “eran relativamente gruesas y crearon una alta masa térmica” (Kontokosta, 2014).

Todos los factores antes mencionados ayudaron a mitigar el alto consumo de energía en los edificios que se edificaron antes de los años 30 y durante esta década. Además, como sostiene el autor Constantine E. Kontokosta; el mejor desempeño energético en los edificios antiguos también se lo puede atribuir a los siguientes factores como por ejemplo, los edificios más antiguos pueden tener sistemáticamente menos inquilinos / usuarios que consuman menos energía y que las tecnologías instaladas en dichos edificios den como resultado una menor demanda de energía que los edificios más nuevos (Kontokosta, 2014).

Los edificios evaluados en el artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index”, son previos a la estipulación de los estándares de eficiencia energética de la ley LL84 y los hallazgos “no representan los posibles efectos de estos requisitos en el caso de ser más estrictos” (Kontokosta, 2014), pero los resultados arrojados por el modelo sugieren que los edificios existentes más antiguos puedan representar una oportunidad para alcanzar un espacio eficiente en energía en las ciudades de la era industrial (Kontokosta, 2014).

2.4.1. Características físicas

Además de la variable edad, los resultados también demuestran que otras “características físicas del edificio, como el tamaño, el tipo de espacio y la ubicación merecen atención” (Kontokosta, 2014); cabe recalcar que “no se encuentra ninguna relación entre el área del piso del edificio y la fuente EUI” (Kontokosta, 2014). Además, los resultados del modelo sugieren que no existe evidencia que demuestre que los edificios más grandes tengan una diferencia estadísticamente significativa en EUI que los edificios más pequeños (comparación entre 50,000³⁴ 200,000³⁵ pies cuadrados) (Kontokosta, 2014).

Sin embargo, los edificios de categoría A que corresponde a “los edificios más grandes son más eficientes; siendo los edificios de más de 1,000.000³⁶ pies cuadrados los más eficientes por pie cuadrado” (Kontokosta, 2014), sin embargo, los sistemas de estos edificios deben mejorar con la finalidad de disminuir el consumo de energía, es decir que la optimización debe ser más focalizada a los sistemas de climatización, también es recomendable que los edificios más grandes requieran sistemas de transporte vertical adicionales

y los edificios más altos requieren más energía para hacer circular personas, agua y aire (Kontokosta, 2014).

Según el autor Constantine E. Kontokosta, los edificios más altos consumen más energía y “con cada piso adicional aumenta el EUI en aproximadamente 1,0%.

La masa del edificio es una variable que “afecta negativamente al EUI de las torres” (Kontokosta, 2014), para controlar la masa del edificio se debe contemplar “la proporción del área del piso terminado” (Kontokosta, 2014); la masa al correlacionarse negativamente con el EUI se sugiere que los edificios más bajos y densamente construidos en una parcela son más eficientes que las torres con pequeñas huellas en relación con el tamaño del lote (Kontokosta, 2014).

Las actividades que se desarrollan en los edificios y para las cuales estos son diseñados, es un factor de vital importancia para poder clasificar la estructura en diferentes tipos de uso y poder estimar de una manera más precisa el consumo de energía en base a la actividad, es decir que los

resultados están en base a una comprensión de las dinámicas de mercado.

La implantación de los edificios en las parcelas también genera impacto en el consumo de energía, en la evaluación expuesta en el artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index”, se implementó una variable del conjunto de datos PLUTO que se incluye en el modelo es una medida de si el edificio está en un lote interior con un edificio adyacente en ambos lados (Kontokosta, 2014).

El coeficiente de implantación indica que los edificios en los lotes interiores tienen un EUI más bajo que los edificios de esquina o los edificios independientes, en aproximadamente 9,0% (Kontokosta, 2014), según el autor Constantine E. Kontokosta, este es un hallazgo importante, pero esperado: la mayoría de la pérdida de calor en los edificios de gran altura es a través de la envolvente vertical en lugar del techo (Kontokosta, 2014), además, cuando los edificios son adosados, y tienen espacio acondicionado en

³⁴ 50.000 pies² = 4645.152 m² (Kontokosta, 2014).

³⁵ 200.000 pies² = 18580.608 m² (Kontokosta, 2014).

³⁶ 1.000.000 pies² = 92903.04 m² (Kontokosta, 2014).

ambos lados, la pérdida de calor se minimiza a través de la envolvente del edificio (Kontokosta, 2014).

2.4.2. Variable de Ocupación

Las variables de ocupación son determinadas para alcanzar la eficiencia energética en las torres, el autor Constantine E. Kontokosta especifica que los edificios poseen una relación de densidad relativamente baja, el cual corresponde a un vínculo “de (250³⁷ a 400³⁸ pies cuadrados brutos por empleado” (Kontokosta, 2014), se recomienda además “comprender y controlar la densidad de ocupantes y las horas de funcionamiento” (Kontokosta, 2014). Como es de esperarse, “a medida que aumentan las horas de operación o la densidad de ocupantes, también lo hace el EUI del edificio” (Kontokosta, 2014), pero este aspecto es un más significativo en edificios de oficinas.

2.4.3. Efectos del Consumo de Energía para Edificios de Certificación LEED

“No está claro con precisión cuál debería ser el efecto esperado de estas variables en la eficiencia energética del

edificio” (Kontokosta, 2014); sería lógico esperar que los edificios que poseen las certificaciones LEED de más altos estándares tengan un mejor desempeño energético con respecto a las demás certificaciones; sin embargo, los estudios han demostrado que los edificios con certificación LEED no necesariamente tienen un mejor rendimiento energético que sus homólogos no certificados (Kontokosta, 2014); además como el autor del artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index” sostiene:

En la ciudad de New York, donde los códigos de energía de los edificios en la ciudad son más estrictos, en promedio, que muchos otros mercados importantes en los Estados Unidos, la mejora relativa de seguir las pautas LEED para el consumo de energía puede ser mínima. Además, las propiedades con certificación LEED tienden a ser nuevas, oficinas de clase A que atraen a los usuarios de energía de mayor intensidad como inquilinos (Kontokosta, 2014).

Los muros constituidos por mampostería “que generalmente tienen una relación de acristalamiento más baja

que los edificios de muro cortina” (Kontokosta, 2014), suelen tener un mejor desempeño energético; pero también es determinante el tratamiento que se le da a la fachada; entonces no se puede afirmar tan abiertamente que los muros de mampostería serán energéticamente más eficientes, cosa que generalmente lo es; pero que muchas veces se ve afectado de forma positiva o negativa en base al tratamiento que se le dé a la fachada.

Existen otros problemas relacionados a los edificios constituidos por acero estructural y hormigón armado, materiales que “proporcionan poco valor de aislamiento R y son una fuente de transferencia y pérdida de calor” (Kontokosta, 2014); además existen “categorías de edificios que pueden tener una directa relación con la eficiencia energética” (Kontokosta, 2014), por ejemplo, los edificios de clase A tienden a ser más nuevos, atraen a inquilinos de mayor consumo de energía y están constituidos con acero u hormigón armado (Kontokosta, 2014) ; además suelen albergar espacios más suntuosos y elaborados como es el caso de vestíbulos y atrios.

³⁷ 250 pies² = 23.22576 m² (Kontokosta, 2014).

³⁸ 400 pies² = 37.1612 m² (Kontokosta, 2014)

Los edificios de tipo C “a menudo son edificios ubicados en lotes interiores más antiguos constituidos por mampostería y bajas relaciones de acristalamiento” (Kontokosta, 2014), los edificios de categoría C además poseen “instalaciones menos sofisticadas, con menores requisitos de energía” (Kontokosta, 2014).

2.4.4. Desempeño Energético de los Edificios con Certificación LEED Evaluados Mediante el Modelo de Regresión Robusto

Como ya se ha mencionado con anterioridad los edificios con certificación LEED no representan una diferencia estadísticamente significativa para alcanzar mejores desempeños de EUI; cabe recalcar que los parámetros exigidos para alcanzar esta certificación son bastante estrictos, sin embargo, esta “certificación no indica, por si sola, que un edificio es más eficiente energéticamente al controlar otros factores” (Kontokosta, 2014); los certificados LEED pueden clasificarse en tres categorías que son: certificado plata, oro y platino; pero los resultados obtenidos después de aplicar el respectivo método de evaluación para cada categoría, determina que estas

certificaciones no son estadísticamente significativos para alcanzar la eficiencia energética.

Si bien es cierto que la certificación LEED no faculta una comparación entre una gran diversidad de variables, los resultados poco alentadores también se acentúan debido a la limitada muestra a la cual fue posible evaluar, en el artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index”, sostiene que:

La confiabilidad de estas estimaciones de coeficientes está limitada por el pequeño tamaño de la muestra de los edificios con certificación LEED en base de datos (n=38); una restricción que se magnifica cuando se agrupa por nivel de certificación; ya que por ejemplo solo hay un edificio que poseen la LEED de platino en la muestra de la ciudad de New York (Kontokosta, 2014).

En el gráfico 66 se puede apreciar “la medida de las puntuaciones de EUI para edificios LEED y no LEED” (Kontokosta, 2014). Los puntajes alcanzados son significativamente más altos para los edificios que poseen la certificación, pero presentan un EUI similar a los edificios que carecen del aval LEED.

Gráfico 66: Registro de la Fuente Mediana de EUI para Edificios con Certificación LEED

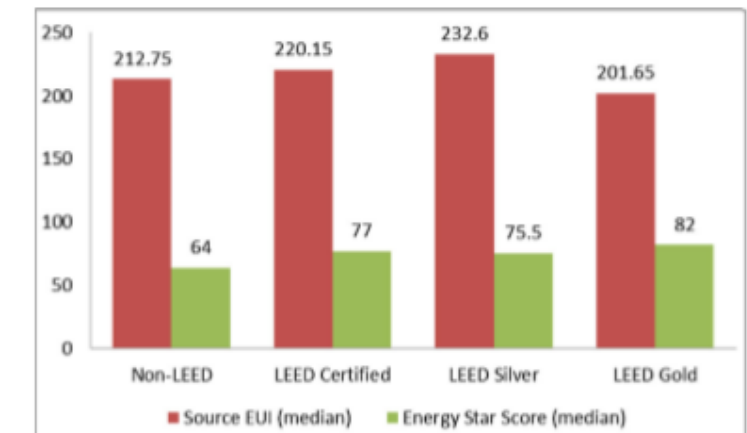


Fig. 12 Median Source EUI and Energy Star Score by LEED Certification Level. Note: There is only one LEED Platinum building in the sample; that category is omitted

Fuente: (Kontokosta, 2014) “Fuente Mediana EUI y Puntaje Energy Star por Nivel de Certificación LEED. Nota: Solo hay un Edificio LEED Platinum en la Muestra, esa Categoría se Omite”

Según la fuente de datos nacional CBECS, las torres que están avaladas por Energy Star son un “11% más eficientes energéticamente que los edificios no etiquetados” (Kontokosta, 2014), siendo un resultado bastante prometedor tomando en cuenta que se exige que para este tipo de estructuras se demuestre un ahorro del 25%, pero en el autor Constantine E. Kontokosta se hace la siguiente afirmación:

Para la muestra nacional de edificios con puntaje Energy Star, los edificios con una etiqueta Energy Star (un total de 75 o más) tienen, en promedio, un EUI 35% más bajo. Esta discrepancia justifica una mayor investigación (Kontokosta, 2014).

Por lo tanto, los datos no empatan en la fuente de datos registrado en la CBECS y la fuente de Energy Star; en cambio LEED orienta la optimización de recursos durante el proceso de diseño, aspecto que es realmente positivo si se contempla un “mayor enfoque en los registros energéticos” (Kontokosta, 2014) de los edificios, sin duda alguna es un cambio metodológico para calcular la eficiencia, pero que traería mejores mediciones a futuro.

2.4.5. Efectos de los Materiales de Construcción

Los materiales de construcción afectan al edificio en varios aspectos, por ejemplo, “los edificios de mampostería tienen un EUI más bajo que los edificios con estructura de acero, en aproximadamente un 7%” (Kontokosta, 2014); si tomamos en cuenta la variable de materialidad podemos inferir que los “edificios de clase C tienen un EUI sustancialmente menor que los edificios de clase A, del orden de un 26% menor de consumo de energía por pie cuadrado” (Kontokosta, 2014).

El mejor rendimiento de los edificios de clase C en comparación con los edificios de clase A y B; puede deberse en gran medida a su materialidad, ya que estas dos últimas

categorías están compuestas “por edificios a menudo más nuevos, más altos, con muros cortina y marcos de acero estructural” (Kontokosta, 2014).

El impacto de las variables físicas y de ubicación tienen una directa correlación con respecto a las demás variables; cabe recalcar que los métodos de regresión son aptos para este propósito.

Capítulo III

Propuesta Metodológica

1.1. Elaboración de la Base de Datos de los Edificios de Variadas Alturas de la Ciudad de Quito

Como ya se ha mencionado al principio de este trabajo, las políticas de planificación que se han promulgado en los últimos años y que sirven de instrumento normativo para establecer una pertinente densificación vertical en la ciudad de Quito, presentan serias falencias para determinar de una manera técnica y científica el impacto ambiental que conlleva la construcción de edificios de variadas alturas en el contexto urbano de la ciudad.

En la Revisión Quinquenal del Instrumento Normativo, del Plan Especial Bicentenario para la Consolidación del Parque de la Ciudad y el Redesarrollo de su Entorno Urbano, se hace un diagnóstico con el fin de identificar las problemáticas más significativas que “dificultan la aplicación del instrumento vigente y determinar las acciones y estrategias con el objetivo de reforzar y mejorar las problemáticas determinadas” (Orbe C. P., 2018).

Sin embargo, no existen estrategias que faculten mitigar la excesiva demanda energética de los edificios en

base a normas que faciliten al mercado inmobiliario identificar por medio de una comparación específica de mercado los mejores y peores desempeños de intensidad energética de las torres.

Razón por la cual en este capítulo se describe el proceso para la aplicación de una metodología de diseño enfocada a determinar el consumo energético de los edificios por medio del uso de un modelo de evaluación comparativa específico de mercado, el cual servirá para medir el rendimiento energético relativo de los edificios similares por medio del uso de un índice multifactorial y dinámico que evalúa numerosas determinantes del consumo de energía en una edificación.

El proceso consiste en la elaboración de una base de datos compuesta de variables que describen problemas multivariantes, los cuales determinaran la variable dependiente correspondiente a un factor de desempeño de rendimiento energético, el cual corresponde a los usos del suelo múltiple y residencial (R2 y R3) de la ciudad de Quito.

La base de datos será tratada por medio de la técnica OLS (Ordinary Least Squares) por lo tanto, las variables independientes que representan las características de los

edificios serán normalizadas con la finalidad de proporcionar un factor energético variante.

Las variables independientes guardan directa relación con el diseño arquitectónico ya que se incluyen datos correspondientes a índices de ocupación, actividad, características físicas de los inmuebles, entre otros; factores que son fundamentales en la logística del estudio de mercado y, que en muchas ocasiones fomentan la incertidumbre con un efecto inflacionario o depreciación en precio del edificio, aspecto que se ve agravado en base al uso de reglas métricas como es el caso de Edge y HERS.

1.1.1. Delimitación de la Zona Urbana de la Ciudad en Base a los Usos del Suelo Primario y las Actividades de Comercio Relacionadas

En el artículo “A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index”, el cual sirvió como marco de referencia para la elaboración de la base de datos y del modelo regresivo usado en el presente trabajo de titulación; especifica que los edificios que tengan un área bruta igual o superior a los 4645,12 m² deben aportar con un informe anual del consumo de energía que requieren y usan

para su correspondiente operatividad, además la ley LL84 de New York establece que la información de los edificios debe ser geo-codificada y empatada con los campos definidos en los polígonos del uso del suelo primario.

En la ciudad de Quito al no poseer un marco legal que permita una disposición semejante a la LL84, se procede a definir todos los inmuebles que superen los 4000 m² de área bruta y que estén localizados en el área urbana, para delimitar y construir la base de datos de la muestra se hace uso de la técnica de conciencia multidimensional para añadir diferentes parámetros que definen el consumo energético de los edificios en la capa vectorial final, sin embargo, antes debe ser delimitada la muestra de la población de los edificios que serán evaluados y para ello se aplica el siguiente procedimiento:

1.- Haciendo uso de los archivos shapes de la base de datos de la página oficial de la iniciativa “Gobierno Abierto” del Distrito Metropolitano de Quito, se procede a definir la zona rural y urbana del cantón Quito.

2.- Una vez que ha sido delimitado el territorio del cantón, se procede a verificar los usos del suelo primario que existen en la zona urbana, para lo cual se toma como

referencia “El Plan de Uso y Ocupación del Suelo” (Distrito Metropolitano de Quito , 2015), o también denominado PUOS.

3.- En el PUOS se describe el tipo de edificaciones que se pueden implantar en un determinado uso del suelo primario; en el gráfico 67 se expone el cuadro número 11 de la correspondiente normativa, titulado “Usos del Suelo y sus Relaciones de Compatibilidad” en el cual se expone los usos primarios residencial (R2, R3) y el uso múltiple.

Gráfico 67: Compatibilidad de los Usos del Suelo Correspondientes al Uso Primario R2, R3 y Múltiple.

PRINCIPAL	PERMITIDOS	PROHIBIDOS
R2	- Residencial: R - Industrial: II1 - Equipamiento: EEB, EES, EEZ1, ECB, ECS, ESB, ESS, EBB, EBS, EBZ, EDB, EDS, EDZ2, ERB, ERS, EGB, EGS, EAS, EAZ, EFS, ETB, ETS, ETZ1, EIB, EIS. - Protección Ecológica: PE - Patrimonio cultural: H - Comercial y de servicios: CB, CS1A, CS1B, CS2, CS3, CS4, CS5, CS6, CS7, CS8.	- Industrial: II2, II3, II4 - Equipamiento: EEZ2, EEM, ECZ, ECM, ESZ, ESM, EBM, EDZ1, EDM, ERM, EGZ, EGM, EAM, EFZ, EFM, ETZ2, ETM, EIZ, EIM, EPZ, EPM. - Recursos Naturales Renovables: RNR - Recursos Naturales No Renovables: RNNR - Comercial y de servicios: CZ, CM
R3	- Residencial: R - Industrial: II1 - Equipamiento: EEB, EES, EEZ1, ECB, ECS, ECZ, ESB, ESS, ESZ, EBB, EBS, EBZ, EDZ2, EDB, EDS, ERB, ERS, EGB, EGS, EGZ, EFS, EFZ, ETS, ETZ1, EAS, EAZ, ETB, EIB, EIS. - Protección Ecológica: PE - Patrimonio cultural: H - Comercial y de servicios: CB, CS1A, CS1B, CS2, CS3, CS4, CS5, CS6, CS7, CS8, CZ2A, CZ3, CZ4, CZ5, CM4.	- Industrial: II2, II3, II4 - Equipamiento: EEZ2, EEM, ECM, ESM, EBM, EDZ1, EDM, ERM, EGM, EAM, EFM, ETZ2, ETM, EIZ, EIM, EPZ, EPM - Recursos Naturales Renovables: RNR - Recursos Naturales No Renovables: RNNR - Comercial y de servicios: CZ1, CZ2B, CZ6, CM1, CM2, CM3, CM5 - Agrícola Residencial: AR - Pirotecnia artesanal : II 1A
Múltiple M	- Residencial: R - Industrial: II1 - Equipamiento: EEB, EES, EEZ, EEM, EC, ES, EBB, EBS, EBZ, EDB, EDS, EDZ, EDM, ERB, ERS, ERM, EGB, EGS, EGZ, EAS, EAZ, EAM, EFS, ETB, ETS, ETZ1, ETZ2, EIB, EIS. - Protección Ecológica: PE - Patrimonio cultural: H - Comercial y de servicios: CB, CS1A, CS1B, CS2, CS3, CS4, CS5, CS6, CS7, CS8, CZ1A, CZ1B, CZ2, CZ3, CZ4, CZ5, CZ6, CM2, CM4	- Industrial: II2, II3, II4 - Equipamiento: EBM, EGM, EFZ, EFM, ETM, EIZ, EIM, EPZ, EPM. - Recursos Naturales Renovables: RNR - Recursos Naturales No Renovables: RNNR - Comercial y de servicios: CM1, CM3, CM5 - Agrícola Residencial: AR - Pirotecnia artesanal : II 1A

Fuente: (Distrito Metropolitano de Quito , 2015) “Usos del Suelo y sus Relaciones de Compatibilidad”

Para los usos R2 y R3 se dispone que está permitido las “actividades de comercio y servicios; las cuales podrán utilizar el 70% y el 100% del COS Total para el desarrollo de estas actividades” (Distrito Metropolitano de Quito , 2015), mientras que el uso múltiple “no tiene restricciones de proporcionalidad con respecto a otros usos” (Distrito Metropolitano de Quito , 2015).

En el marco legal aplicado a la ocupación del suelo en la ciudad de Quito, se define al uso residencial y múltiple como zonas destinadas a la vivienda y que pueden ser una “combinación de otros usos del suelo en las cuales puede coexistir el comercio, la industria de bajo y mediano impacto, servicios y equipamientos compatibles o condicionados” (Distrito Metropolitano de Quito , 2003).

La base de datos propuesta para la construcción del modelo de regresión solamente se enfocará en los edificios cuyas relaciones de compatibilidad sean permitidas con la oferta de bienes y servicios y el desarrollo de actividades comerciales de cualquier índole, por lo tanto, las edificaciones relacionadas a la industria de bajo y mediano

impacto y los diferentes equipamientos no fueron contemplados.

1.1.2. Tipología de los Edificios Comerciales Contemplados en la Muestra

En los mapas representados en el gráfico 68 se delimitan las parroquias urbanas y rurales, y se describe por medio de una gama de colores todos los usos del suelo primario que abarca la zona urbana del cantón Quito, como ya se ha mencionado con anterioridad para la elaboración de la base de datos que servirá para determinar el consumo energético de las edificaciones y construir el modelo de optimización, se contemplará solamente los usos que puedan abarcar infraestructura relacionada a la oferta de bienes y servicios.

Pero, según el autor Constantine E. Kontokosta, en la ciudad de New York se aplica la obligatoriedad de realizar informes de consumo a todas aquellas infraestructuras que tengan o superen los 4645, 12 m² de área bruta, sean estos edificios de varios pisos o una construcción que abarque su programa arquitectónico en una sola planta.

Las infraestructuras que se desarrollan solamente en un nivel, pero que ostentan un área que sea igual o superior a lo estipulado por la Ley LL84 poseen índices de consumo similar a un edificio de varios pisos cuya área de implantación sea menor; razón por la cual en la base de datos correspondiente a la ciudad de Quito se tomará en cuenta a todos los inmuebles comerciales que superen los 4000 m² de área bruta de construcción independientemente del número de pisos.

En el área urbana de la ciudad existen 401190 edificaciones de las cuales 4841 inmuebles ostentan o superan los 4000 m² de construcción y están implantados en el uso primario residencial (R2 - R3) y en el uso múltiple; en el gráfico 68 se exponen los códigos referentes al comercio y la oferta de bienes y servicios que son permitidos en un determinado uso primario, y para el uso del suelo residencial (R2 - R3) se permiten comercios de escala barrial, sectorial, zonal y metropolitano, mientras que en el uso múltiple solamente se permite comercios de escala barrial y sectorial.

La muestra de 4841 inmuebles representa a las edificaciones más grandes de la ciudad en las cuales se ha destinado la “implantación de locales para la realización de

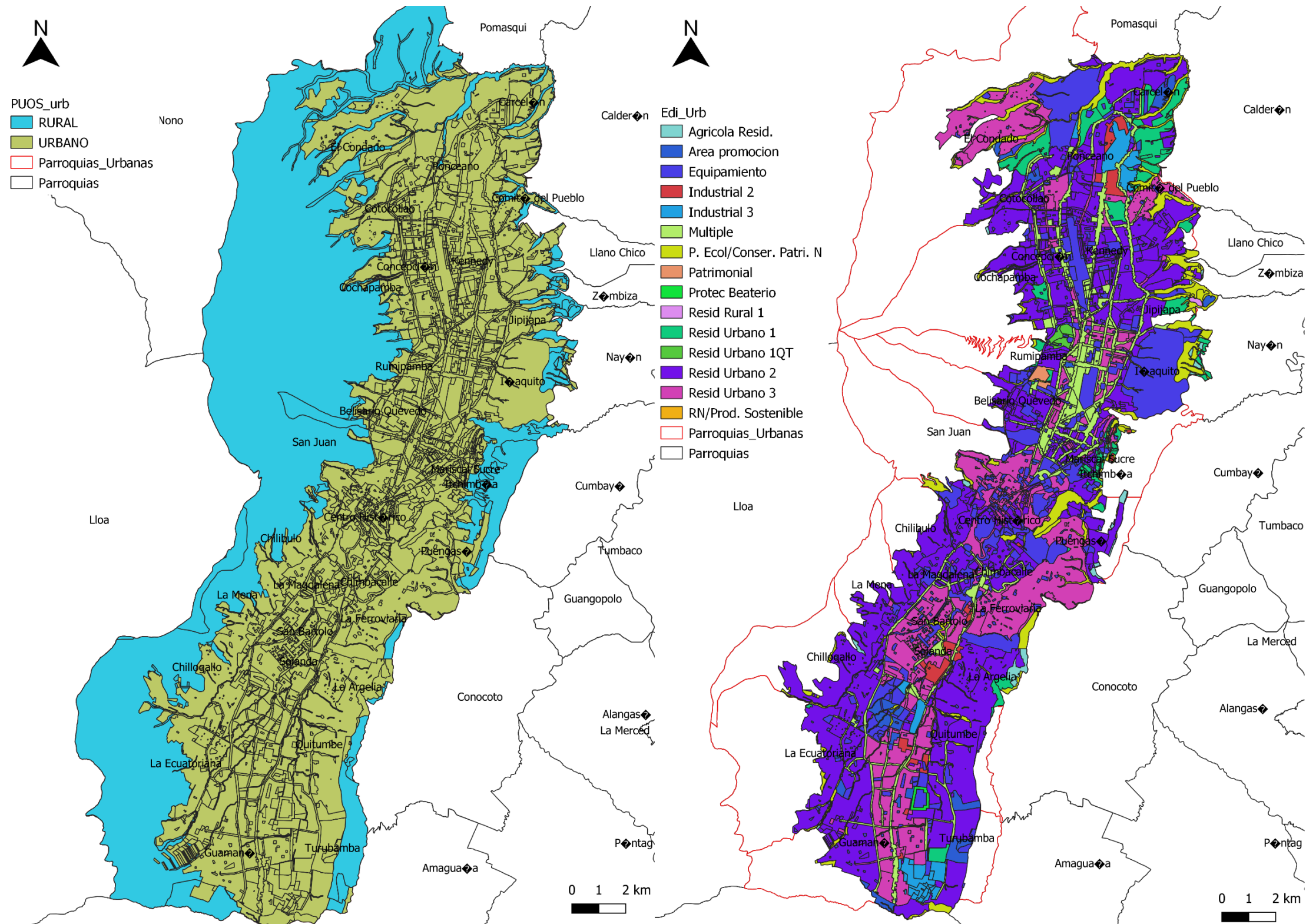
actividades de intercambio de bienes y servicios en diferentes escalas y coberturas, en uso exclusivo o combinado” (Distrito Metropolitano de Quito (Concejo Metropolitano de Quito) , 2005), estos espacios también ostentan relación a los programas de vivienda en altura o conjuntos residenciales, por lo tanto, la información de la base de datos también contempla el comercio a escala barrial y zonal, debido a que estos establecimientos estarían directamente vinculados al consumo energético de las edificaciones de grandes proporciones.

Es decir, que el proceso de normalización que se gestará por medio del modelo de regresión puede ser aplicado a las siguientes tipologías:

CB (Comercio Barrial): abarca tipologías como el comercio básico, servicios básicos, oficinas administrativas y alojamiento doméstico.

CS (Comercio Sectorial): abarca tipologías como comercios especializados, servicios especializados (A-B), comercios de menor escala, comercio temporal, oficinas administrativas en general, alojamiento de segundo tipo, y centros de juego.

Gráfico 68: Usos del Suelo Primario



Fuente: Parroquias urbanas y sus usos del suelo primario de la ciudad de Quito, mapas elaborados en base a la fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 69: Tipologías del Uso Comercial

CUADRO No. 7 DE USO COMERCIAL Y DE SERVICIOS

USO	SIMB.	TIPOLOGÍA	SIMB.	ESTABLECIMIENTOS
Comercio barrial C	CB	Comercio básico	CB1	Abarrotes, frigoríficos con venta de embutidos, bazares y similares, carnicerías, fruterías, panaderías, pastelerías, cafeterías, restaurantes (venta restringida de bebidas alcohólicas), confiterías, heladerías, farmacias, boticas, pequeñas ferreterías, papelerías, venta de revistas y periódicos, micromercados, delicatessen, floristería, fotocopiadoras, alquiler de videos.
		Servicios básicos	CB2	Sucursales bancarias, cajas de ahorro, cooperativas, financieras, venta de muebles, carpinterías, tapicerías y reparación de muebles, recepción de ropa para lavado, lavado de alfombras y tapices, teñido de prendas, sastrerías, peluquerías, salones de belleza, de limpieza, mantenimiento, zapaterías, vulcanizadoras.
		Oficinas administrativas (1)	CB3	Oficinas privadas individuales
		Alojamiento doméstico (1)	CB4	Casa de huéspedes, albergues, posadas, residencias estudiantiles.
Comercio sectorial C	CS	Comercios especializados	CS1	Alfombras, telas y cortinas, artesanías, antigüedades y regalos, artículos de decoración, artículos de cristalería, porcelana y cerámica, artefactos y equipos de iluminación y sonido, artículos para el hogar en general, deportivos y de oficina, venta de bicicletas y motocicletas, distribuidora de flores y artículos de jardinería, galerías de arte, artículos de dibujo y fotografía, instrumentos musicales, discos (audio y video), joyerías, relojerías, ópticas, jugueterías, venta de mascotas, electrodomésticos, librerías, licorerías (venta en botella cerrada), mueblerías, muebles y accesorios de baño, ropa, almacén de zapatos, repuestos y accesorios
		Servicios especializados: A	CS2	Agencias de viajes, servicio de papelería e impresión, laboratorios médicos y dentales, consultorios médicos y dentales hasta 5 unidades, renta de vehículos y alquiler de artículos en general, reparación de electrodomésticos, reparación de relojes, reparación de joyas, talleres fotográficos, salas de danza y baile académico. Consignación de gaseosas. Consultorios y clínicas veterinarias. Entrega de correspondencia y paquetes
		Servicios especializados: B	CS3	Cambios de aceite, lavadoras de autos y lubricadoras, gasolineras y estaciones de servicio, distribución al detal de GLP menores de 500 cilindros de 15kg de gas, mecánicas livianas, mecánicas semipesadas, mecánica general, electricidad, automotriz, vidriería automotriz, mecánica de motos, pintura automotriz, chapistería, mecánica eléctrica, fibra de vidrio, refrigeración, mecánica de bicicletas, mecánica de precisión y patio de venta de vehículos livianos.
		Comercios de menor escala	CS4	Picanterías, venta de fritadas y adicionales, patio de comidas, bodegaje de artículos de reciclaje (vidrio, cartón, papel, plástico). Centros comerciales de hasta 1.000 m2. de área útil, almacenes por departamentos, comiserías institucionales.
		Comercio temporal	CS5	Ferias temporales, espectáculos teatrales, recreativos.
		Oficinas administrativas en general (2)	CS6	Edificios de oficinas privadas y corporativas.
		Alojamiento (2)	CS7	Hoteles, residenciales, hostales, hospedajes y apart-hoteles de tiempo compartido, pensiones, mesones, servicios de albergues juveniles.
		Centros de juego	CS8	Juegos de salón, electrónicos y mecánicos sin apuesta o premios en dinero, salas de billar sin venta de licor, ping pong, bingos, salas de bolos.
Comercio zonal C	CZ	Centros de diversión	CZ1A	Bares, billares con venta de licor, cantinas, videobar, karaoke, pool bar, discotecas, peñas.
			CZ1B	Cafés - concierto, salones de banquetes y recepciones, salas de proyección para adultos, casinos, juegos electrónicos y mecánicos con apuestas o premios en dinero.
		Comercio y servicios.	CZ2	Distribuidora de llantas y servicios, talleres mecánicos pesados, acopio y distribución de materiales pétreos de construcción, comercialización de materiales y acabados de la construcción, centros de lavado en seco, centro ferretero, mudanzas, casas de empeño. Distribuidoras de gas de 500 a 3000 cilindros de 15kg de gas.
		Venta de vehículos y maquinaria liviana	CZ3	Agencias y patios de vehículos (con taller en local cerrado), venta y renta de maquinaria liviana en general.
		Almacenes y bodegas	CZ4	Centrales de abastos, bodegas de productos (elaborados, empaquetados y embasados que no impliquen alto riesgo), distribuidora de insumos alimenticios y agropecuarios. Centros de acopio de GLP. Bodegas comerciales de productos perecibles y no perecibles.
		Centros de comercio	CZ5	Comercios agrupados en general hasta 5.000 m2. de área útil, mercados tradicionales y centros de comercio popular, establecimientos de carga y encomiendas.
		Alojamiento (3)	CZ6	Complejos hoteleros con o sin centros comerciales y de servicios
Comercio de ciudad y metropolitano C	CM	Alojamiento restringido (4)	CM1	Moteles, casas de cita, lenocinios, prostibulos, cabarets.
		Venta vehículos y maquinaria pesada	CM2	Áreas de exposición y ventas de maquinaria y vehículos y maquinaria pesada.
		Talleres servicios y venta	CM3	Insumos para la industria, comercio mayorista.
		especializada		
		Centros comerciales	CM4	Comercios agrupados en general mayores a 5.000 m2. de área útil.

Fuente: (Distrito Metropolitano de Quito (Concejo Metropolitano de Quito), 2005) "Cuadro No. 7 de Uso Comercial y Servicios"

CZ (Comercio Zonal): abarca tipologías como comercios y servicios, venta de vehículos y maquinaria liviana, almacenes y bodegas y centros de comercio.

CM (Comercio de Ciudad y Metropolitano): abarca tipologías como centros comerciales.

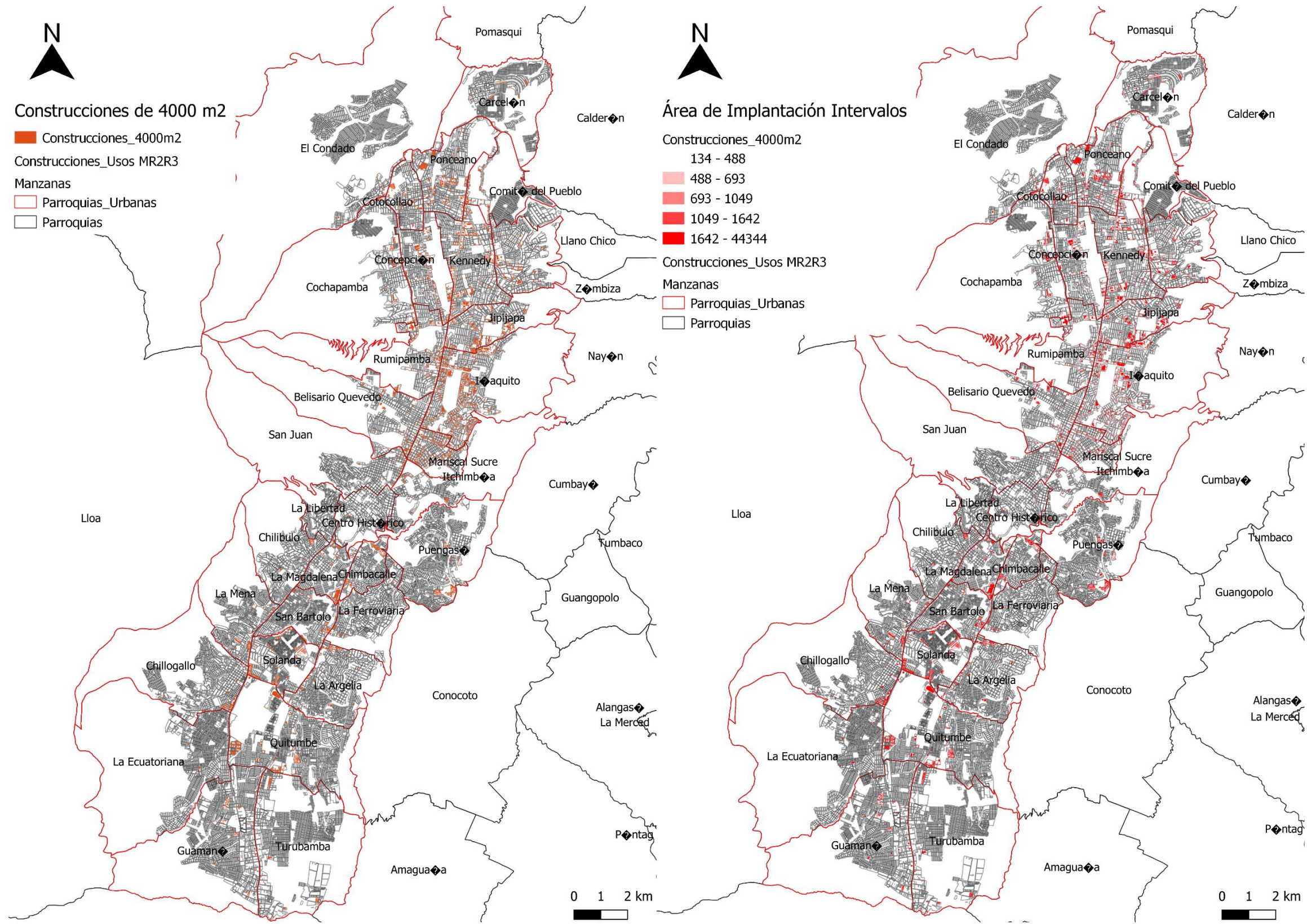
Mientras que el modelo regresivo no contempla las siguientes tipologías:

CZ (Comercio Zonal): Centros de diversión y alojamientos de tercer tipo.

CM (Comercio de Ciudad y Metropolitano): Alojamiento restringido de cuarto tipo, venta de vehículos y maquinaria pesada, talleres servicios y venta.

En el gráfico 69 se expone la tabla titulada "Cuadro No. 7 de Uso Comercial y Servicios" en el cual se detalla con más profundidad las tipologías a las cuales se puede aplicar el método regresivo propuesto en este trabajo, mientras que el gráfico 70 se puede observar la distribución espacial de las edificaciones que superan los 4000 m² de área bruta y que serán evaluadas para determinar su consumo energético.

Gráfico 70: Construcciones de 4000 m² de Área Bruta



Fuente: Construcciones que poseen un área igual o superior a los 4000 m² de área de implantación, mapa elaborado en base a la fuente (Kontokosta, 2014)

1.1.3. Variables Independientes
Catóricas y Descriptivas que se
Cree que Definen a la Variable
Dependiente

Para predecir el consumo energético de las edificaciones en base a un modelo predictivo que establezca un marco de referencia para la respectiva comparación entre pares, se debe desarrollar un índice que estime el respectivo gasto en base a patrones de consumo en los edificios para los cuales no se dispone de datos energéticos reales, esto se debe en gran medida a que no existe una disponibilidad de datos para todos los inmuebles, problema que es un más latente en ciudades que carecen de un marco legal similar al aplicado en la ciudad de New York el cual facilita la recopilación de información relevante.

Por lo tanto, la estimación de un índice de eficiencia podría ser bastante útil para modelar edificios en base a diferentes características físicas, ambientales y de ocupación, es decir, que el modelo propuesto en el presente trabajo está estructurado en base a las condiciones de mercado más relevantes para las cuales se diseña un determinado edificio, logrando de esta manera que los resultados puedan ser aplicados en un contexto mercantil, ya que evita la estimación

de coeficientes que no obedecen a las a las variadas tipologías que existen en un determinado contexto urbano.

Las condiciones variantes que el mercado establece en la planificación arquitectónica ocasionan que las correlaciones lineales entre las variables fallen, es por esta razón que las bases de datos nacionales de otros países sean descartadas como marco de referencia para la aplicación del modelo en la ciudad de Quito; debido que las condiciones de mercado en la capital ecuatoriana no son las mismas que en otras ciudades.

Entonces, el contexto mercantil fundamentado en las dinámicas de oferta y demanda son un punto de partida para predecir el consumo energético de las edificaciones en base a al entendimiento de las actividades que se desarrollan en las ciudades y específicamente en los edificios; aspecto que sería de gran utilidad para los mercados inversionistas, quienes a menudo verifican el rendimiento de un determinado activo dentro de un contexto específico subordinado a una serie de parámetros que pueden ser contemplados solamente por los autores que intervienen directamente en dicha actividad.

Los parámetros o determinantes del consumo energético de las diferentes tipologías de edificios sirven para

la construcción de modelos regresivos que calculan los diferentes coeficientes en base a una muestra poblacional existente y evita los sesgos de información que los intervalos cerrados producen, la eficiencia de estos modelos radica en su capacidad para controlar diferentes parámetros de manera autónoma.

La ecuación paramétrica representada en el gráfico 63, la cual define el modelo de regresión lineal, fue adaptada a las condiciones de los edificios comerciales que se encuentran emplazados en el uso del suelo primario residencial (R2 – R3) y uso múltiple; las variables que se cree que poseen un impacto en el consumo energético de los edificios, se las ha dividido en tres grupos.

1.- Conjunto de variables explicativas y categóricas más relevantes de los edificios tales como:

1.a. - Área de implantación de las propiedades: variable que contiene información no solamente del área en planta baja de los edificios, además también se incluyen espacios abiertos que pertenecen a conjuntos residenciales o centros comerciales que están relacionados a estacionamientos o vacíos destinados a diversas actividades

como es el caso zonas comunales pero que son de uso privado y público. (Distrito Metropolitano de Quito, 2015)

1.b.- Número de pisos: en la base de datos se incluyó aquellos edificios cuyo programa arquitectónico se resuelve en una sola planta o en varios pisos.

1.c.- Cos PB = Coeficiente de ocupación del suelo en planta baja, que según la ordenanza que estipula “Las Normas de Arquitectura y Urbanismo”, se define como “la relación entre el área útil construida en planta baja y el área total del lote” (Distrito Metropolitano de Quito , 2003).

1.d.- Cos Total = Coeficiente de ocupación del suelo total, que se define según la ordenanza “Las Normas de Arquitectura y Urbanismo”; como “la relación entre el área útil total construida y el área del lote” (Distrito Metropolitano de Quito , 2003).

1.e.- Área útil construida: “es el resultante de restar del área total construida, del área no computable” (Distrito Metropolitano de Quito , 2003).

1.f.- Área Lote: Corresponde al resultado de dividir el área de implantación para el Cos en planta baja. (Distrito Metropolitano de Quito , 2015).

1.g.- Número de parqueaderos

1.h.- Área de subsuelos: corresponde a los locales que no están destinados a ser habitables; como, por ejemplo, espacios de circulación, ductos, instalaciones, bodegas y el espacio destinado para parqueaderos.

1.i.- Área bruta: “es el área que resulta de sumar todos los espacios construidos cubiertos que se encuentre sobre y bajo nivel natural del terreno” (Distrito Metropolitano de Quito , 2003).

1.j.- Volumen de la edificación: producto de multiplicar el área de implantación por la altura de la edificación.

1.k.- Año: Variable categórica que sugiere el año en el cual se construyó una determinada edificación, correspondiente al archivo shape de crecimiento urbano, del distrito metropolitano de Quito.

2.- Conjunto de variables independientes que se definieron y determinaron en base a las metodologías de diseño enfocadas en entender y determinar el consumo energético en función de las condiciones ambientales y su respectiva respuesta arquitectónica, y estas son:

2.a. - Factor de consumo, calculado a partir de los elementos de protección de los edificios.

2.b.- Consumo estimado de los equipos de climatización (HVAC).

2.c.- Consumo total de energía en un determinado edificio.

2.d.- Transferencia de calor producto de la forma del edificio y su interacción con el ambiente exterior.

3.- Finalmente, el tercer grupo consistió en las determinantes de ocupación y actividad gestadas en el los edificios calculados en base al índice de Shannon-Wiener.

3.a. - Consumo per cápita que se gesta en cada edificación.

3.b.- Compacidad absoluta correspondiente a los usos del suelo primario residencial (R2 – R3) y múltiple.

3.c.- Densidad poblacional correspondiente a los usos del suelo de uso primario residencial (R2 - R3) y múltiple.

3.d.- Índice del grado de actividad en las zonas de influencia relacionados a los equipamientos.

Gráfico 71: Ejemplo de la Base de Datos Referente a la Muestra

Registro	Area_Implantacion	Numero_Pisos	Cos_PB	Cos_Total	Zona_Usos	Area_Util	Area_Lote	Numero_Parqueaderos	Area_Subsueltos	Area_Bruta	Volumen	Composicion_Absoluta	Densidad_Poblacional_Km2	Consumo_Persona	Factor_Consumo	Consumo_Hvac	Consumo_Totale	Transferencia_Calor	Anio	Actividad_Equipamiento	Actividad_M	Actividad_R2	Actividad_R3	Actividad_Totale
138940	18012	3	80	240	Con_D3D4	54036	22515	2702	54040	108076	324228	14.400533	7.30999994	9779.24482	0.0943	922.1828	10701.4276	8022.825	1987	0	0	4.53174591	0	4.53174591
148684	2507	3	80	240	Con_D3D4	7521	3133.75	376	7520	15041	45123	14.3990427	6.03999996	8080.25155	0.0131	106.0545	8186.3060	1116.6568	1760	0	0	1.47874069	0.69979173	2.17853242
226838	1875	3	80	240	Con_D3D4	5625	2343.75	281	5620	11245	33735	14.3936	33.0499992	44213.9585	0.0098	434.0207	44647.9792	835.1542	1921	0	0	2.05110264	0	2.05110264
167181	1740	3	80	240	Con_D3D4	5220	2175	261	5220	10440	31320	14.4	18.1399994	24267.5098	0.0091	221.0672	24488.5769	775.0231	1946	0	0	2.10078073	0	2.10078073
151962	4566	3	80	240	Con_D3D4	13698	5707.5	685	13700	27398	82194	14.4010512	12.2799997	16428.0608	0.0239	392.7100	16820.7708	2033.7674	1946	0	0	0.67539042	0	0.67539042
151966	1804	3	80	240	Con_D3D4	5412	2255	271	5420	10832	32496	14.410643	12.2799997	16428.0608	0.0094	155.1574	16583.2183	803.5297	1946	0	0	0.67539042	0	0.67539042
185145	1689	3	80	240	Con_D3D4	5067	2111.25	253	5060	10127	30381	14.3900533	12.2799997	16428.0608	0.0088	145.2666	16573.3274	752.3069	1946	0	0	0.67539042	0	0.67539042
200095	1723	3	80	240	Con_D3D4	5169	2153.75	258	5160	10329	30987	14.3874637	7.48999977	10020.0468	0.0090	90.3868	10110.4335	767.4510	1956	0	0	5.35744858	0	5.35744858
140078	5103	3	80	240	Con_D3D4	15309	6378.75	765	15300	30609	91827	14.3957672	7.51999998	10060.1808	0.0267	268.7702	10328.9510	2272.9556	1956	0	0	2.55456424	0	2.55456424
192419	1642	3	80	240	Con_D3D4	4926	2052.5	246	4920	9846	29538	14.3912302	25.5699997	34207.2899	0.0086	294.0638	34501.3537	731.3723	1971	0	0	0	4.22294664	4.22294664
273391	3503	3	80	240	Con_D3D4	10509	4378.75	525	10500	21009	63027	14.3938339	39.2799988	52548.3896	0.0183	963.7165	53512.1061	1560.2907	1971	0	0	1.40913487	0	1.40913487
273392	3558	3	80	240	Con_D3D4	10674	4447.5	534	10680	21354	64062	14.4040472	39.2799988	52548.3896	0.0186	978.8477	53527.2372	1584.7885	1971	0	0	1.40913487	0	1.40913487
273408	5748	3	80	240	Con_D3D4	17244	7185	862	17240	34484	103452	14.3983299	39.2799988	52548.3896	0.0301	1581.3424	54129.7320	2560.2486	1971	0	0	1.40913487	0	1.40913487
273424	2605	3	80	240	Con_D3D4	7815	3256.25	391	7820	15635	46905	14.4046065	39.2799988	52548.3896	0.0136	716.6662	53265.0557	1160.3075	1971	0	0	1.40913487	0	1.40913487
273433	4615	3	80	240	Con_D3D4	13845	5768.75	692	13840	27685	83055	14.3973998	39.2799988	52548.3896	0.0242	1269.6408	53818.0304	2055.5928	1971	0	0	1.40913487	0	1.40913487
273762	1908	3	80	240	Con_D3D4	5724	2385	286	5720	11444	34332	14.3949686	39.2099991	52454.7447	0.0100	523.9778	52978.7225	849.8529	1971	0	0	1.41091859	0	1.41091859
274340	1645	3	80	240	Con_D3D4	4935	2056.25	247	4940	9875	29625	14.4072948	31.8299999	42581.8556	0.0086	366.7248	42948.5804	732.7086	1971	0	0	1.61944115	0	1.61944115
198263	1516	3	80	240	Con_D3D4	4548	1895	227	4540	9088	27264	14.3873351	26.8600006	35933.0402	0.0079	285.1957	36218.2359	675.2500	1971	0	0	0.09196511	0	0.09196511
99492	2148	3	60	180	Con_C1	6444	3580	322	6440	12884	38652	10.796648	2.63000011	3518.38785	0.0112	39.5665	3557.9544	956.7526	1971	0	2.4342134	3.16818261	0	5.60239601
99598	2004	3	60	180	Con_C1	6012	3340	301	6020	12032	36096	10.8071856	2.61999989	3505.00965	0.0105	36.7736	3541.7833	892.6128	1971	0	0	3.1719923	0	3.1719923
191070	4443	3	80	240	Con_D3D4	13329	5553.75	666	13320	26649	79947	14.3951384	25.1200008	33605.2859	0.0233	781.6884	34386.9743	1978.9813	1971	0	0	0.21835496	0	0.21835496
125136	2277	3	80	240	Con_D3D4	6831	2846.25	342	6840	13671	41013	14.4094862	1.34000003	1792.63864	0.0119	21.3701	1814.0087	1014.2112	1983	0	0	6.86448145	0	6.86448145
131869	13822	3	80	240	Con_D3D4	41466	17277.5	2073	41460	82926	248778	14.3989582	3.89000011	5204.00324	0.0724	376.5808	5580.5841	6156.5338	1983	0	0	5.79874182	0	5.79874182
132456	2075	3	80	240	Con_D3D4	6225	2593.75	311	6220	12445	37335	14.3942169	3.89000011	5204.00324	0.0109	56.5334	5260.5367	924.2373	1983	0	0	5.79959917	0	5.79959917
142537	2033	3	80	240	Con_D3D4	6099	2541.25	305	6100	12199	36597	14.4011805	3.86999989	5177.24715	0.0106	55.1044	5232.3515	905.5298	1983	0	0	5.8038969	0	5.8038969
142538	1349	3	80	240	Con_D3D4	4047	1686.25	202	4040	8087	24261	14.3875463	3.86999989	5177.24715	0.0071	36.5646	5213.8117	600.8656	1983	0	0	5.8038969	0	5.8038969
142561	2029	3	80	240	Con_D3D4	6087	2536.25	304	6080	12167	36501	14.3917201	3.89000011	5204.00324	0.0106	55.2802	5259.2834	903.7482	1983	0	0	5.79959917	0	5.79959917
179259	26088	3	80	240	Con_D3D4	78264	32610	3913	78260	156524	469572	14.399632	22.0300007	29471.5146	0.1366	4025.2513	33496.7659	11620.0010	1983	0	0	0	1.04276145	1.04276145
179303	1678	3	80	240	Con_D3D4	5034	2097.5	252	5040	10074	30222	14.4085816	1.38999999	1859.52808	0.0088	16.3360	1875.8640	747.4073	1983	0	0	3.6219399	0	3.6219399

Fuente: Base de datos general de los edificios de igual o más de 4000 m2 de área de implantación ubicados en la Ciudad de Quito, la información fue estructurada en base a la fuente (Kontokosta, 2014)

3.e.- Índice de actividad en el espacio definido como uso primario múltiple.

3.f.- Índice de actividad en el uso primario residencial R2.

3.g.- Índice de actividad en el uso primario residencial R3.

3.h.- Índice de actividad total registrada en los suelos del uso primario contemplados para el presente estudio.

Por lo tanto, la base de datos fue estructurada de acuerdo a la demanda de las variables de diseño que mayor impacto tienen al momento de verificar la factibilidad de un proyecto arquitectónico, y que pueden ser evaluadas y predichas por medio de coeficientes independientes para cada factor, y un índice de eficiencia energética que teóricamente abarcan las características físicas, ambientales y de ocupación más relevantes de la muestra.

En el gráfico 71 se exponen las variables que servirán para determinar la variable dependiente que corresponde al factor de consumo, la cual servirá para establecer peores o mejores desempeños energéticos en el contexto urbano de la ciudad de Quito; a continuación, se define el procedimiento llevado a cabo para tratar la muestra general en sub grupos y clases, para así poder inferir de una manera más precisa los parámetros de las medias muestrales de la población a la cual se está estudiando.

1.1.3.1. Procedimiento para Establecer las Variables Explicativas Categóricas más Relevantes de los Edificios

Para establecer el primer grupo de variables independientes categóricas que describen la muestra de 4841 individuos, se emplea las bases de datos de los archivos shap es y la clasificación propuesta por el Distrito Metropolitano de Quito en el PUOS, se empatan las condiciones establecidas por el “Cuadro N.º 1 Asignaciones de Zonificación Para Edificación y Habitación del Suelo” (Distrito Metropolitano de Quito, 2015), en los vectores correspondientes a las edificaciones.

La información que se transcribe a las capas vectoriales corresponde a la altura máxima, Cos PB y Cos Total; en el gráfico 72 se puede observar las condiciones de habitabilidad para las edificaciones categorizadas como B; por lo tanto, la muestra general será clasificada en 4 subgrupos poblacionales que corresponden a las categorías A, B, C y D; que el marco legal de la ciudad las define como edificios aislados, pareados, continuas y sobre línea de fábrica respectivamente.

Gráfico 72: Ejemplo de Zonificación por la Edificabilidad y la Forma de Ocupación del Suelo de la Categoría B.

EDIFICACION										HABILITACION DEL SUELO	
B PAREADA											
Nº	Zona	Altura Máxima		Retiros			Distancia entre bloques	COS – PB	COS TOTAL	Lote Mínimo	Frete Mínimo
		Pisos	M	F	L	P	M	%	%	m2	m
B1	B303-50	3	12	5	3	3	6	50	150	300	10
B2	B304-50	4	16	5	3	3	6	50	200	300	10
B3	B304-50(PB)	4	16	5	3	3	6	50	200	300	10
B4	B406-60	6	24	5	3	3	6	60	360	400	12
B5	B406-60(PB)	6	24	5	3	3	6	60	360	400	12
B6	B408-60	8	32	5	3	3	6	60	480	400	12
B7	B303-50(PB)	3	12	5	3	3	6	50	150	300	10
B8	B304-50	4	16	3	3	3	6	50	200	300	10
B9	B404-60	4	16	5	3	3	6	60	240	400	12
B10	B404-60	4	16	3	3	3	6	60	240	400	12
B11	B406-60(PB)	6	24	3	3	3	6	60	360	400	12
B12	B305-50	5	20	5	3	3	6	50	250	300	10
B13	B304-60(PB)	4	16	3	3	3	6	60	240	300	10

Fuente: (Distrito Metropolitano de Quito, 2015) “Cuadro N.º 1 Asignación Para Edificación y Habitación del Suelo”

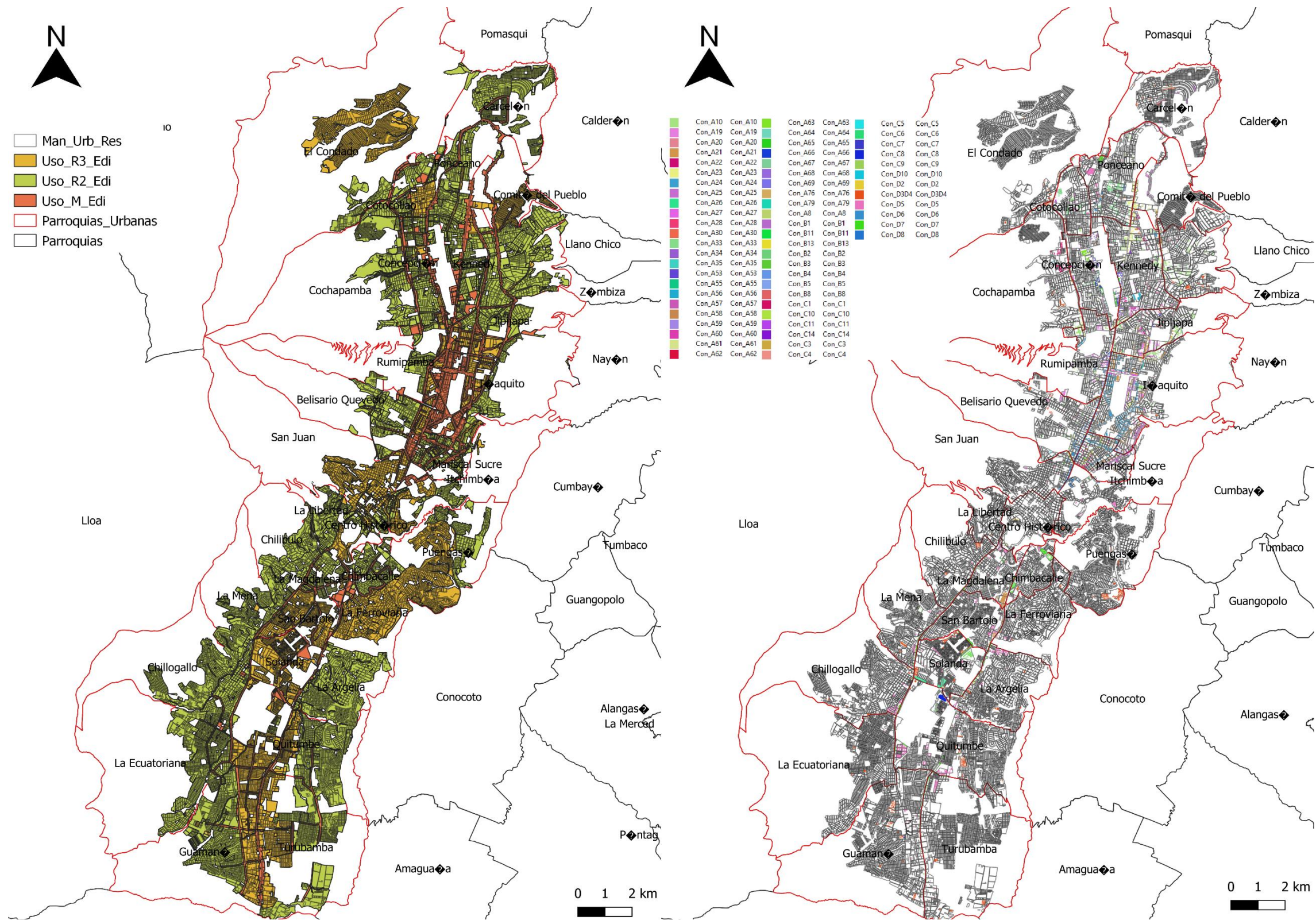
De los 4841 edificios que poseen un área de 4000 m² o superior, 3207 son estructuras que pertenecen a la categoría A, es decir que mantiene “retiros en todas las colindancias; frontal, dos laterales y posterior” (Distrito Metropolitano de Quito, 2015), 159 edificios pertenecen a la categoría B, la cual mantiene “retiros a tres colindancias; retiro frontal, uno lateral y uno posterior” (Distrito Metropolitano de Quito, 2015), y se le es permitido adosarse solamente a una colindancia lateral, 283 inmuebles corresponden a la categoría C los cuales mantienen “retiros a dos colindancias; retiro frontal y posterior” (Distrito Metropolitano de Quito, 2015) y se le es

permitido adosarse a dos colindancias laterales, finalmente 1192 edificios son catalogados como D es decir que “mantendrán solo un retiro posterior y se permite el adosamiento a las colindancias frontal y laterales” (Distrito Metropolitano de Quito, 2015).

En el gráfico 73 se expone dos mapas que manifiestan la distribución espacial de los usos del suelo primario residencial (R2 – R3), y uso múltiple con su respectiva categorización, además se incluye la leyenda que especifica los códigos correspondientes a las asignaciones para la pertinente habitación del suelo, los cuales están organizados en las cuatro categorías antes mencionadas.

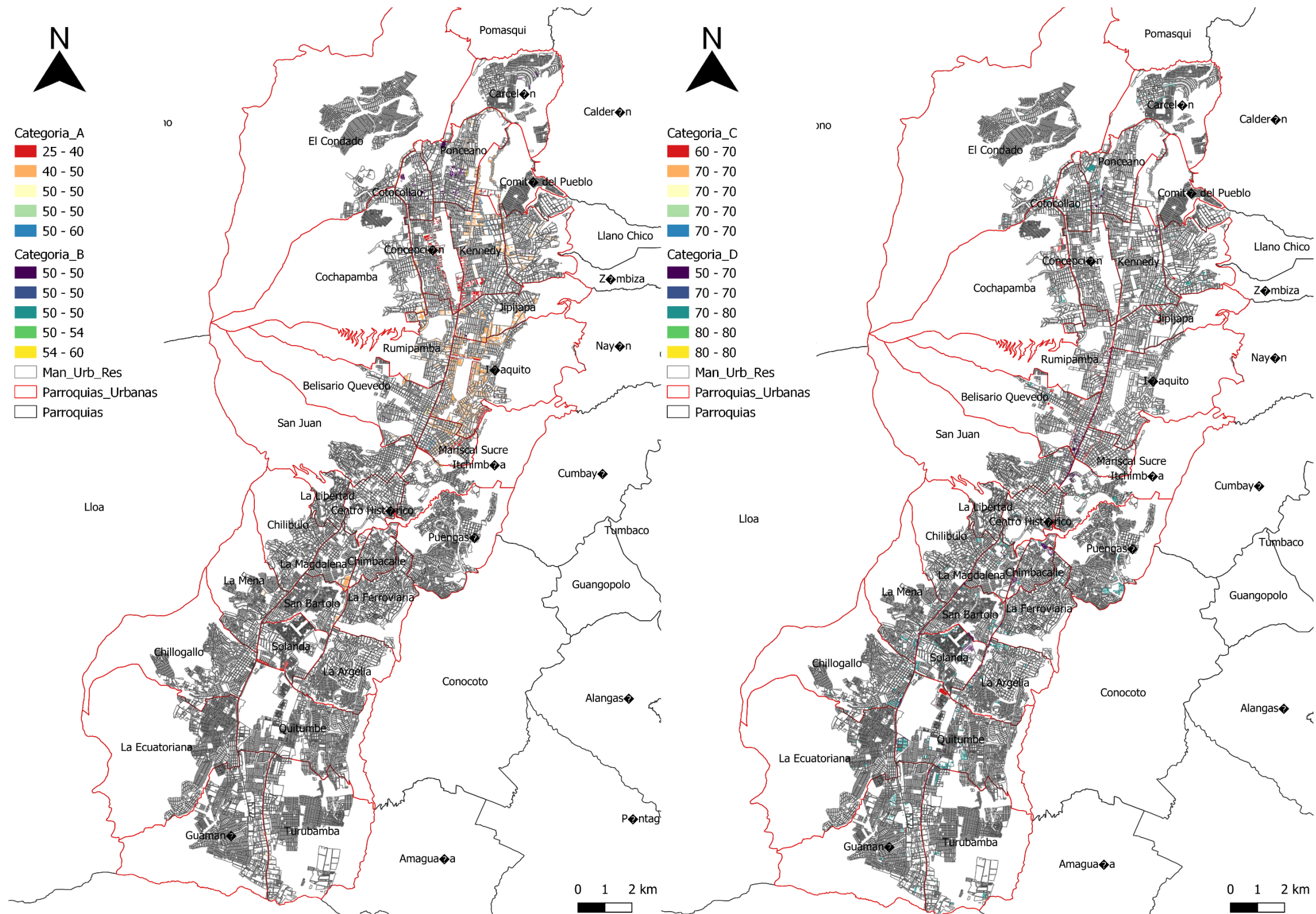
Mediante la técnica de coincidencia multidimensional, se empatan los valores del cuadro representado en el gráfico 72 a cada una de las categorías con su respectivo código, en el gráfico 74 y 75 se puede apreciar los valores correspondientes al coeficiente en planta baja y total de las edificaciones en base a la organización propuesta por el PUOS y también se especifica la altura de las edificaciones para cada una de las categorías en el gráfico 76; para mayor información de los códigos, consúltese esta información en la normativa especificada en la bibliografía.

Gráfico 73: Edificios Según el Cuadro de Asignación del Cuadro 72



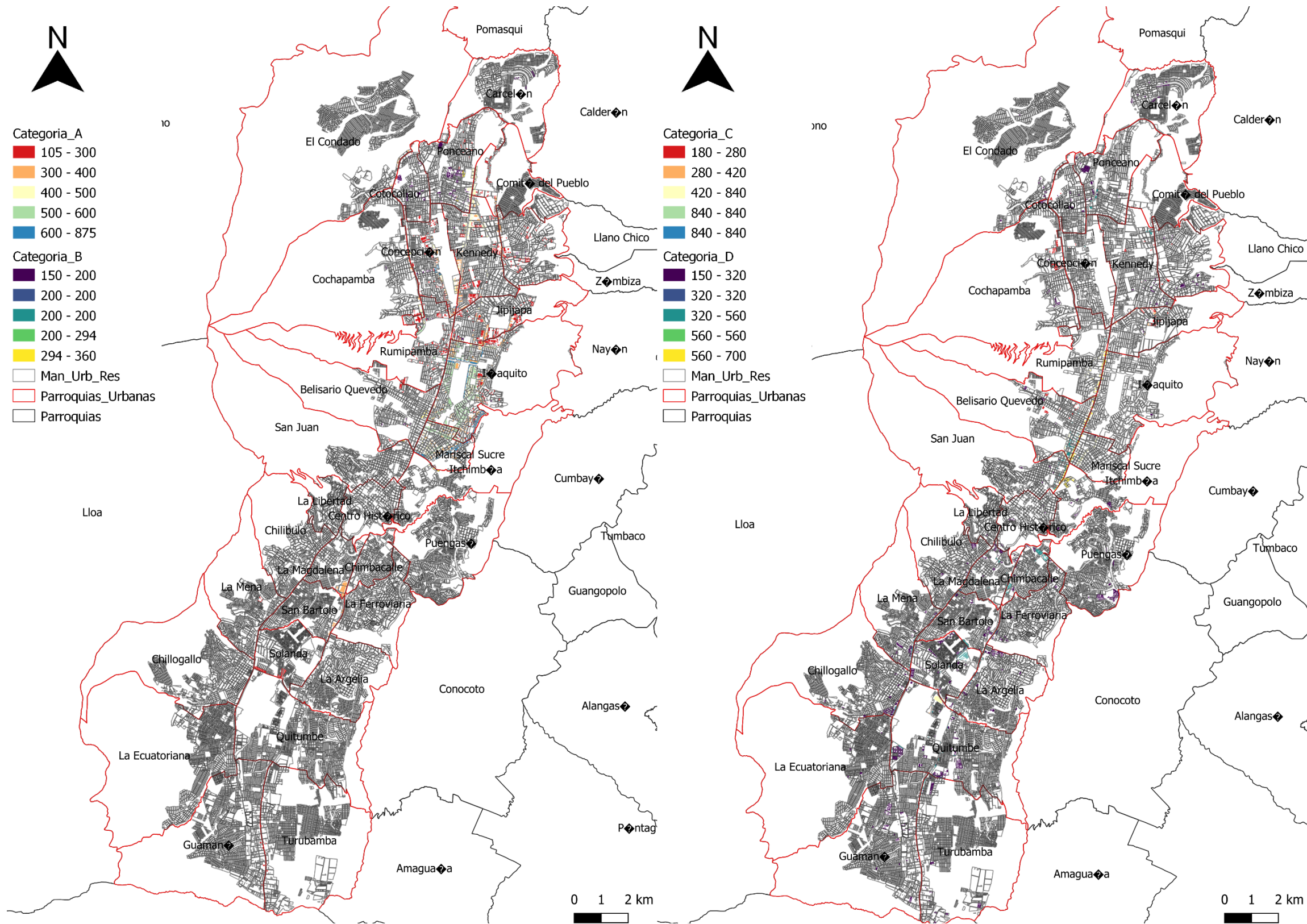
Fuente: Distribución Espacial de los Uso del Suelo (R2-R3) y Múltiple; Asignación de Codificación para las Edificaciones Según el PUOS, Mapa Elaborado en base a la fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 74: Coeficiente de Ocupación del Suelo en Plana Baja



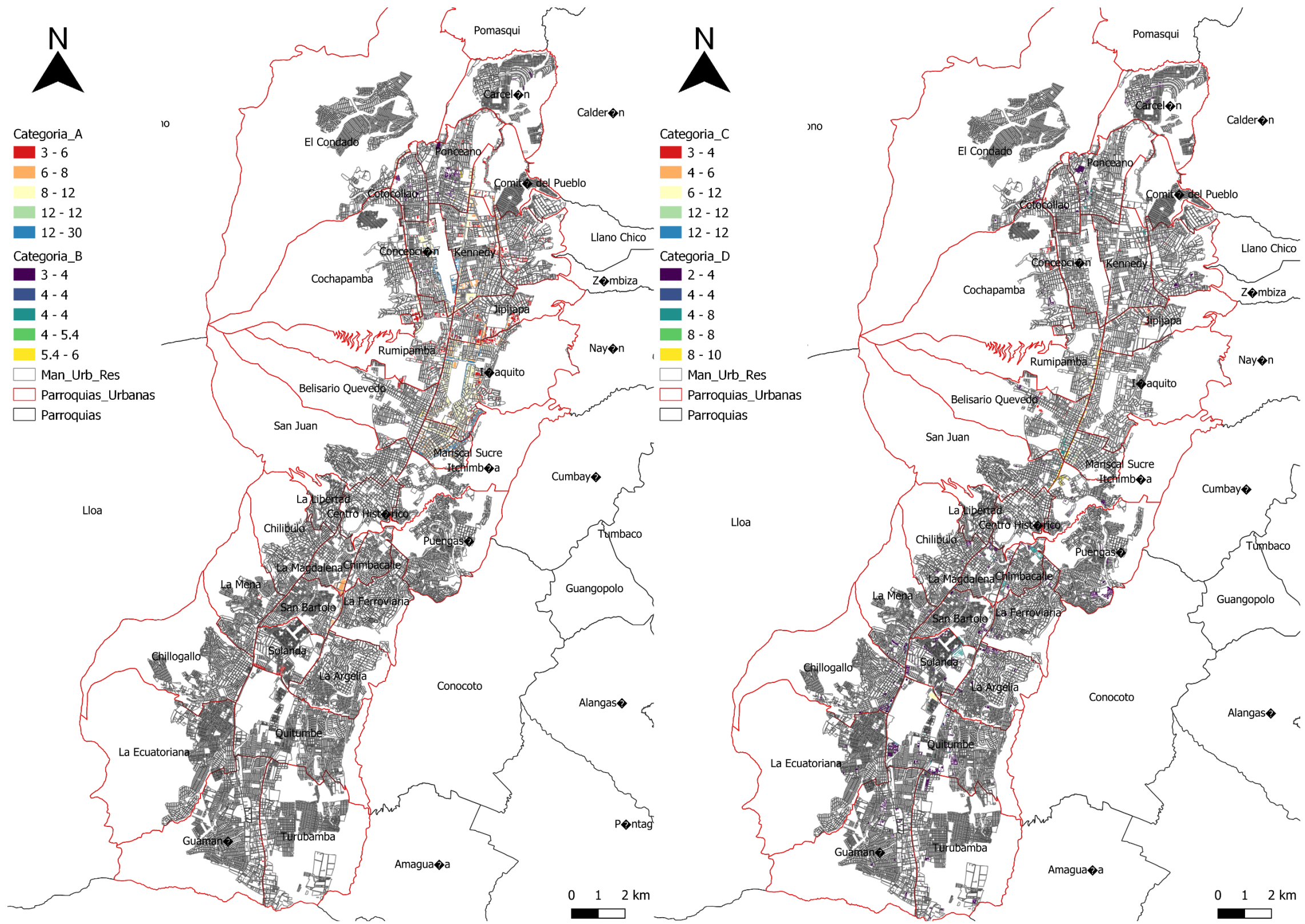
Fuente: Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja de los Edificios en Base a sus Categorías de Habitación, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 75: Coeficiente de Ocupación del Suelo Total



Fuente: Coeficiente de Ocupación del Suelo Total de los Edificios en Base a sus Categorías de Habitabilidad, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 76: Altura de las Edificación en Base a las Categorías



Fuente: Altura de las Edificaciones en Base a sus Categorías de Habitabilidad, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Los valores referentes al coeficiente de ocupación del suelo y número de pisos sirven para determinar otras variables explicativas que podrían tener incidencia en el consumo energético de los edificios, en base al contexto legal establecido en la normativa de la ciudad, para obtener los valores referentes al área útil construida, área del lote, número de parqueaderos, área de subsuelos y área bruta; se tiene que aplicar ciertas reglas de cálculo que sirven para dimensionar estos espacios que estructuran de una manera más detallada la base de datos para gestar el modelo regresivo.

Por ejemplo, para obtener el área útil construida se multiplica los campos del área de implantación de los vectores y el número de pisos, mientras que para encontrar el área del lote que le corresponde a cada edificación se procede a dividir el área de implantación para el coeficiente de ocupación del suelo en planta baja.

Para establecer el número de parqueaderos de cada individuo en la base; se aplica la normativa vigente la cual establece que para comercios que sean mayores o iguales a 1500 m² “se tiene que planificar 1 parqueadero por cada 20 m²” (Distrito Metropolitano de Quito , 2014); es decir que se divide el área sobre 20 y se obtendrá como resultado 75

puestos de estacionamientos, entonces, para establecer el correspondiente campo en la base de datos, a cada polígono de la capa de construcciones se debe dividir su respectiva área útil para 20, obteniendo de esta manera el número de parqueaderos existente en cada una de las edificaciones.

En la resolución No. STHV-RT-02-2015, se especifica que se debe destinar 20 m² para cada parqueadero por lo tanto para encontrar el área de los subsuelos se procede a realizar una regla de tres simple en la cual se usa como referencia el valor propuesto por la resolución pertinente. Finalmente, se suma el valor correspondiente al área útil y el área de los subsuelos para encontrar el valor del área bruta de cada uno de los individuos que conforman la base.

En las variables explicativas y categóricas del primer grupo también se incluyó la edad de los edificios, que corresponde a una base de datos del archivo shape de la página oficial del DMQ, que se titula como “crecimiento_urbano_1760_2015”, cuyos valores clasifican a las edificaciones del distrito metropolitano de Quito en rangos correspondientes a los años de crecimiento urbano de la ciudad. En los gráficos 77, 78, 79, 80, 81, y 82 se exponen los mapas que representan la distribución espacial de las

variables explicativas y categóricas correspondientes al primer grupo.

1.1.3.2.Sesgos de Información

Causados por la Falta de

Representatividad de los

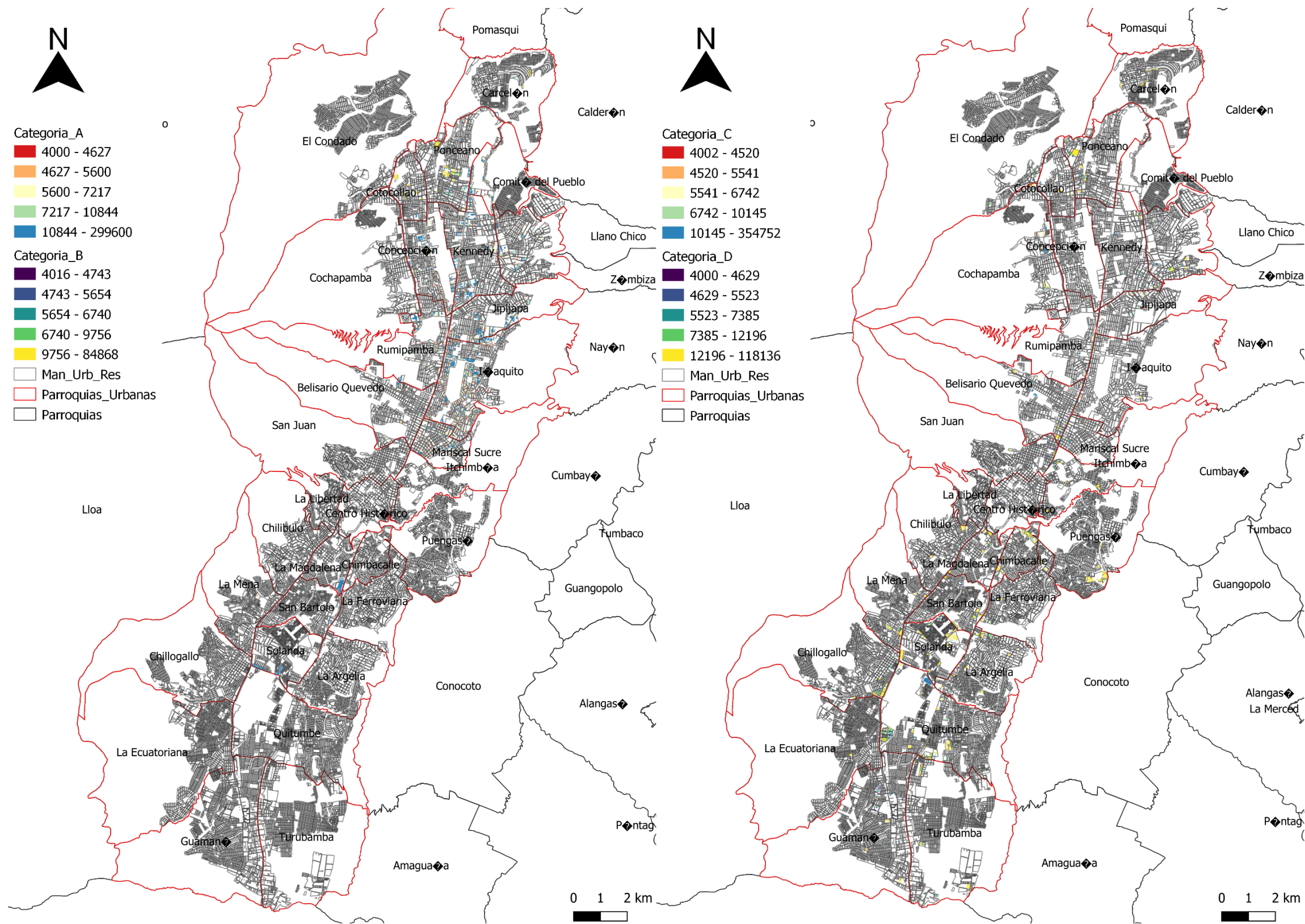
Individuos en las Medias

Muestrales

Cada uno de los 4 subgrupos que conjuntamente forman la muestra general de 4841 edificios, están constituidos por individuos que representan las diferentes condiciones de habitabilidad en base al gráfico número 72, el cual especifica la organiza de las edificaciones en función de las condiciones de coeficientes de ocupación del suelo y el número de pisos; en el mapa representado en el gráfico 73 se constata la codificación atribuida a la clasificación propuesta por el “Cuadro No. 1 de Asignaciones de Zonificación Para Edificación y Habilidad del suelo”.

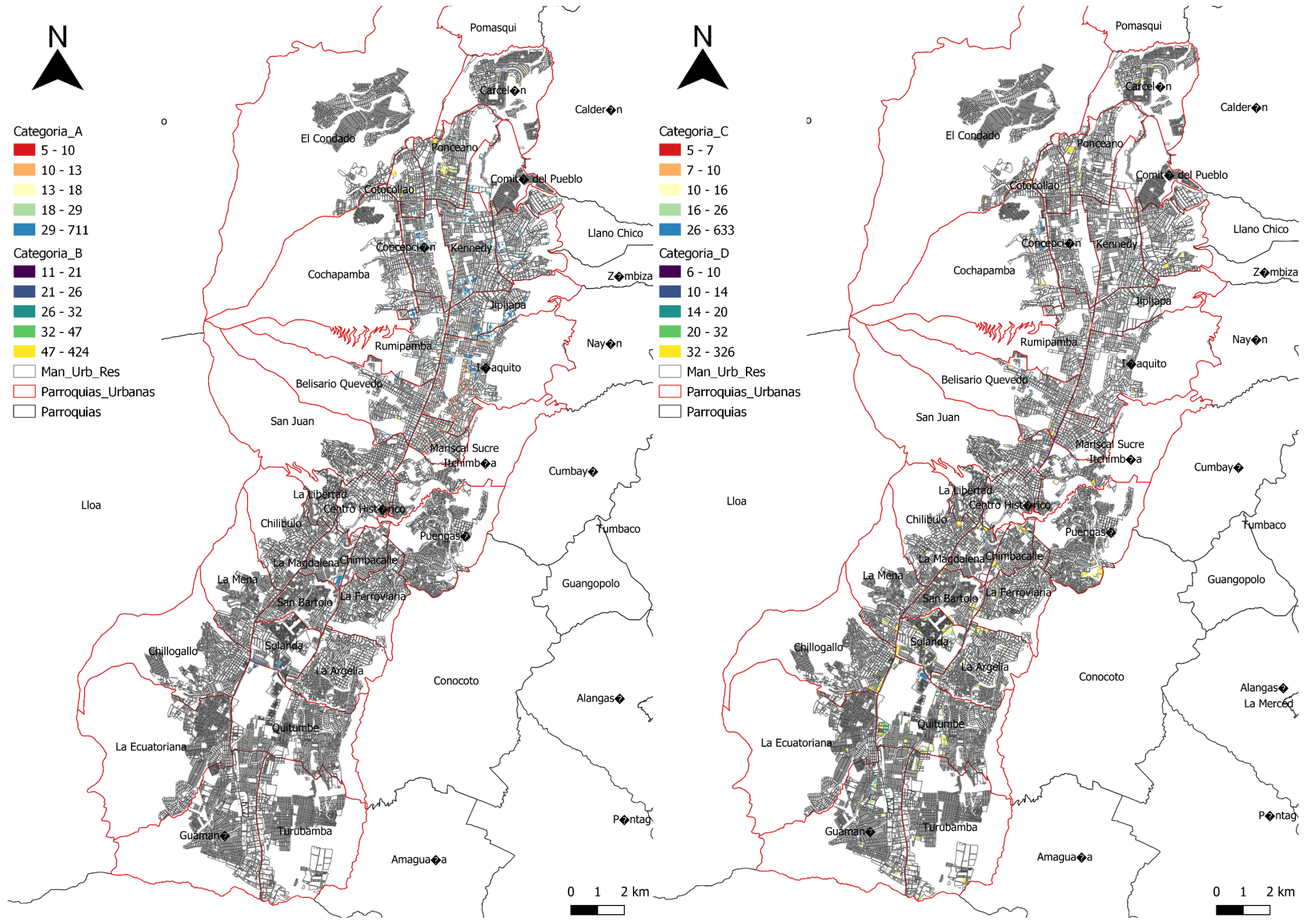
La representatividad de cada una de las subclases que pertenecen a las 4 categorías, supone la delimitación de las medias muestrales con la finalidad de evitar errores causados por una muestra que carece de un número de individuos estadísticamente significativa.

Gráfico 77: Área Útil en Base a la Zonificación del PUOS



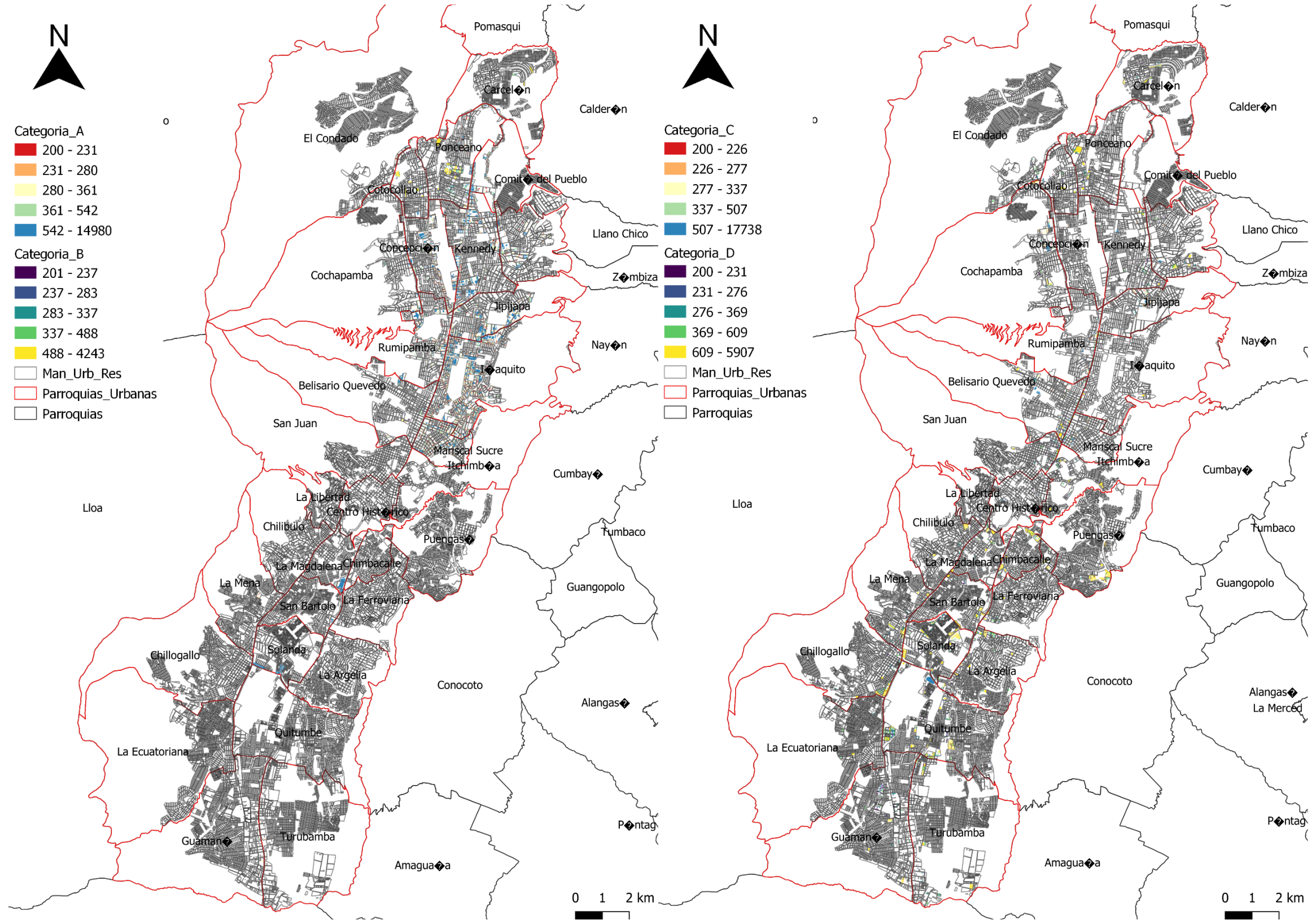
Fuente: Área útil en Base al Cuadro No. 1 de Asignación de Zonificación para Edificación y Habilitación del Suelo, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 78: Área del Lote en Base a la Zonificación del PUOS



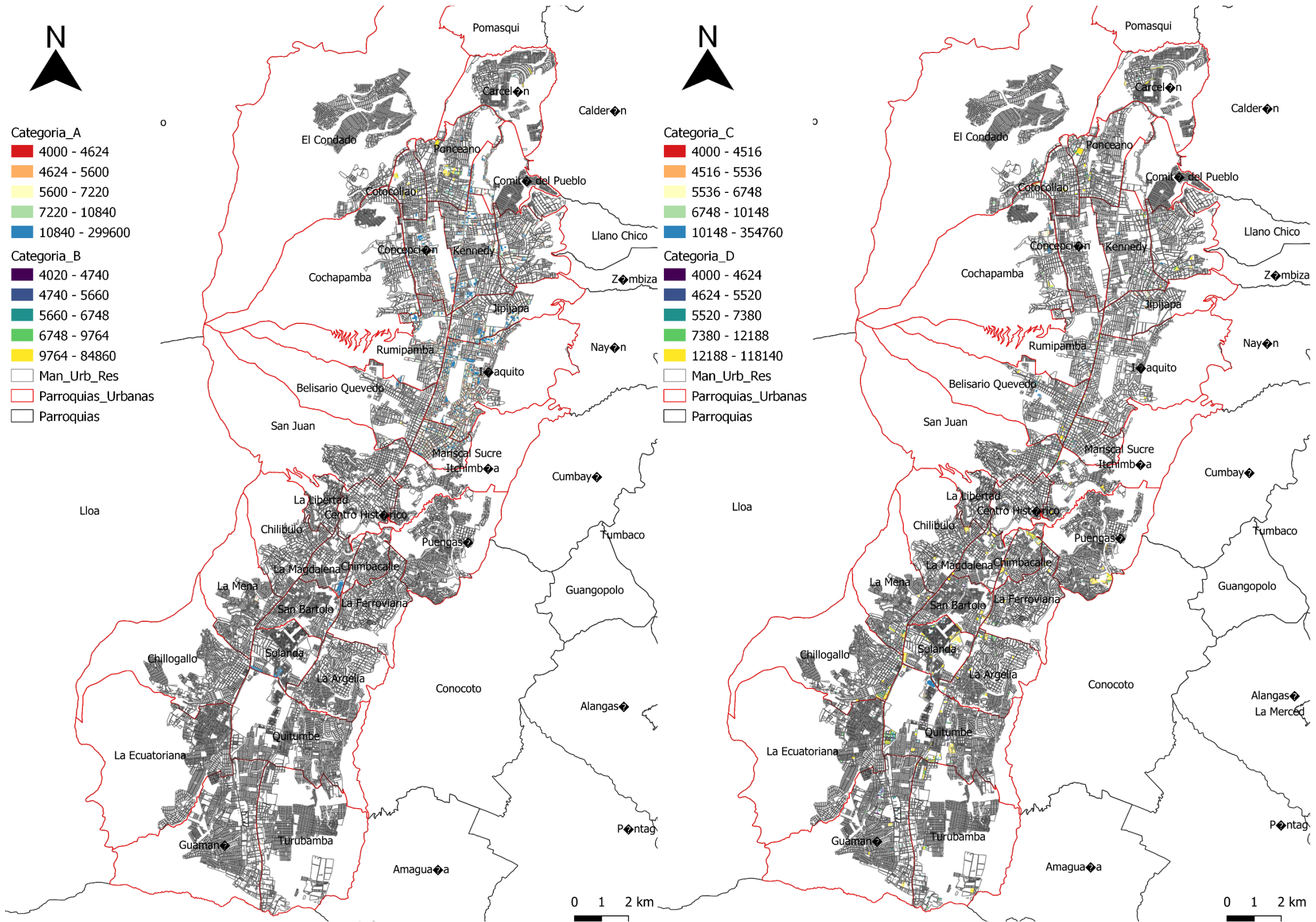
Fuente: Área de los Lotes en Base al Cuadro No.1 de Asignación de Zonificación para Edificación y Habitación del Suelo, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 79: Número de Parqueaderos en Base al Área Útil



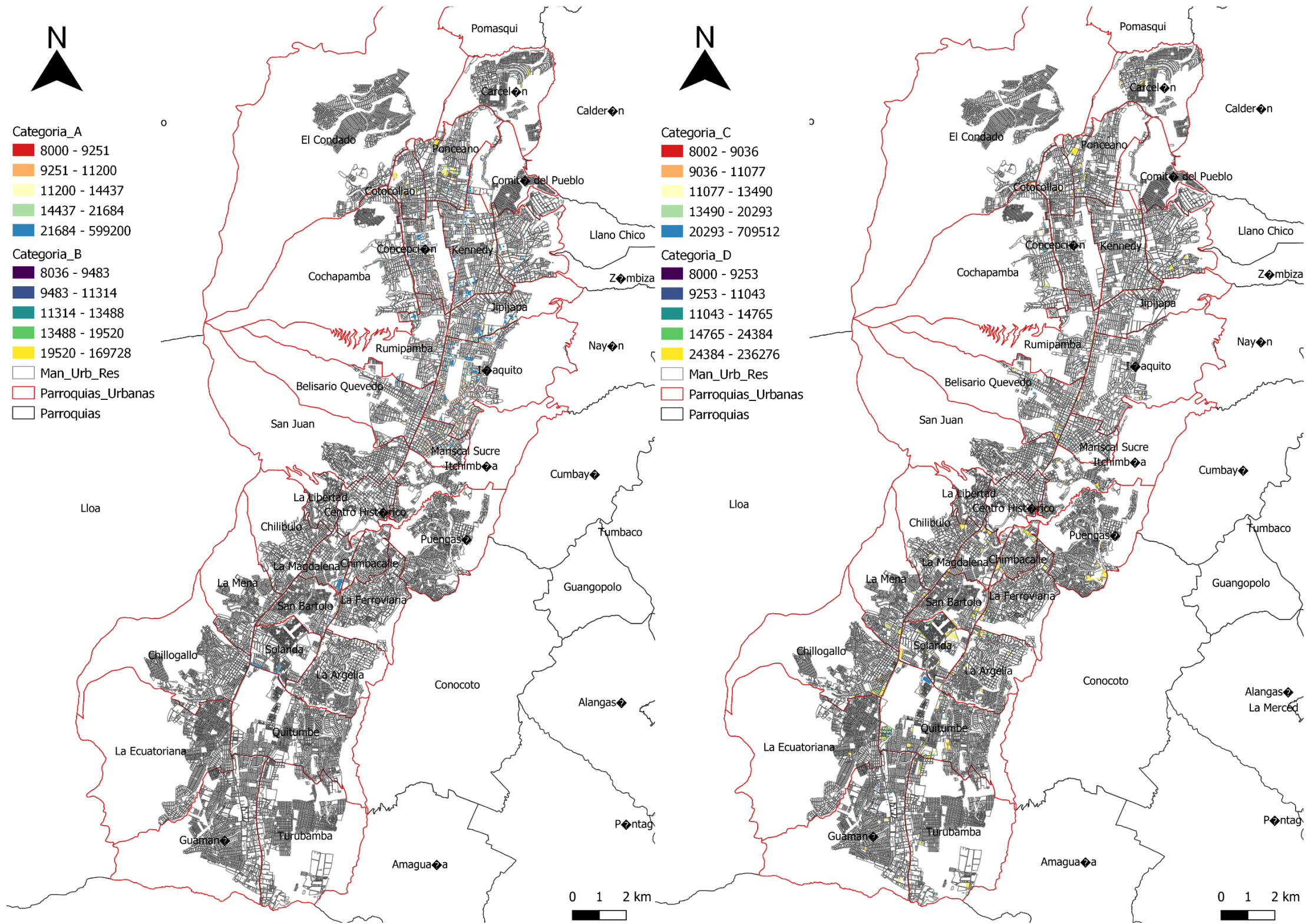
Fuente: Número de Parqueaderos en Base al Área Útil de las Edificaciones Comerciales, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 80: Área de Subsuelos en Base al Número de Parqueaderos



Fuente: Área de Subsuelos en base al Número de Parqueaderos, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 81: Área Bruta



Fuente: Área Bruta Resultante de Sumar el Área Útil Construida Sobre Rasante y el Área de Subsuelos, Mapa Elaborado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Gráfico 82: Años de Crecimiento Urbano de los Edificios

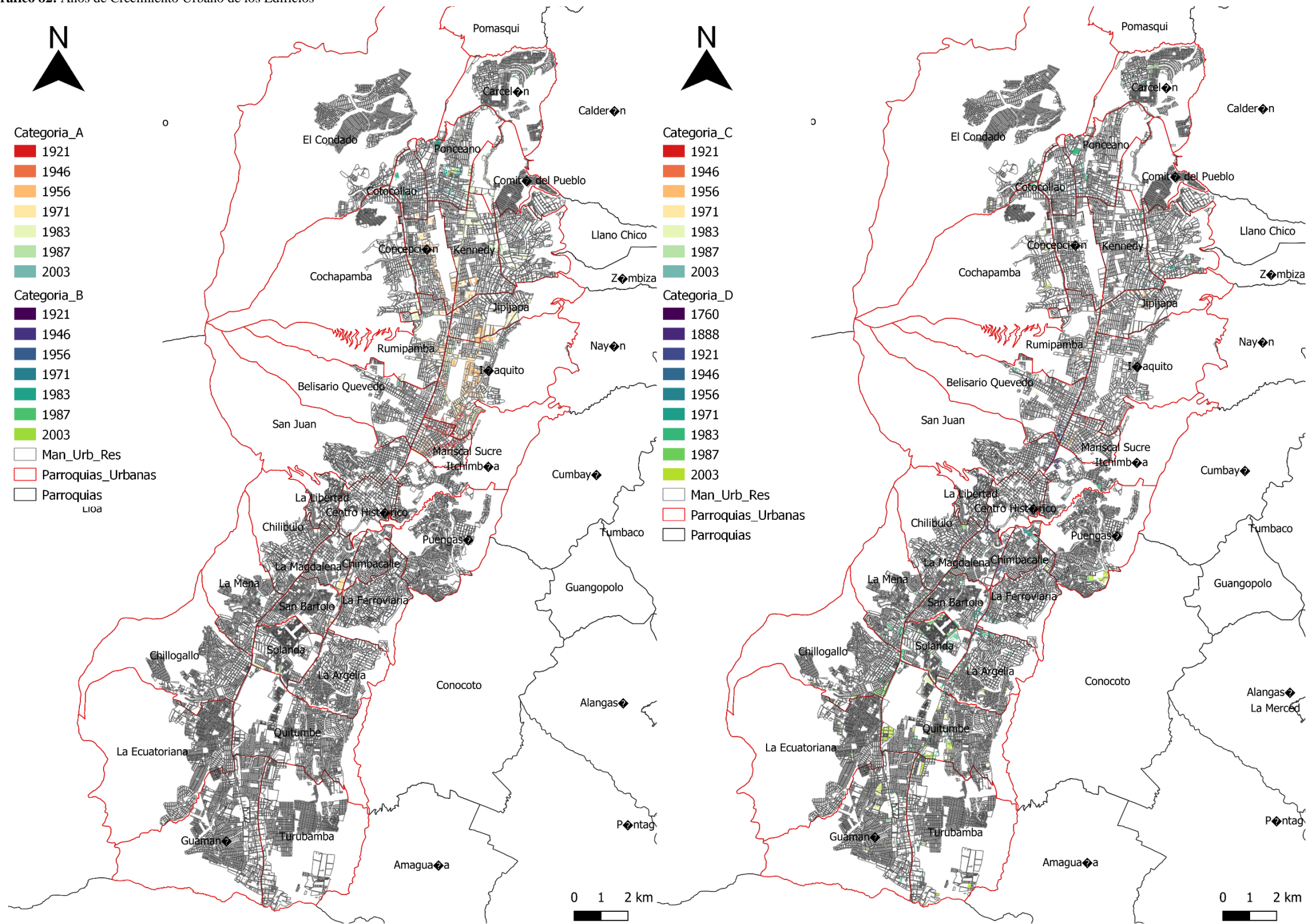


Gráfico 83: Matriz Pareada para Verificar la Representatividad

1760	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	D3D4	
1888	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	D8	x	x	x	
1921	x	x	x	A21	A22	x	A24	x	x	x	x	x	x	x	x	x	C9	C10	D6	x	D8	D7	D8	D3D4		
1946	x	A19	x	A21	x	x	A24	x	A27	x	x	x	x	x	x	x	C8		C10	x	x	x	D7	D8	D3D4	
1956	A10	A19	x	A21	A22	A23	A24	A25	A27	A28	A30	x	A79	B2	x	C4	C7	x	x	C10	D6	D7	D8	x	x	D3D4
1971	A10	A19	A20	A21	A22	A23	A24	x	A27	x	x	A62	x	B2	x	x	x	x	C10	x	D7	D8	x	x	D3D4	
1983	A10	A19	x	A21	A22	A23	A24	x	A27	x	x	x	x	B2	C1	C4	x	C8	x	x	D6	D7	x	x	x	D3D4
1987	A10	x	x	A21	x	x	x	x	A27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	D7	x	x	x	D3D4
2003	A10	x	x	x	x	x	A24	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	D7	x	x	x	D3D4
Pisos	4	6	6	8	8	10	12	12	16	20	8	25	14	4	3	4	6	8	8	12	6	8	10	8	10	3
Similitud	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x		x	0	x	0	0	x	x	x	0	x	x	x	x	x

Fuente: Matriz Pareada de Verificación de Representatividad de las Clases de las Medias Muestrales, Matriz Elaborada en Base a la Fuente (Reed, 2019)

Por ejemplo, la subclase Con_A26 está compuesta por solamente 7 individuos lo que dificulta que la muestra sea significativa al momento de aplicar la técnica OLS, por lo tanto, el modelo corre el riesgo de incluir muchos errores debido que la totalidad de las fluctuaciones de la muestra no serían contempladas ya que estos atributos pasarían a formar parte de los llamados valores atípicos.

Para evitar los errores que los valores atípicos pueden causar, se realizó una matriz pareada en la cual se verificó la representatividad de las subclases de cada una de las categorías, por medio de la comparación entre el año y la repetición de cada subclase durante los periodos de tiempo contemplados en la base de datos del archivo shape titulado “crecimiento_urbano_1760_2015”; y posteriormente se tomó a los edificios que poseen las áreas más grandes.

Por ejemplo, la sub clase Con_A25 está compuesta por 93 individuos, es decir que sería un candidato potencial a ser evaluado por medio de la técnica de cuadrados mínimos, sin embargo, este conjunto de individuos solamente es representativo estadísticamente entre los años de 1946 y 1956 y no posee representatividad en los otros periodos de crecimiento histórico en la ciudad de Quito, sin embargo fue evaluado debido a que son de los edificios que poseen una de las áreas más grandes en la muestra.

En el gráfico 83 se puede verificar la matriz pareada utilizada para delimitar las medias muestrales, lo que trajo como consecuencia que la muestra general de 4841 edificios se reduce a 1984 inmuebles que servirán para gestar el modelo regresivo correspondiente. Las subclases de cada una de las categorías que serán evaluadas son:

Para la categoría A: Con_23, Con_24, Con_25, Con_A27, Con_A28, Con_79.

Categoría C: Con_C1 y Con_C10.

Categoría D: Con_D3D4 y Con_D8.

1.1.3.3.Procedimiento para Establecer las Variables Explicativas de las Condiciones Ambientales

Para definir las variables explicativas relacionadas a las condiciones ambientales y su respectiva respuesta arquitectónica, se gestaron 15 simulaciones en los edificios más representativos de la muestra y sus respectivas subclases, para ello se tomó como marco de referencia las

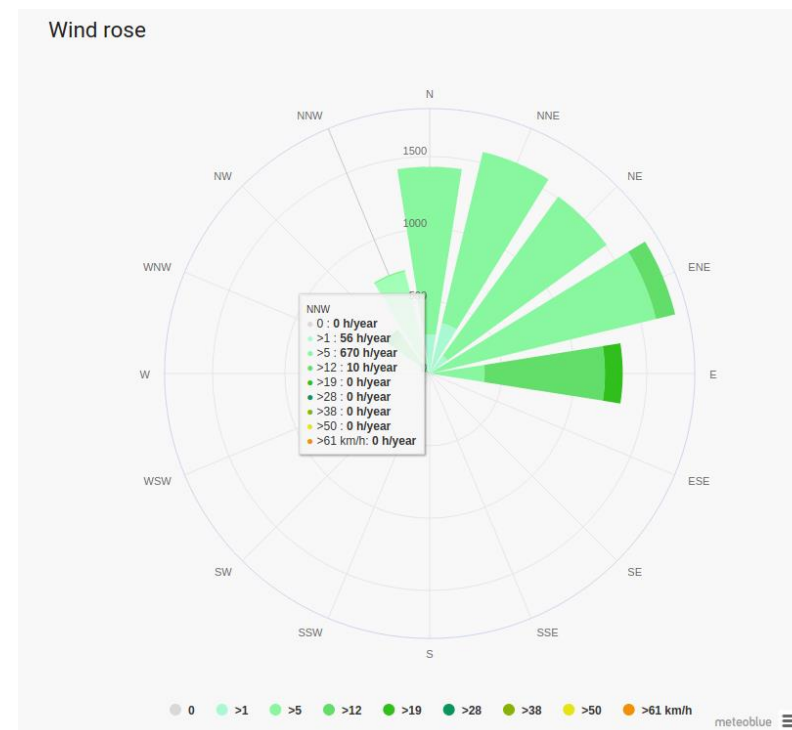
condiciones de entrada estipuladas en el artículo “Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations”, donde se ajusta un túnel de viento de circuito cerrado que poseen unas dimensiones de 1.8 m de alto por 2.0 m de ancho.

Las 15 geometrías referenciales a los edificios de mayor trascendencia en la muestra, fueron elaboradas en un software de código abierto llamado “Blender”; posteriormente se exporta los archivos .stl aplicando una escala de 1/1000, además se establecen las condiciones de flujo turbulento que servirán para condicionar las variables termodinámicas de entrada y su respectiva interacción con la geometría de cada uno de los modelos evaluados, las condiciones propuestas para gestar las simulaciones (CFD) son:

a.- Se ajusta la velocidad del viento y la intensidad turbulenta del flujo en la parte superior del circuito cerrado, cuyo valor corresponde a $U_H = 19.0 \text{ km/h}$ y $I_{uh} = 92\%$; el valor referencial de la velocidad viento se obtiene a partir de los vientos predominantes existentes en la ciudad, en el gráfico 84 se puede observar la rosa de los vientos en la cual

se exponen la dirección y la velocidad de los vientos predominantes en Quito.

Gráfico 84: Rosa de los Vientos de Quito



Fuente: (Basilea, 2020) “Rosa de los Vientos de la Ciudad de Quito”

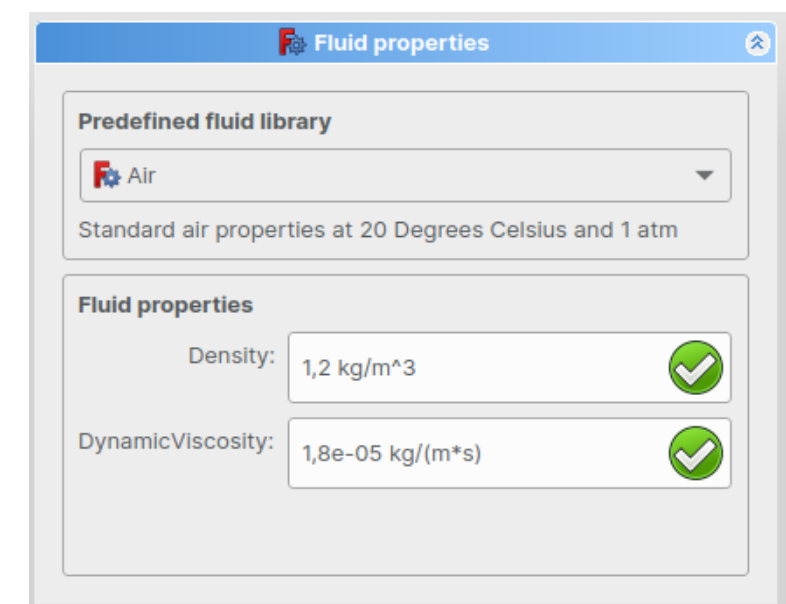
El software que se utilizó para realizar las correspondientes simulaciones se llama “Frecad”, el cual poseen un plugin desarrollado por “oliveroxtooby”; cuyo código fuente puede ser descargado de la plataforma de desarrollo colaborativo GitHub; cabe destacar las ventajas del software libre, los cuales permiten incorporar diferentes características en base a la integración entre diferentes interfaces o por medio de implementos que diversifican las

operaciones de las aplicaciones destinadas al diseño asistido por computadora.

La velocidad del viento, sin embargo, debido ser transformado de km/h a mm/s, por lo tanto, el valor referencia a la velocidad del viento que se ingresó en el sistema fue de 5277 mm/s.

b.- Se establecen las características del flujo de viento relacionadas con la densidad y la viscosidad dinámica, en el gráfico 85 se puede observar las condiciones de entrada que se estandarizaron para el flujo de aire.

Gráfico 85: Condiciones Físicas del Flujo de Viento



Fuente: (Toby, 2020) “Condiciones del Fluido”

c.- Las condiciones de cálculo y el método de estimación de las variables termodinámicas que constituyen los resultados referentes a la transferencia de calor, se pueden observar el gráfico 86; donde se opta por el modelo Large-Eddy-Stedy, este método de cálculo también requiere que se establezcan los ángulos de dirección del flujo para estimar la variación de la corriente; porque cuando existe un cambio en el ángulo de la dirección, lo más probable es que se ha gestado un cambio de temperatura en base a la interacción del flujo de aire sobre la geometría de los edificios testeados.

En el gráfico 87 se puede observar las condiciones de flujo turbulento relacionadas con la dirección, por lo tanto, el algoritmo de cálculo desarrollará las variables termodinámicas resultantes de acuerdo al modelo $(k - \omega)$, es decir que la temperatura será una consecuencia de la energía cinética producida por el fluido y su correspondiente disipación de energía térmica interna.

d.- La temperatura del ambiente también es un requisito para determinar la transferencia de calor en ventanas, paredes y techos; siendo una variable independiente de la temperatura resultante en la superficie de los modelos, la temperatura del ambiente que se estipuló fue de 290 grados

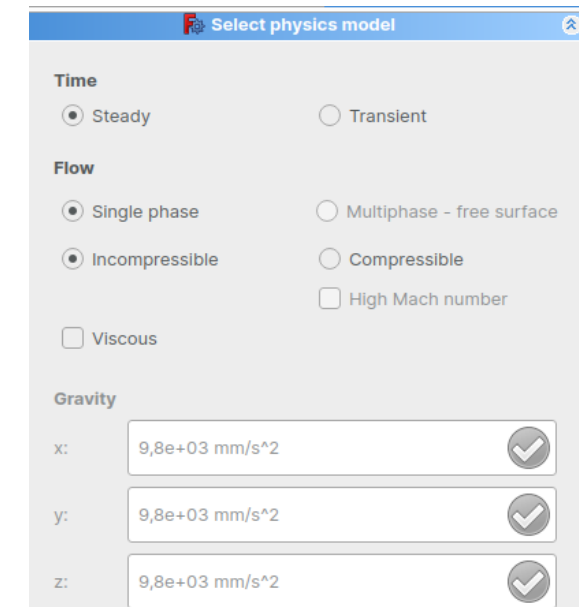
kelvin, es decir 17 grados centígrados; que corresponde a la temperatura promedio de la ciudad.

En el gráfico 88 se expone una gráfica de la temperatura promedio en la ciudad de Quito en un año, y en el gráfico 89 se puede apreciar los datos correspondientes a la temperatura y velocidad del viento que se implementaron el software Freecad.

Cabe recalcar que el plugin desarrollado por oliveroxtober trabaja de forma paralela con el software Openfoam y Paraview; y para determinar la correspondiente transferencia de calor se utilizó una calculadora de conducción de calor, la cual utiliza un método de diferencias finitas para especificar la diferencia de temperatura exterior e interior; este programa fue desarrollado por un usuario de la plataforma de desarrollo colaborativo GitHub, que se hace llamar “rickfu415”.

e.- Finalmente, se necesita especificar cuánto tiempo va a durar las simulaciones y el intervalo para registrar los respectivos cambios termodinámicos en base a las condiciones especificadas con anterioridad, estos parámetros se los puede apreciar en el gráfico 90, siendo el último paso que se requiere para correr las respectivas simulaciones.

Gráfico 86: Modelo Matemático de Estimación



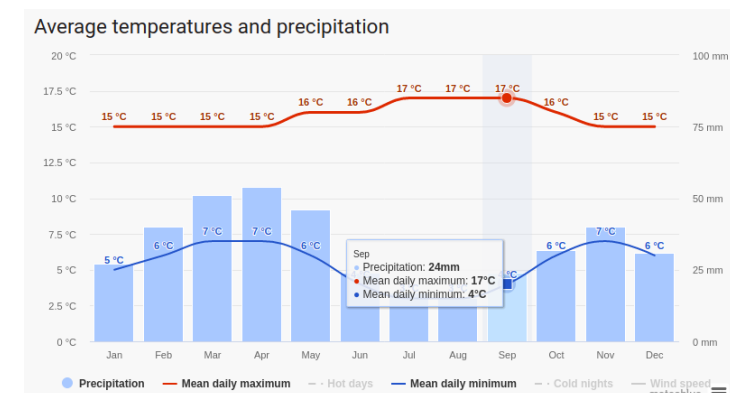
Fuente: (Toby, 2020) “Modelo Large-Eddy-Stedy “

Gráfico 87: Condiciones del Flujo

Property	Value
Thermal	None
Time	Steady
Turbulence	Inviscid
Turbulenc...	kOmegaSST
gx	9800,00 mm/s^2
gy	9800,00 mm/s^2
gz	9800,00 mm/s^2

Fuente: (Toby, 2020) “Condiciones del Flujo Turbulento y Dirección”

Gráfico 88: Temperatura Promedio



Fuente: (Basilea, 2020) “Promedio de Temperatura y Precipitaciones”

Gráfico 89: Temperatura y Velocidad

Property	Value
Pressure	0,00 Pa
Use Inlet ...	false
Ux	5277,00 mm/s
Uy	5277,00 mm/s
Uz	5277,00 mm/s
Thermal	
Temperat...	290,00 K
Use Inlet ...	false

Fuente: (Toby, 2020) "Temperatura del Ambiente y Velocidad del Viento"

Gráfico 90: Intervalos de Tiempo

Property	Value
Solver	
Input Cas...	case
Parallel	true
Parallel C...	4
Time Step Control	
End Time	15,00 s
Time Step	1,00 s

Fuente: (Toby, 2020) "Intervalos de Tiempo para el Cálculo de Variables"

Para determinar las variables correspondientes al factor de consumo, el gasto estimado de los equipos (HVAC), y el uso total de energía en el edificio, se procede a usar como marco de referencia la metodología y las ecuaciones estipuladas en el artículo titulado "A Concept for Energy-Efficient High-Rise Buildings in Hanoi and a Calculation Method for Building Energy Efficiency Factor".

El factor de consumo se lo obtiene aplicando la ecuación expresada en el gráfico número 38, la cual consiste en gestar una sumatoria de los valores resultantes de la

transferencia de calor en ventanas, techos y paredes del modelo 3D; cabe recalcar que el número de simulaciones realizadas fueron 30, ya que uno de los requisitos que se estipula en la metodología propuesta por el autor Pham Thi Hai Ha, es dividir la transferencia de calor total del modelo no optimizado para la sumatoria de la transferencia de calor del modelo del edificio óptimo.

Es decir, que las simulaciones fueron gestadas en un modelo 3D del edificio sin elementos de protección para mitigar la transferencia de calor y también, en un segundo modelo que contempla diferentes respuestas arquitectónicas para mejorar el desempeño energético en función de las variables ambientales, para ello se aplicó los consejos que se explicaron en el marco teórico correspondiente a "Recomendaciones para el Factor de Eficiencia Energética en los Edificios".

El factor de consumo es de vital importancia porque facilita el pre dimensionamiento y diseño de los equipos de climatización y también es la base que sirve para determinar un gasto estimado de los equipos (HVAC) y el uso total de energía en un edificio, en la norma vietnamita y en la ASHRAE, se estipula que se puede alcanzar una estimación

bastante cercano a la realidad si se multiplica el factor de consumo por el consumo per cápita del inmueble; obteniendo de esta manera el gasto de los equipos mecánicos en las edificaciones.

Finalmente, el uso total de energía en un edificio es resultado de sumar el consumo per cápita del edificio más el gasto estimado de los equipos (HVAC); la variable correspondiente al consumo per cápita del inmueble se la obtiene multiplicando la densidad de individuos en el edificio por el consumo anual per cápita registrado en la provincia de Pichincha que es de "1337,79 kWh/hab" (ARCONEL Agencia de Regulación y Control de Electricidad , 2017).

Al final del capítulo IV del presente trabajo, se especifican los 15 edificios testeados más representativas de la base, mientras que los resultados obtenidos una vez aplicada las simulaciones de (CFD) se exponen en el capítulo V correspondiente a Conclusiones y Resultados. Los efectos termodinámicos que se determinaron en base a las 30 simulaciones sirvieron como base para interpolar los valores del parámetro a los demás individuos de la muestra en base al uso de la tabla Z, la cual especifica las características de las

medias muestrales cuando el número de individuos es menor a 30.

**1.1.3.4. Procedimiento para
Establecer las Variables
Explicativas de
Ocupación y Actividad
Gestada en los Edificios
Aplicación del Índice de
Shannon-Wiener**

Las tablas de datos correspondientes a la densidad poblacional de la ciudad se establecen en bits de información una vez que se rasterizan las capas vectoriales enmarcadas en los usos del suelo (R2 – R3) y uso múltiple, entonces los valores establecidos en cada pixel de información se los empata con el vector que pertenece a una determinada edificación, obteniendo de esta manera la densidad de individuos que existe en los edificios contemplados en este estudio.

Cabe recalcar que el número de individuos por km² en las áreas correspondientes a los usos primarios no fueron contemplados en la base de datos final, pero son de vital importancia para desarrollar el índice de Shannon-Wiener

cuya formula está representada en el gráfico número 43, el proceso consistió en:

1.- Una vez identificado el número de todos los individuos (N), se procede a obtener la proporción de individuos o abundancia relativa, que consiste en clasificar el número de individuos por especie (ni), y dividir dicho valor para (N), de esta manera obtendremos el valor de (pi), es importante recalcar que las especies corresponde a los tipos de usos del suelo existentes en la zona de estudio.

2.- Se extrae el logaritmo neperiano de (pi), resolviendo de esta manera parte de la fórmula que establece (Lnp_i), o también expresado en otras bibliografías como (log₂pi).

3.- Los valores que son resultado de aplicar el logaritmo neperiano se los debe multiplicar para para la abundancia relativa, es decir que se ejecuta la siguiente expresión: (pi * log₂pi); este proceso debe ser realizado de manera individual para cada uno de los usos primarios.

4.- Finalmente se aplica la sumatoria de los resultados de aplicar la expresión (pi * log₂pi).

En el gráfico 91 se expone los resultados correspondientes a la complejidad urbana, donde se toma como referencia que 4 puntos son el mínimo que garantiza un cierto grado de organización en el sistema urbano, es decir que existe un número suficiente de actividades que garantizan una mayor entropía en términos de información y minimiza la entropía proyectada en el entorno.

Si los resultados alcanzan los 6 puntos se estima una media de entre 70 a 100 actividades de diferente índole que se desarrollan en una determinada localización geográfica. Para establecer el grado de actividad en las edificaciones se aplica la técnica de coincidencia multi dimensional, en la cual se empatan los valores de los pixeles de información obtenidos al aplicar la fórmula de Shannon-Wiener con los vectores correspondientes a las edificaciones que serán evaluadas en el modelo regresivo.

Las compacidad absoluta es un índice complementario de la expresión de Shannon-Wiener, cuya expresión consiste en dividir el volumen del edificado para la unidad de superficie, mientras más altos sean los resultados se sostiene que existe una “proximidad de componentes que conforman la ciudad, reuniendo en un espacio más o menos

limitado los usos y funciones urbanas” (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010).

La estimación del índice de compacidad absoluta consiste en un proceso de validación del índice de complejidad de Shannon-Wiener, cuyos resultados se plasmaron en la base de datos final que sirvió para aplicar el modelo regresivo.

Cabe recalcar que para estimar los índices de complejidad y compacidad se incluyó al uso del suelo primario correspondiente a equipamientos, debido que existe una directa correlación en base a la influencia de la proporción del área y proximidad con la misma.

1.2.Construcción del Modelo Regresivo y Estimación del Factor de Consumo

La estimación del factor de consumo energético en base al uso de la técnica (OLS) consiste en aplicar una serie de procedimientos con la finalidad de evitar errores al momento de determinar el respectivo índice, mediante el uso de la herramienta de programación orientada a objetos llamado Python se procede a gestar el modelo regresivo.

El primer paso consiste en cargar las correspondientes librerías las cuales cumple diferentes funciones, por ejemplo, matplotlib y seaborn tienen como finalidad facilitar por medio de gráficas la visualización de datos, y gracias a estos módulos se procederá a construir mapas de calor y una matriz de dispersión.

Los cálculos relacionados a la construcción del modelo estadístico usarán la biblioteca sklearn y la evaluación del correspondiente modelo se gestará por medio del paquete statsmodels, mientras que otros módulos como es el caso de pandas, numpy y scipy son de vital importancia para calcular ciertas métricas.

Las librerías facultan el proceso de importar y explorar la base de datos, además de verificar que no existan vacíos en la base, ya que estos pueden producir errores en la estimación del correspondiente índice; se establece como index a la columna titulada “fid”, y al conjunto general de datos los convertimos en valores de tipo “float”; es decir que establecemos un peso numérico que puede ser interpretado por el ordenador.

Cada nombre de las columnas fue resumido con la finalidad de facilitar el cómputo final, aspecto que muchas

veces se ve afectado a causa de usar nombres muy extensos, los nombres de los encabezados de cada columna de la base de datos no está en clave, por lo tanto, son fáciles de entender e interpretar a que se refieren, salvo el caso del número de pisos, variable categórica que se aplicó la técnica dummy para convertirla en una variable de tipo numérica, el número de pisos paso a llamarse PiX1, PiX2 y así sucesivamente.

1.2.1. Verificación de la Perfecta Multilinealidad

Los modelos regresivos gestados por medio de la técnica (OLS) tienen ciertas reglas y supuestos que deben cumplir, y uno de ellos sostiene que en el arquetipo no debe existir multicolinealidad, es decir que las variables explicativas no deben estar altamente correlacionadas entre sí.

Los problemas que pueden surgir debido a los efectos de la multicolinealidad corresponden a una perspectiva matemática, ya que la “estimación de los coeficientes en sí tienden a ser poco fiables” (Reed, 2019), mientras que los “errores estándar de los coeficientes se inflan artificialmente” (Spiegel, 1970). Los errores estándar son utilizados para

Gráfico 91: Estimación del Índice de Shannon Wiener



Fuente: Estimación del Índice de Shannon-Wiener en los Usos del Suelo (R2-R3) y Uso Múltiple, Mapa Elaborado en Base a los Mapas Referenciales de a la Fuente (Agencia Ecológica Urbana de Barcelona , Diciembre 2010)

estimar los valores P, por lo tanto, una desvaloración de los errores estándar conduce a una “mayor probabilidad de que concluyamos incorrectamente que una variable no es estadísticamente significativa” (Reed, 2019).

Para ejemplificar de una manera más sencilla los efectos negativos de la multicolinealidad en los modelos regresivos se propone la siguiente situación, donde se pide que identifique quién es el mejor cantante entre un grupo de personas que cantan al unisonó; la tarea se complica ya que distinguir al mejor cantante sería una tarea bastante complicada debido a la uniformidad del sonido.

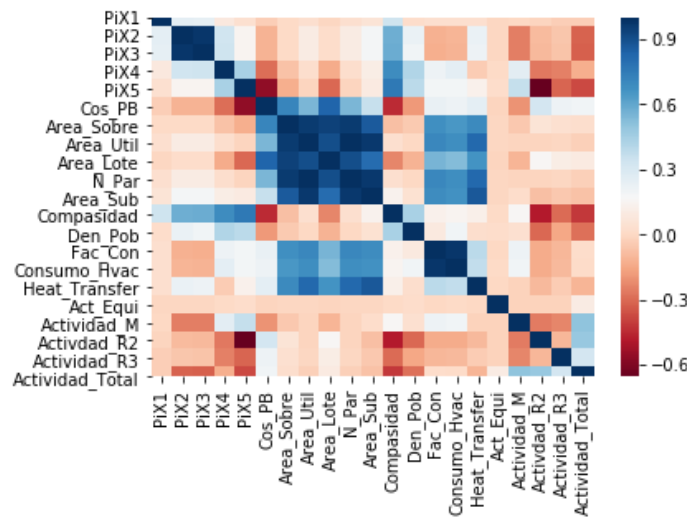
Sin embargo, lo que es despreciable son los altos grados de correlación que existente entre las variables, y para verificar el grado de correlación entre variables se aplica el (VIF)³⁹, un factor que tiene como finalidad cuantificar la intensidad de multicolinealidad en un modelo regresivo, aquellas variables altamente correlacionadas entre sí son eliminadas, con la finalidad de evitar redundar en el modelo de estimación del factor de consumo energético.

³⁹ VIF: Variance Inflation Factor (Factor de Inflación de la Varianza).

1.2.1.1. Aplicación del Factor de Inflación de la Varianza

Para estimar el grado de correlación entre variables se procede a realizar una matriz de correlación, dicha matriz se representada en el gráfico número 92 como un mapa de calor, en la cual se puede identificar dos tonalidades, una azul y una roja; la correlación negativa está representada con un color rojo cuya tonalidad aumenta conforme el grado de correlación se incrementa, mientras que el color azul representa la correlación positiva entre variables.

Gráfico 92: Mapa de Calor del Grado de Correlación



Fuente: Mapa de Calor de Correlación entre las variables (Reed, 2019)

La diagonal de la matriz está coloreada con un azul intenso debido a que la asociación entre variables da como

resultado 1, esto se debe a la comparación pareada entre sí siempre da como resultado 1, entonces, los recuadros que presenten una coloración más oscura deben ser eliminados, por ejemplo, la variable “Area_Sobre” y “Area_Util”, son candidatos a ser eliminados,

Pero la eliminación de variables no es tan simple como eso; se requiere ser más sistemáticos al momento de hacerlo; para ello existe un método que se conoce como factor de inflación de la varianza, que se define como una “medida de cuanto contribuye una variable en particular al error estándar en el modelo de regresión” (Reed, 2019); por lo tanto si la multicolinealidad es alta, el (VIF) será desproporcionado.

En estadística se recomienda que si una “variable regresa con un valor de 5 o más debe ser eliminada del modelo” (Reed, 2019). En el gráfico 93 se representa los resultados del (VIF) calculado para cada una de las variables que intervienen en nuestro modelo, donde el número de pisos PiX2 y PiX3 no son eliminados del sistema porque estos representan a una variable numérica de tipo categórica y por

lo tanto no afecta al resto de variables que ostentan valores un poco mayores a la unidad; en el gráfico 93 se puede apreciar los valores del (VIF) de cada una variables sin haberlas sometido al proceso de eliminación las cuales están representadas en la parte superior, mientras que los valores del (VIF) una vez depuradas las variables con altos niveles de multicolinealidad se las representa en la parte inferior.

Gráfico 93: Estimación del VIF Para Cada Una de las Variables

```

const      5.064682e+01
PiX1      1.877172e+00
PiX2      2.547538e+01
PiX3      2.679785e+01
PiX4      4.265222e+00
PiX5      5.605923e+00
Cos_PB    9.462270e+01
Area_Sobre      inf
Area_Util      inf
Area_Lote      1.816601e+02
N_PaH      7.612211e+06
Area_Sub      inf
Compañidad      1.779195e+01
Den_Pob      2.085211e+00
Fac_Con      4.408720e+01
Consumo_Hvac      3.907615e+01
Heat_Transfer      9.369397e+00
Act_Equi      inf
Actividad_M      inf
Actividad_R2      inf
Actividad_R3      inf
Actividad_Total      inf
dtype: float64

DATA AFTER
-----
const      33.000483
PiX1      1.082447
PiX2      24.991442
PiX3      24.930863
PiX4      1.764560
PiX5      2.331549
Cos_PB    1.956676
Den_Pob    1.399545
Fac_Con    1.631478
Heat_Transfer      1.548822
Actividad_Total      1.336698
dtype: float64

```

Fuente: Calculo del Factor de Inflación de la Varianza y su Respectiva Depuración del Sistema, elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019)

1.2.2. Estadística Descriptiva de la Base de Datos

La finalidad de estimar la estadística descriptiva de la base de datos es encontrar valores atípicos los cuales pueden afectar el rendimiento de nuestro modelo, por lo tanto,

explorar los datos en base algunas métricas, es de vital importancia para evitar los sesgos en el modelo, para ello se agregaron 3 desviaciones estándar por encima y por debajo de la estimada en base a la muestra, con la finalidad de identificar en base a las medias muestrales los edificios que podrían representar errores.

Los individuos que representan valores atípicos en la base general de datos pueden ser eliminados gracias a los módulos numpy y scipy; para ello tomamos como referencia que todos aquellos individuos que representen 3 desviaciones estándar superior a la media deban ser eliminados, en el gráfico 94 se representa los valores atípicos que fueron eliminados.

Gráfico 94: Estimación de los Valores Atípicos

```

Int64Index([ 1,  8,  9, 10, 13, 19, 20, 22, 23, 24,
...
1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984],
dtype='int64', name='Registro', length=222)

```

Fuente: Eliminación de Valores Atípicos de la Muestra n=222 (Reed, 2019)

1.2.3. Construcción del Modelo

Una vez que se ha descartado las variables que poseen una alta tasa de multicolinealidad y se han eliminado los valores atípicos que pueden representar errores que se gestaron al momento de construir la muestra, se puede

empezar a construir el modelo regresivo para determinar el factor de consumo energético en los edificios de la ciudad de Quito.

En primer lugar, se requiere definir las variables explicativas y la variable dependiente que corresponde al factor de consumo, posteriormente se dividen los datos en un conjunto de entrenamiento y prueba; se recomienda que es óptimo establecer en un 20% para prueba y el 80% restante para entrenamiento, pero para el desarrollo de este modelo se ha establecido una proporción de 30%-70%.

Una vez ajustado los datos al modelo se procede a explorar la salida, es decir la estimación de los coeficientes para cada una de las variables explicativas, en el gráfico 95 se puede identificar los coeficientes estimados para cada una de las variables contempladas en el estudio.

La intercepción corresponde a la variable dependiente cuando todas las variables independientes son 0, entonces, el modelo es capaz de definir el cambio estimado para la variable dependiente cuando existe un cambio de unidad en esa variable independiente en particular, por lo tanto, cuando todas las variables independientes son 0, se atribuye que el factor de consumo energético es de 0,2425, pero si

mantenemos todas las variables independientes como constantes a excepción del número de pisos podemos atribuir lo siguiente; que cuando se aumenta 1 piso a un determinado inmueble el factor de consumo aumentará en 0,28 puntos.

Gráfico 95: Estimación de los Coeficientes en el Modelo

```
The intercept for our model is -0.2425
-----
The Coefficient for PiX1 is 0.28
The Coefficient for PiX2 is -0.072
The Coefficient for PiX3 is -0.27
The Coefficient for PiX4 is 0.26
The Coefficient for PiX5 is 0.31
The Coefficient for Cos_PB is 0.0001
The Coefficient for Den_Pob is -0.0018
The Coefficient for Heat_Transfer is 8.8e-06
The Coefficient for Actividad_Total is 0.0048
```

Fuente: Estimación de Coeficientes para la Estimación del Factor de Consumo Energético, Elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019)

Entonces, gracias a la estimación de los pertinentes coeficientes se puede gestar predicciones, en el gráfico número 96 se puede apreciar la estimación del factor de consumo para los primeros 5 edificios de la base de datos.

Gráfico 96: Estimación del Factor de Consumo para 5 Edificios de la Muestra

```
array([[ 0.35182696],
       [ 0.14060552],
       [ 0.32066478],
       [-0.06133127],
       [ 0.24211819]])
```

Fuente: Estimación del Factor de Consumo, Tomando como Referencial el Estudio de la Fuente (Reed, 2019)

1.2.4. Evaluación del Modelo

El módulo de Python statsmodel sirve para verificar que el modelo propuesto de optimización funcione, la evaluación del arquetipo básicamente consiste en asegurar

que se cumplan todos los requisitos que debe obedecer la técnica OLS, estas formalidades son:

a.- Los residuos de la regresión deben estar distribuidos normalmente.

b.- Los residuos son homocedásticos, es decir la varianza de los errores es constante.

c.- Ausencia de Multicolinealidad, aspecto que ya lo hemos determinado con antelación.

d.- No debe haber autocorrelación.

1.2.4.1. Verificando la Existencia de Heterocedasticidad

La ausencia de heterocedasticidad es uno de los requisitos que nuestro modelo debe cumplir, la heterocedasticidad se entiende a los errores estándar de una variable, los cuales son evaluados durante un cierto período de tiempo y no son constantes.

Para ejemplificar los efectos de la heterocedasticidad se toma como ejemplo el consumo de los hogares en función de los ingresos, por lo tanto, el gasto de cada hogar dependerá

del grado de ingresos que se tenga, aspecto cuya variabilidad es fluctuante, es decir que los hogares que poseen un mayor número de ingresos gastaran su dinero en un conjunto más amplio de artículos, mientras que los hogares con ingresos más bajos solo enfocaran el gasto en los productos de la canasta básica, entonces, “esto resulta en errores estándar que cambian sobre los niveles de ingresos” (Reed, 2019).

Por lo tanto, en base a la ejemplificación anterior, los problemas que le heterocedasticidad pueden acarrear en el modelo regresivo son los siguientes:

1.- Se ha demostrado que la heteroscedasticidad no “causa un sesgo en las estimaciones de coeficientes” (Spiegel, 1970), pero si afecta a la precisión de los mismos, entonces, aumentan las probabilidades “que las estimaciones de los coeficientes estén más alejados del valor correcto de la población” (Reed, 2019).

2.- La heterocedasticidad produce que los valores P sean más pequeños de lo que realmente son, este efecto se debe al aumento de la varianza en las estimaciones de los respectivos coeficientes, y lamentablemente la técnica OLS no es capaz de detectar este desfaz. Por lo tanto, los valores-t y los valores-f están “utilizando una cantidad subestimada de

la varianza” (Reed, 2019), si esto llega a pasar se dice un coeficiente “es estadísticamente significativo cuando en realidad no lo es” (Reed, 2019).

1.2.4.2. Testo de Heterocedasticidad en el Modelo Regresivo

El módulo de Python stats.diagnostic. sirve para comprobar la existencia de heterocedasticidad; para ello se hace uso de algunas funciones de prueba para evaluar el modelo regresivo propuesto. Para diagnosticar la existencia de heteroscedasticidad se usaron las pruebas de Breusch-Pagan y White, siendo la primera más general mientras que la segunda verifica por caso.

En este punto es donde las pruebas de hipótesis juegan un papel trascendental, se considera que la hipótesis nula tanto para la prueba White y la prueba Breusch-Pagan, significa que la varianza de los errores es la misma. Mientras que la hipótesis alternativa se traduce que los errores de la varianza no son iguales.

La variable más conflictivas en el modelo corresponde al grado de actividad que existe en cada una de las edificaciones testeadas, es decir que el consumo

energético está en función al grado de actividad existente, aspecto que podría ocasionar heteroscedasticidad en el modelo regresivo, para evitar este problema se hace uso del índice de Shannon-Wiener, el cual normaliza los valores en base a un rango de actividad; aspecto que resulta fundamental para obtener homocedasticidad en el arquetipo de predicción del factor de consumo. En el gráfico número 97 se puede verificar los resultados de validación del modelo, donde se expone que no existe heteroscedasticidad.

Gráfico 97: Validaciones del Modelo Regresivo

```
0.2576751200142712 0.25762403976866305
-----
For the White's Test
The p-value was 0.2577
We fail to reject the null hypothesis, so there is no heteroscedasticity.

0.06523833976828881 0.065066220869715
-----
For the Breusch-Pagan's Test
The p-value was 0.06524
We fail to reject the null hypothesis, so there is no heteroscedasticity.
```

Fuente: Prueba de Breusch-Pagan y Prueba de White, Referencial a la Fuente (Reed, 2019)

1.2.4.3. Verificación de Autocorrelación

Se considera autocorrelación a una característica que presentan las bases de datos, donde la correlación entre valores se basa en objetos relacionados, violando de esta manera el “supuesto de independencia de instancia, que subyace a la mayoría de los modelos convencionales” (Reed, 2019).

Numéricamente se establece que la autocorrelación subyace a una serie de números que presentan “un patrón tal que los valores de la serie pueden predecirse en función de los valores anteriores de la serie” (Reed, 2019).

Cuando existe autocorrelación en una base de datos se entiende “que los errores estándar calculados y los valores p, puedan ser engañosos” (Spiegel, 1970), entonces el modelo no es lo suficientemente sólido para ser utilizado en la predicción de valores.

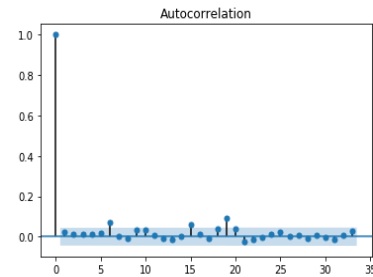
Para testar la autocorrelación en la base usamos la prueba Ljung-Box, utilizada para verificar la autocorrelación existente entre los residuos, gracias a esta prueba podemos concluir dos aspectos relacionados a nuestros residuos, los cuales subyacen en la aleatoriedad o no de los mismos.

Entonces, eso significa que debemos dejar de rechazar la hipótesis nula y procurar que los valores p sean pequeños, en el gráfico número 98 podemos observar el gráfico de autocorrelación, el cual además se especifica que se ha logrado rechazar la hipótesis nula y se especifica el valor p más pequeño de la muestra, el gráfico de autocorrelación se lo obtiene gracias al módulo statsmodels.graphics.

Gráfico 98: Gráfico de Autocorrelación

The number of lags will be 10

The lowest p-value found was 0.05662
We fail to reject the null hypothesis, so there is no autocorrelation.



Fuente: Gráfico de Autocorrelación en el Cual se Rechaza la Hipótesis Nula, Proceso Elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019)

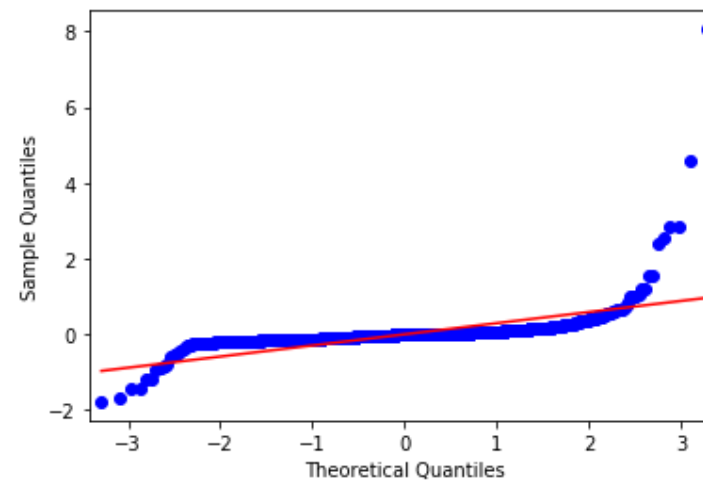
1.2.4.4. Verificación de la Distribución Normal de los Residuos

Esta prueba es solamente una comprobación visual, en la cual verificaremos la distribución teórica de los datos, donde su disposición debe estar dispuesta de tal forma que los valores rodeen a la línea, cabe recalcar que es poco probable que los datos coincidan o se ajustan a la línea, por lo tanto, es un tanto subjetivo.

En el gráfico número 99 se puede apreciar la distribución teórica de los datos pero también, en la imagen se especifica que la media de los residuos es cercano a 0, cabe recalcar que en estadística se busca que el valor sea 0, aunque es muy poco probable que el resultado sea exactamente 0 debido a problemas de redondeo, en el caso del modelo de

optimización desarrollado para predecir el consumo energético de los edificios en base regresiones obtuvimos una media igual a 1.616×10^{-13} .

Gráfico 99: Distribución Teórica de los Residuos

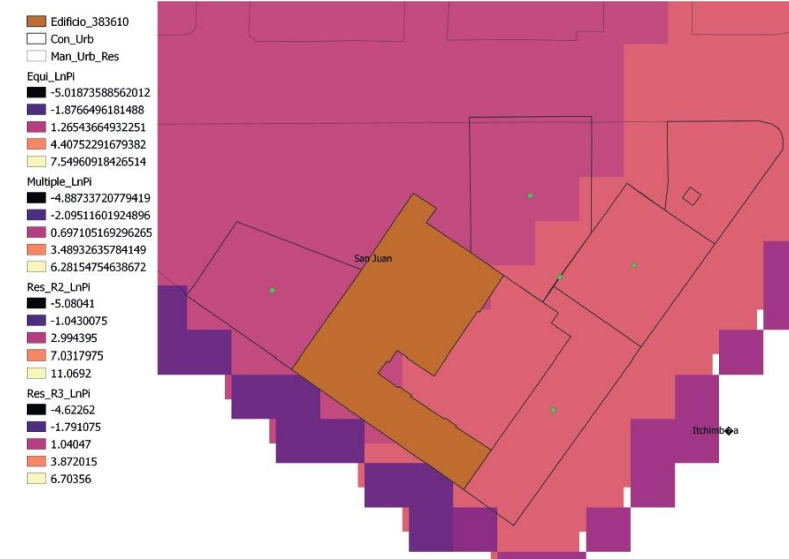


The mean of the residuals is 1.616×10^{-13}

Fuente: Distribución Teórica de los Residuos igual a 1.616×10^{-13} , Elaborada en Base a la Fuente (Reed, 2019)

Gráfico 100: Edificios Testeados 383610 y 384322

1.- Edificio Fid = 383610



2.- Edificio Fid = 384322



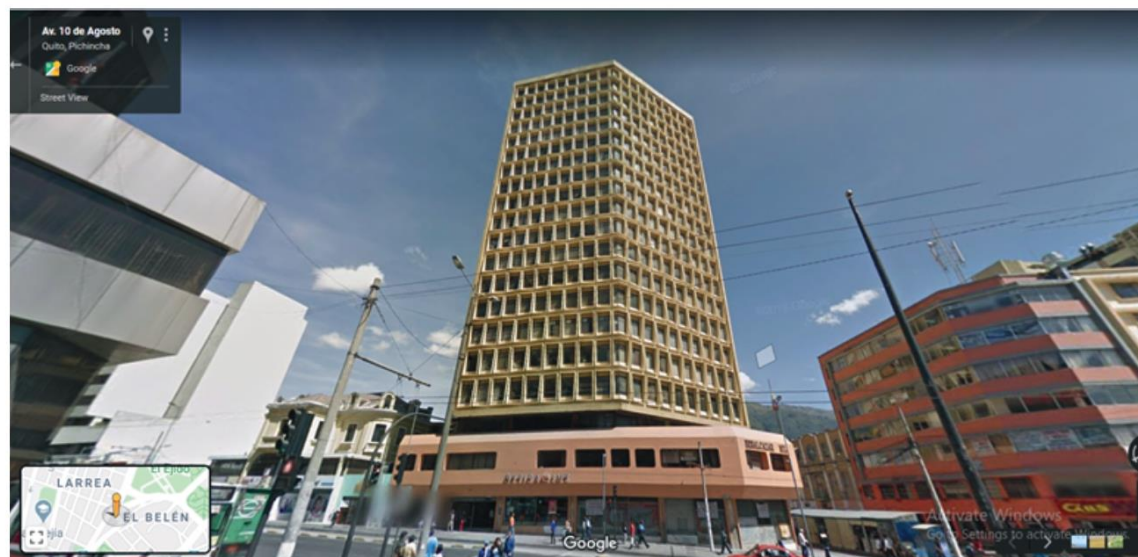
Fuente: Edificio Testeados 383610 y 384322 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 101: Edificios Testeados 85749 y 384337

3.- Edificio Fid = 85749



4.- Edificio Fid = 384337



Fuente: Edificios Testeados 85749 y 384337 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 102: Edificios Testeados 50185 y 86198

5.- Edificio Fid = 50185



6.- Edificio Fid = 86198



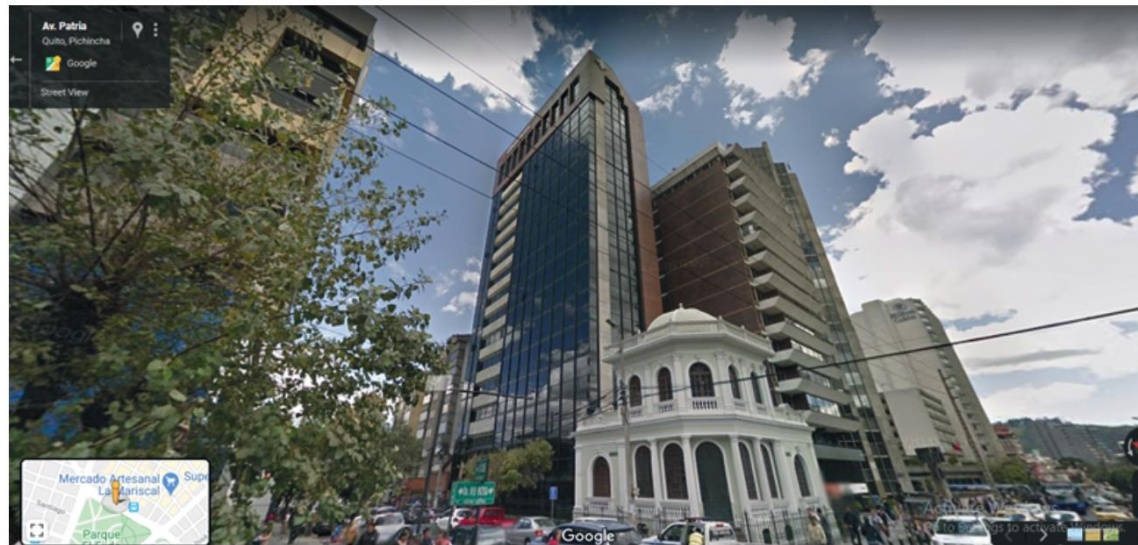
Fuente: Edificios Testeados 50185 y 86198 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 103: Edificios Testeados 50379 y 50365

7.- Edificio Fid = 50379



8.- Edificio Fid = 50365



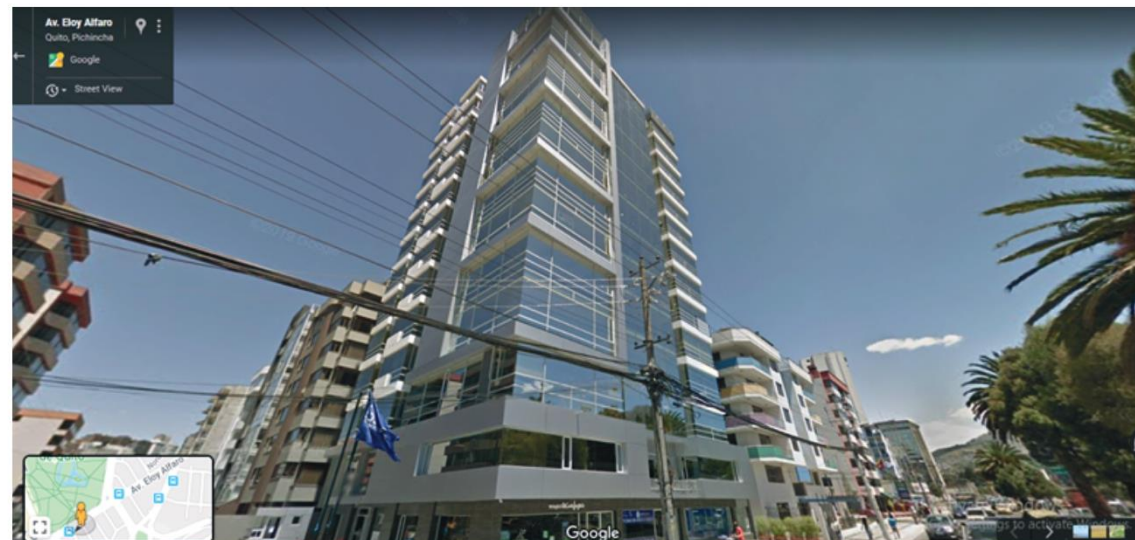
Fuente: Edificios Testeados 50379 y 50365 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 104: Edificios Testeados 59149 y 46738

9.- Edificio Fid = 59149



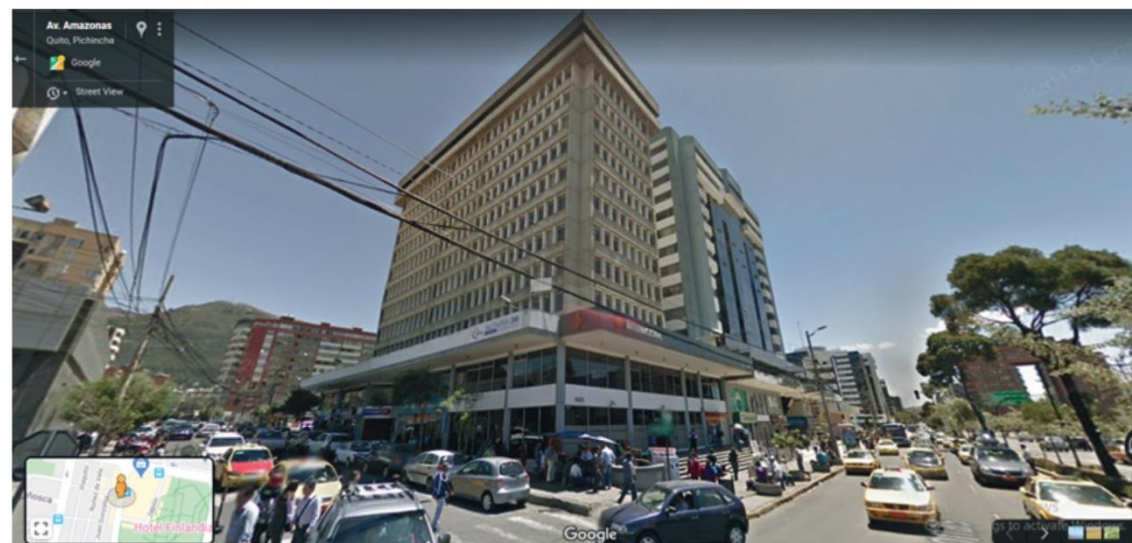
10.- Edificio Fid = 46738



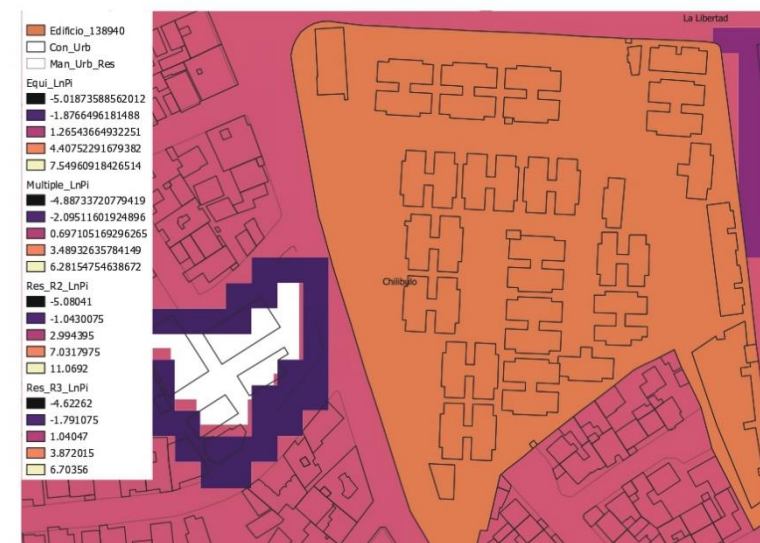
Fuente: Edificios Testeados 59149 y 46738 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 105: Edificios Testeados 46751 y 138940

11.- Edificio Fid = 46751



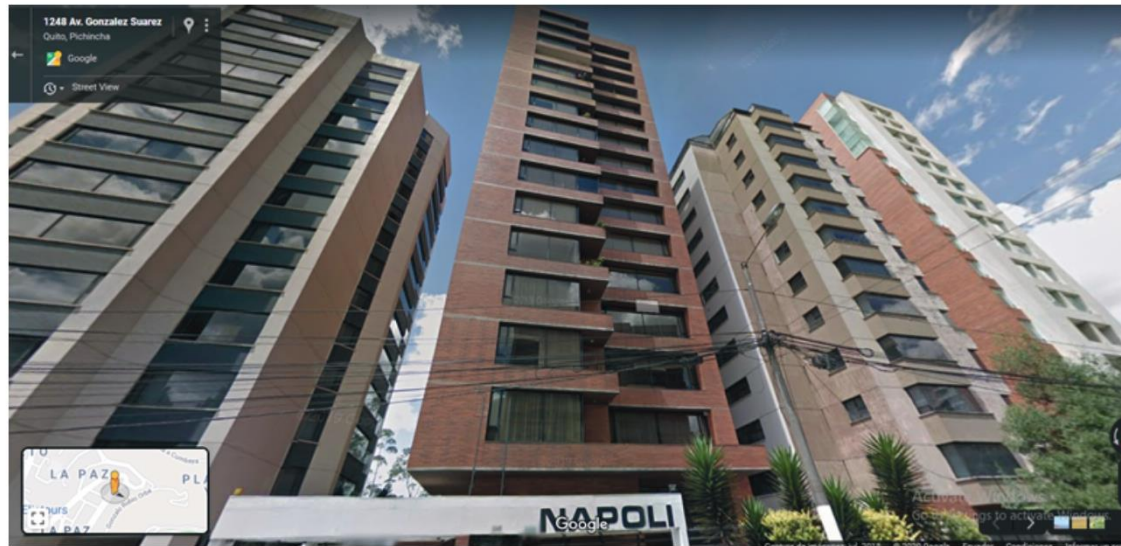
12.- Edificio Fid = 138940



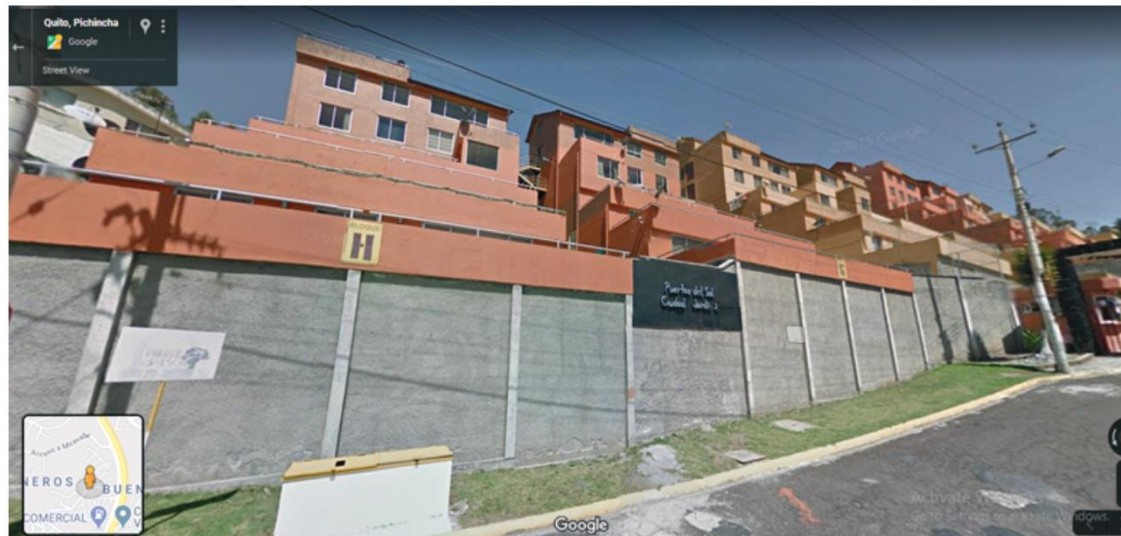
Fuente: Edificios Testeados 46751 y 138940 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 106: Edificios Testeados 50017 y 239336

13.- Edificio Fid = Napoli / 50017



14.- Edificio Fid = 239336



Fuente: Edificios Testeados 50017 y 239336 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificadas en la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 107: Edificios Testeados 46963

15.- Edificio Fid = 46963



Fuente: Edificio Testeado 46963 de Acuerdo a las Condiciones de Entrada Especificada en la Fuente (Bandi, 2013)

Capítulo IV

Análisis de Resultados Y Aplicación del Método

1.1. Estimación del R Cuadrado e Interpretación del Modelo de Optimización

El R-cuadrado es una forma de medir la precisión del ajuste en la determinación de los coeficientes para las correspondientes predicciones, es decir que tan bien se acoplan los datos al modelo regresivo, se entiende que a mayor sean el R-cuadrado, más preciso será el modelo.

En el gráfico número 97 se demostró por medio de las correspondientes validaciones que la hipótesis nula no fue rechazada, por lo tanto, el cálculo de los coeficientes es igual a 0, es decir que los valores calculados p también están muy cercanos al 0, lo que significa que son despreciables como se demuestra en el gráfico 108.

Gráfico 108: Estimación de los Valores

```

const          3.807434e-11
PiX1           4.298287e-05
PiX2           2.957913e-01
PiX3           6.471966e-03
PiX4           9.989344e-48
PiX5           2.490836e-21
Cos_PB         1.755269e-44
Den_Pob        3.478529e-01
Heat_Transfer  1.388844e-66
Actividad_Total 3.925562e-01
dtype: float64
    
```

Fuente: Estimación de los Valores P que se Acercan al 0, (Reed, 2019)

Los coeficientes más insignificantes pueden ser descartados con la finalidad de aumentar la significancia de la intersección, por lo tanto, se elimina la variable representativa de la transferencia de calor, en el gráfico número 109 podemos observar el cuadro de resumen que especifica un R-cuadrado igual a 0.974, mientras que los valores t también son significativos, porque a más grandes sean estos valores tenemos mayor evidencia que no ha sido rechazada la hipótesis nula.

Gráfico 109: Cuadro de Resumen R-Cuadrado

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Fac_Con	R-squared:	0.974			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.973			
Method:	Least Squares	F-statistic:	8069.			
Date:	Mon, 29 Jun 2020	Prob (F-statistic):	0.00			
Time:	18:08:16	Log-Likelihood:	2731.9			
No. Observations:	1984	AIC:	-5444.			
Df Residuals:	1974	BIC:	-5388.			
Df Model:	9					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	0.0896	0.008	11.270	0.000	0.074	0.105
PiX1	0.0071	0.014	0.518	0.605	-0.020	0.034
PiX2	0.0472	0.019	2.467	0.014	0.010	0.085
PiX3	-0.0456	0.019	-2.412	0.016	-0.083	-0.009
PiX4	-0.0033	0.004	-0.909	0.363	-0.010	0.004
PiX5	0.0903	0.006	14.272	0.000	0.078	0.103
Cos_PB	1.293e-05	1.44e-06	8.951	0.000	1.01e-05	1.58e-05
Den_Pob	-0.0058	0.000	-29.578	0.000	-0.006	-0.005
Consumo_Hvac	2.467e-05	1.09e-07	226.223	0.000	2.45e-05	2.49e-05
Actividad_Total	-0.0031	0.001	-2.418	0.016	-0.006	-0.001
Omnibus:	2601.314	Durbin-Watson:	1.773			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	2427649.817			
Skew:	6.490	Prob(JB):	0.00			
Kurtosis:	173.875	Cond. No.	3.40e+05			

Fuente: Cuadro Nova R-Cuadrado Igual a 0.974 en Base al Fuente (Reed, 2019)

Los coeficientes negativos provocan un efecto adverso en el factor de consumo energético debido a un aumento del valor en la intersección especificada de -0.2425,

cabe recalcar que la constante hallada para solucionar el sistema le corresponde un valor de 0.0896.

La técnica (OLS) fue aplicada de manera individual a cada modelo especificado en la base de datos, y se aplicó el algoritmo natural para facilitar la interpretación de las estimaciones de los coeficientes para las variables independientes, dado el efecto producido por el cambio de una unidad sobre la variación porcentual en la variable explicativa.

Entonces, al aplicar el algoritmo natural a cada uno de los coeficientes obtendremos los siguientes resultados que comprenden el porcentaje que aportan al sistema:

a.- Variable explicativa del número de pisos: PiX1 = -4.94%, PiX2 = -3.05%, PiX3 = -3.08%, PiX4 = -5.71%, PiX5 = -2.40%.

b.- Variable explicativa del coeficiente de ocupación del suelo en planta baja: Cos_PB = -11.25%.

c.- Variable explicativa de la densidad poblacional: Den_Pob = -5.14%-

d.- Variable explicativa del consumo de equipos de climatización o ambientación: Consumo_HVAC = -10.60%.

e.- Variable explicativa del grado de actividad registrada en los inmuebles: Actividad_Total = -5.77%.

Teóricamente los porcentajes de los coeficientes especificados con anterioridad sirven para gestar la estimación del factor de consumo energético conociendo las condiciones de entrada, el arquetipo propuesto además supone que la optimización del modelo se alcanzaría si se reducen las características negativas de los edificios en función de los porcentajes especificados con anterioridad.

Por ejemplo, supongamos que debemos optimizar un edificio de 20 pisos, cuyo coeficiente de ocupación del suelo en planta baja es del 40%, y ostenta una densidad promedio de 22.11 habitantes por km², lo que trae como consecuencia que el edificio posee una actividad de 1.31 bites de información según la escala de Shannon-Wiener, y representa una demanda de 13483 kWh para la operatividad de equipos.

Entonces, para mejorar la eficiencia energética del edificio en función a un factor de consumo, el modelo supone que se debe aumentar en un 2.40% el número de pisos, el

coeficiente de ocupación del suelo en planta baja debe ampliarse en un 11,25%, y la densidad de individuos calculada para la ocupación del edificio debe ser acortada en un 5,14%, además, debe especificarse un incremento en la demanda de los equipos de climatización contemplada en un 10.60%, finalmente, el edificio debe estar ubicado en una zona geográfica que represente una reducción en los índices de actividad correspondiente al 5.77%.

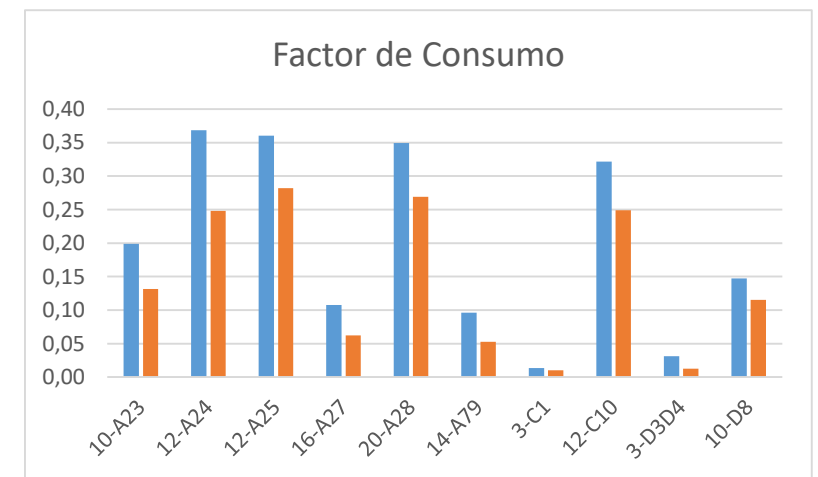
Para los índices de actividad, se puede hacer uso del mapa representado en el gráfico número 91, cabe recalcar que se puede usar el porcentaje del coeficiente calculado, o simplemente restar los valores representados en la leyenda del mapa para el número del grado de actividad representado en el gráfico 105.

1.2. Consumo de Energía Calculado Mediante el Proceso de Optimización y Apreciación de los Resultados a Nivel Urbano

En el gráfico número 110 y 111; se especifica el promedio y la mediana del factor de consumo, el índice de consumo más bajo lo ostentan los edificios de 3 pisos categorizados como C1 y D3D4; la sumatoria de su población representa 223 individuos; seguidamente están las categorías

A79 y A27, los cuales representan a los edificios de 14 y 16 pisos, el número de individuos en la muestra de estas categorías representa a 11 y 276 n. El consumo de energía registrado en estos edificios ostenta una ligera diferencia, como se lo puede observar en el gráfico de barras de la ilustración 106.

Gráfico 110: Gráfico de Barras Factor de Consumo Energético



Fuente: Comparación del Factor de Consumo Energético en Base al Promedio y Mediana de las Categorías Evaluadas, en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 111: Estimación del Promedio y Mediana del Factor de Consumo

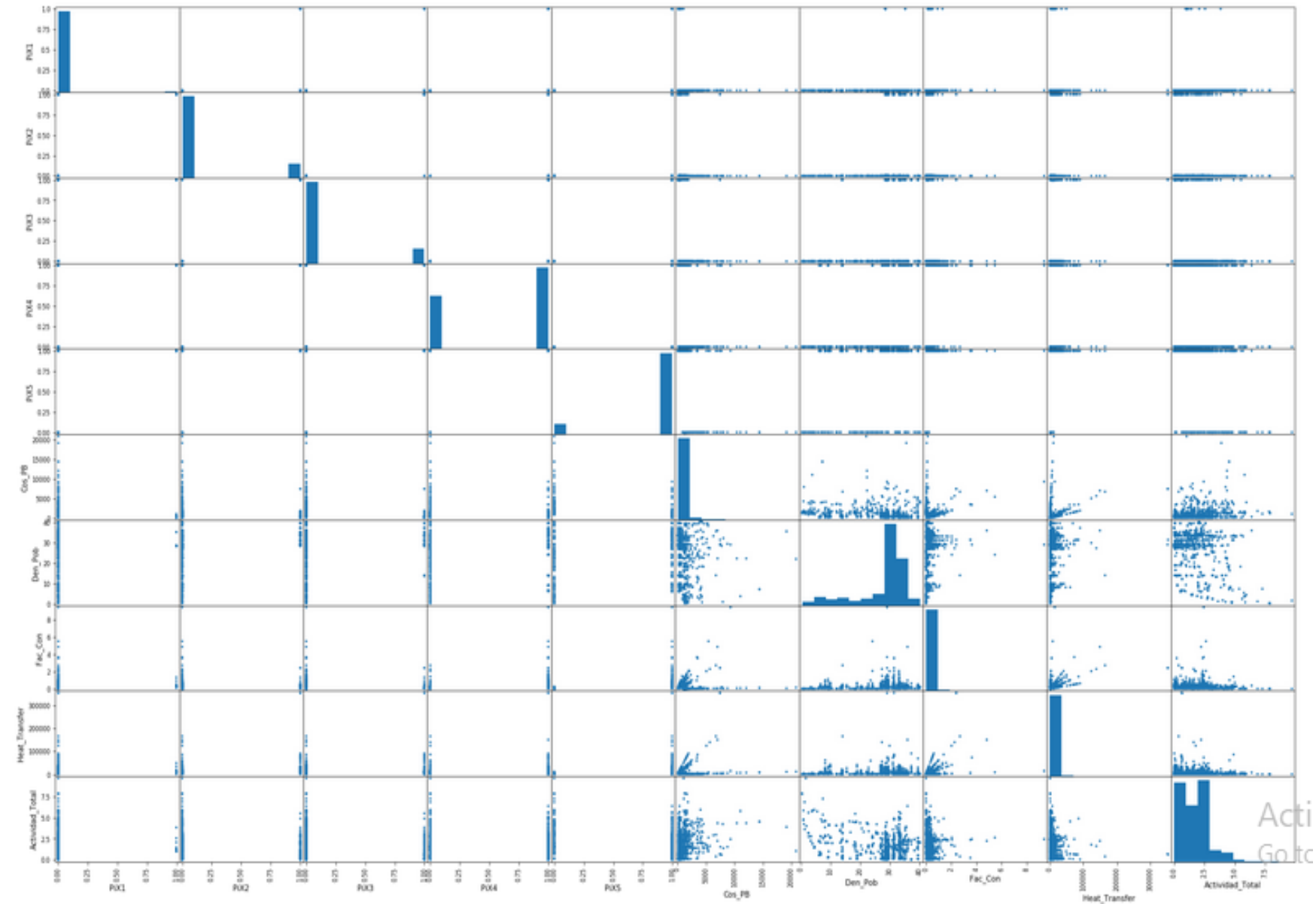
Resumen del Consumo de Energía en Edificios en Base a sus Variables			
Número de Individuos	Número de Pisos Por Categoría	Promedio del Factor de Consumo	Mediana del Factor de Consumo
336	10-A23	0.20	0.13
688	12-A24	0.37	0.25
86	12-A25	0.36	0.28
276	16-A27	0.11	0.06
22	20-A28	0.35	0.27
11	14-A79	0.10	0.05
25	3-C1	0.01	0.01
118	12-C10	0.32	0.25
198	3-D3D4	0.03	0.01
224	10-D8	0.15	0.12
1984		0.24	0.18

Los edificios de 10 pisos D8 y A23, no registran un consumo energético similar, aunque la categoría D8 presentan un índice de consumo más bajo; la sumatoria del número de individuos para estas categorías representa 560 n.

El factor de consumo más alto lo ostentan los edificios de 12 pisos, representados con las categorías A24, y A25 siendo la excepción la clase C10; el cual representa un índice de consumo energético menor a los edificios de 20 pisos cuya clase es A28. El número de individuos en la muestra para los edificios de 12 pisos corresponde a $n = 892$, mientras que en la muestra evaluada se registran 22 edificios de 20 pisos.

Lógicamente, los edificios de 3 a 10 pisos poseen un factor de consumo energético inferior, pero en el gráfico 112, el cual representa la dispersión de la población mediante una matriz de comparación pareada entre las variables explicativas del modelo, sugiere que el desempeño energético de estos individuos no posee una diferencia estadísticamente significativa.

Gráfico 112: Matriz de Comparación Pareada y Distribución Normal



Fuente: Matriz de Comparación Pareada y Distribución Normal en la Cual se Comparan las Variables Explicativas del Modelo Regresivo. La Diagonal Representa los Polígonos de Frecuencias, Cuadro Elaborado en Base a la Fuente (Reed, 2019)

Por lo tanto, en la ilustración 108 se puede comprobar que la distribución normal de la población representada en los polígonos de frecuencias de la diagonal de la matriz, poseen una forma de distribución enmarcada en un solo lado del plano cartesiano, aspecto que es predominante sobre todo cuando se compara entre sí a las variables relacionadas con la ocupación del suelo en planta baja, la densidad poblacional, el factor de consumo, la demanda energética para el funcionamiento de los equipos HVAC y los índices de actividad.

Prácticamente se puede discernir que la muestra poblacional y sus respectivas clases poseen una distribución con cola hacia la derecha cuando comparamos las medias muestrales del índice de ocupación del suelo en planta baja, el factor de consumo, la demanda energética para la operatividad de los equipos de climatización y los índices de actividad.

Mientras que la población posee una forma de distribución con cola hacia la izquierda cuando comparamos las medias muestrales relacionadas a la densidad poblacional. La comparación entre las variables explicativas antes mencionadas con el número de pisos también produce un

efecto similar, salvo que la forma de los polígonos de distribución normal posee un incremento significativo hacia la izquierda y la derecha.

Los puntos que representan la dispersión de la población también indican que las diferentes clases no poseen diferencias significativas entre ellas, entonces podemos concluir que los edificios con menor cantidad de pisos ostentan un consumo similar a los edificios más altos.

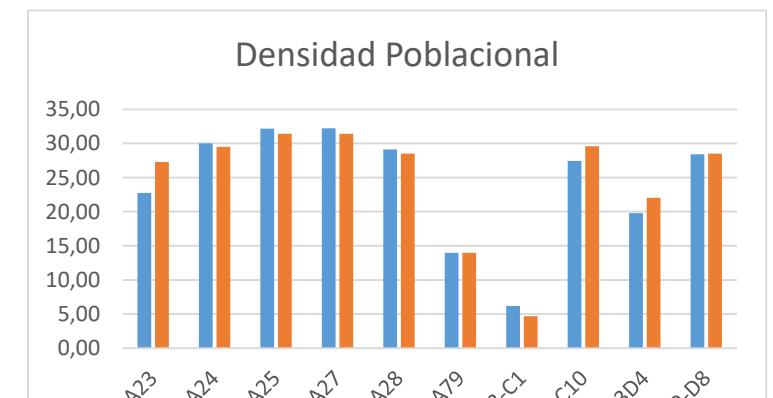
Cabe recalcar que, si bien es cierto que no es estadísticamente significativo un mejor desempeño con relación a otro, podemos inferir que, los edificios que poseen el peor rendimiento energético atañen a las categorías PiX3 y PiX4, es decir los edificios que poseen de entre 12 a 14 pisos y los inmuebles que ostentan de entre 14 a 16 pisos.

Aspecto que puede ser corroborado numéricamente gracias a los promedios representados en el gráfico 111, donde la media general del factor de consumo energético de la muestra de 1986 edificios corresponde a 0,24, mientras que los edificios de 12 pisos poseen promedios correspondientes a 0.37, 0.36 y 0,32, además los edificios que poseen 14 y 16 pisos poseen un promedio por debajo a la media general.

Se puede inferir también, que el mal desempeño energético de los edificios PiX3 y PiX4 se debe básicamente al número de la muestra, por ejemplo, si comparamos los edificios de 12 pisos contra los edificios de 20 pisos, estamos hablando de una relación de 892 vs 22.

Sin embargo, si tomamos en cuenta el número de la muestra como determinante para verificar un mejor o peor desempeño, estaríamos hablando que los edificios de 16 pisos sería los más opimos porque estos poseen una representatividad de 276 n; y poseen en promedio un factor de consumo de 0,11. Es por esta razón que a continuación se presentan los promedios de las demás variables explicativas, con la finalidad de establecer ventajas y desventajas en base a las diferentes determinantes de mercado, que conjuntamente afectarán o beneficiarán a las diferentes clases.

Gráfico 113: Gráfico de Barras Densidad de Población



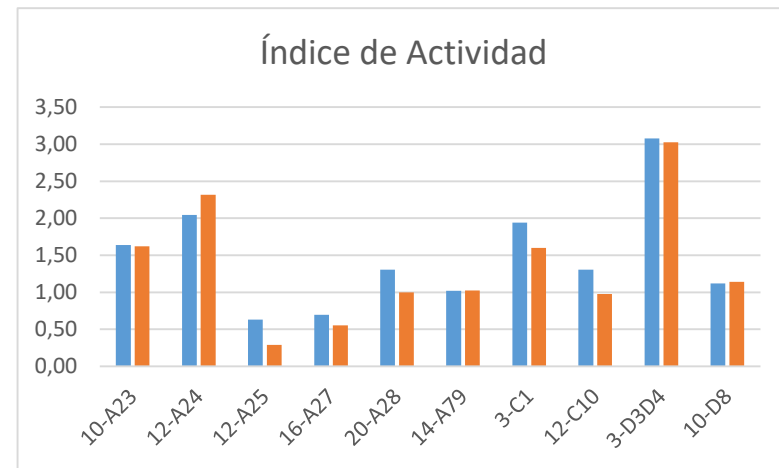
Fuente: Comparación de la Densidad de Población en Base al Promedio y Mediana de las Categorías Evaluadas en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 114: Estimación del Promedio y la Mediana de la Densidad de Población

Resumen del Consumo de Energía en Edificios en Base a sus Variables			
Número de Individuos	Número de Pisos Por Categoría	Promedio Densidad de Población	Mediana Densidad de Población
336	10-A23	22.76	27.29
688	12-A24	30.03	29.50
86	12-A25	32.19	31.41
276	16-A27	32.21	31.41
22	20-A28	29.11	28.51
11	14-A79	13.96	13.96
25	3-C1	6.20	4.66
118	12-C10	27.43	29.60
198	3-D3D4	19.77	22.04
224	10-D8	28.44	28.53
1984		27.43	29.45

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana de la Densidad de Población en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 115: Gráfico de Barras Índice de Actividad



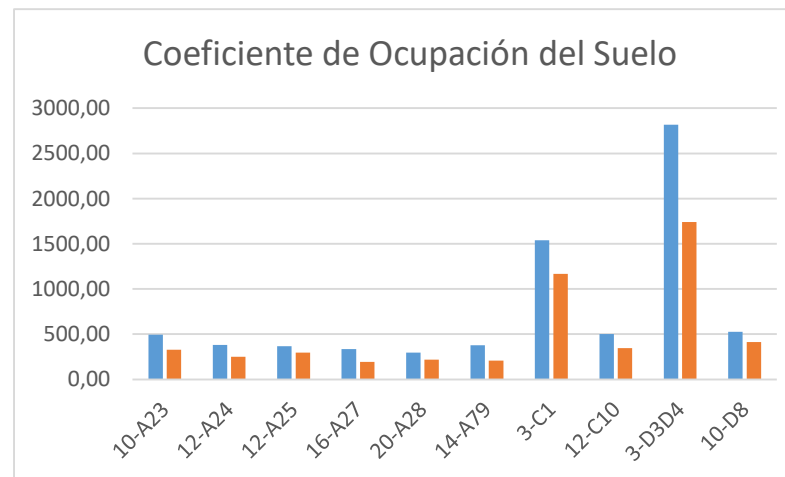
Fuente: Comparación del Índice de Actividad en Base al Promedio y la Mediana de las Categorías Evaluadas, en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 116: Estimación del Promedio y la Mediana del Índice de Actividad

Resumen del Consumo de Energía en Edificios en Base a sus Variables			
Número de Individuos	Número de Pisos Por Categoría	Promedio de Actividad Total	Mediana de Actividad Total
336	10-A23	1.64	1.62
688	12-A24	2.05	2.32
86	12-A25	0.63	0.29
276	16-A27	0.70	0.55
22	20-A28	1.31	1.00
11	14-A79	1.02	1.03
25	3-C1	1.94	1.60
118	12-C10	1.30	0.98
198	3-D3D4	3.08	3.03
224	10-D8	1.12	1.14
1984		1.67	1.62

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana del Índice de Actividad en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 117: Gráfico de Barras del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja



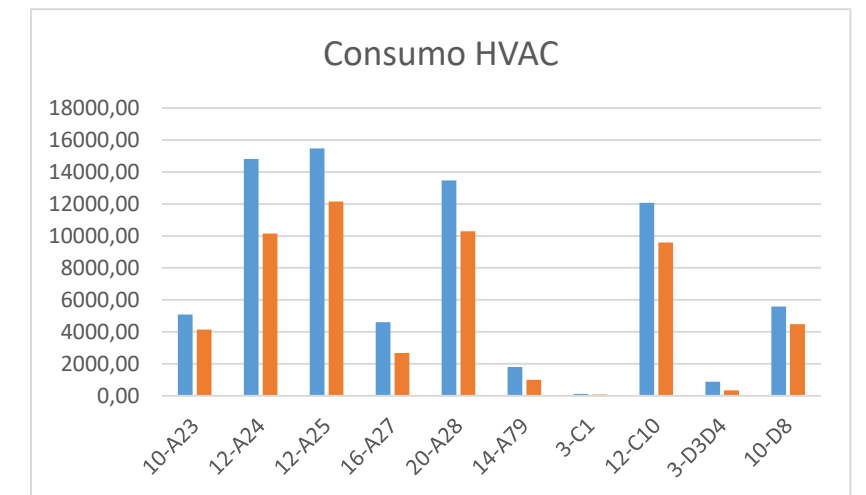
Fuente: Comparación del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja en Base al Promedio y la Mediana de las Categorías Evaluadas en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 118: Estimación del Promedio y la Mediana del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja

Resumen del Consumo de Energía en Edificios en Base a sus Variables			
Número de Individuos	Número de Pisos Por Categoría	Promedio Coeficiente de Ocuación del Suelo en Planta Baja	Mediana Coeficiente de Ocuación del Suelo en Planta Baja
336	10-A23	496.03	328.00
688	12-A24	380.19	251.25
86	12-A25	366.10	295.50
276	16-A27	335.27	194.40
22	20-A28	295.11	216.60
11	14-A79	377.00	206.50
25	3-C1	1540.37	1168.20
118	12-C10	501.19	346.15
198	3-D3D4	2816.50	1739.20
224	10-D8	527.44	413.00
1984		673.57	314.00

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana del Coeficiente de Ocupación del Suelo en Planta Baja en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 119: Gráfico de Barras de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación



Fuente: Comparación de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación en Base al Promedio y la Mediana de las Categorías Evaluadas en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

Gráfico 120: Estimación del Promedio y Mediana de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación

Resumen del Consumo de Energía en Edificios en Base a sus Variables			
<u>Número de Individuos</u>	<u>Número de Pisos Por Categoría</u>	<u>Promedio Consumo HVAC</u>	<u>Mediana Consumo HVAC</u>
336	10-A23	5081.77	4141.67
688	12-A24	14819.79	10158.78
86	12-A25	15483.16	12157.15
276	16-A27	4606.29	2676.35
22	20-A28	13483.63	10285.91
11	14-A79	1802.66	986.53
25	3-C1	110.77	64.07
118	12-C10	12076.23	9596.64
198	3-D3D4	880.27	331.35
224	10-D8	5589.18	4477.74
1984		9031.65	6487.87

Fuente: Tabla de Resumen del Promedio y la Mediana de la Demanda de Equipos de Climatización o Ambientación en Base al Estudio de (Kontokosta, 2014)

En el gráfico 113 y 114, se exponen los promedios y medianas que atañen a la densidad poblacional que abarca cada inmueble, donde podemos concluir que las estructuras de 3 pisos poseen los peores resultados, porque en promedio abarcan una densidad de 19.77 y 6.20; si comparamos estos resultados con el gráfico de barras se infiere que los edificios de 12 pisos son los más eficientes, ya que poseen una densidad promedio de 22.76, 30.03, 32.19 y 27.43, entonces podemos concluir que esta tipología de edificios disminuye considerablemente la entropía proyectada en el entorno.

La construcción de edificios trae como consecuencia que disminuya la afectación al suelo agrícola, por lo tanto, los edificios que superan los 10 pisos pueden ser más eficientes energéticamente que las construcciones en baja altura, debido

a factores relacionados a las características físicas, espaciales y de localización; básicamente los edificios que superan los 10 pisos de altura poseen mejores rendimientos si comparamos las variables explicativas relacionadas al coeficiente de ocupación del suelo en planta baja, y los índices de actividad que se desarrollan en su interior, así como también su relación con el contexto inmediato, que muchas veces tiene que ver con el abastecimiento de necesidades básicas relacionadas al trabajo y vivienda.

En los gráficos 115 y 116, podemos establecer que los índices de actividad más bajos lo poseen las categorías A25 y A27, estos edificios corresponden a la zona financiera y de oficinas de la ciudad de Quito, razón por la cual su actividad baja considerablemente si se contemplan los horarios de actividad laboral, siendo su contraparte la categoría D3D4, la cual corresponde a una tipología en la que predomina la vivienda organizada en conjuntos residenciales, y cuyos índices de actividad seguramente se incrementan considerablemente una vez que termina la jornada.

En los gráficos 117 y 118, se exponen los promedios del índice de ocupación del suelo en planta baja, y como ya se ha mencionado con anterioridad, las edificaciones de 3

pisos, poseen los peores resultados, lo que quiere decir que los habitantes de dichas estructuras gastan más energía en función al mantenimiento de un área implantación mucho mayor y en base al abastecimiento de las necesidades de trabajo.

1.3. Evaluación y Optimización Arquitectónica de Proyectos Futuros Mediante la Metodología Propuesta

El documento de ordenanza titulado “Concurso Corredor Metropolitano de Quito Fase 2 – Anteproyectos”; es una herramienta que “abre un nuevo capítulo en cuanto a temas de planificación urbana para la ciudad” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

En este instrumento jurídico se “introduce nuevas herramientas de planificación urbana” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016) por medio de la planificación “de planes urbanísticos complementarios” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016), en los cuales se gestan una serie de propuestas con el fin de establecer “una franja pública que concentra y distribuye infraestructura y servicios para la producción, circulación y consumo” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016), la cual se acopla a “una malla de

centralidades” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016), que conjuntamente articulará tres componentes claves de la ciudad que son la “estructura vial central, los polígonos de centralidades y polifuncionalidad” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

En el instrumento jurídico explicado con anterioridad se plantea 5 principios rectores que los coeficientes calculados por medio de la metodología (OLS) pueden evaluar si los proyectos arquitectónicos propuestos en cada centralidad están cumpliendo o no dichos requerimientos, cabe recalcar que el modelo de desempeño energético estimado mediante el presente trabajo de titulación solamente puede ser aplicado a los siguientes principios:

“1.- Recuperación y mejora de la calidad del espacio público.” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

“2.- Densificación y repoblamiento de la zona central del DMQ.” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

“3.- Sostenibilidad ambiental como eje transversal a las acciones de política pública y normativa.” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

Es decir el primer punto hace referencia a la calidad del espacio público, el cual no puede existir si no se asegura “los recursos técnicos y económicos” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016), que ayudaría a densificar la ciudad o repoblar el eje central de la urbe, ya que las condiciones de “repartición del suelo” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016) son más equitativas y las condiciones de vida serían sostenibles en base a aspectos de localización de las funciones de trabajo, vivienda y movilidad. Si los proyectos arquitectónicos alcanzan un buen desempeño energético, atraería las fuentes de inversión privada, si no se procede a dar una serie de recomendaciones. Para poder entender de una manera más práctica la aplicación de los coeficientes calculados se procedió a programar una calculadora donde se ingresan los campos y se obtiene el respectivo factor de consumo.

1.4.Evaluación del Proyecto Emblemático Julio Andrade Especificado en el Plan Parcial Veintimilla

Para gestar el Plan Parcial Veintimilla, se plantea un proyecto detonante que tiene como finalidad integrar “dos manzanas y un espacio público, que ponga en valor al parque julio Andrade” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016), este

proyecto consiste en “un conjunto de edificaciones de uso mixto que van desde comercios, servicios y equipamientos, hasta el espacio público y la vivienda” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

Gráfico 121: Localización del Parque Julio Andrade y Ubicación del Proyecto



Fuente: Localización del Proyecto Emblemático Julio Andrade (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

Como podemos observar en el gráfico 121, el proyecto consiste en generar un macro lote, que estará delimitado al norte por la Av. Gral. Ignacio de Veintimilla, al sur por la calle Gerónimo Carrión, al Noroeste por la Av. 10 de Agosto y al Sureste por la calle Ulpiano Páez. En el gráfico 122 se exhibe una axonometría en la cual podemos visualizar las intenciones del proyecto.

En el gráfico 123, se presenta las estrategias de diseño que se contemplaron para este proyecto, el cual consiste en un bloque edificado cuya altura será de dos pisos, conforme la masa edificada se aleja de la Av. 10 de Agosto, se plantea bloques de inmuebles en los cuales se establecerán “usos comerciales, de servicio o equipamientos” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016). La integración de espacios verdes y arbolado también forman parte integral del proyecto los cuales garantizan la participación de diferentes autores. En el gráfico 124, se expone un corte en el cual se presenta un modelo de mixticidad además, se plantean espacios públicos en altura, específicamente localizados en el quinto nivel.

Para poder evaluar y optimizar el consumo energético de este proyecto por medio de la metodología propuesta, es indispensable utilizar los mapas bases correspondientes al

índice de actividad calculado por medio del indicador Shannon-Weaver y la información del mapa de densidad poblacional especificado en los gráficos 8 y 91

Gráfico 122: Axonometría General del Proyecto Emblemático Julio Andrade



Fuente: Boulevard Veintimilla – Corredor Híbrido Julio Andrade (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

Gráfico 123: El proyecto Julio Andrade Consiste en Varios Bloques de Uso Mixto



Fuente: Axonometría Proyecto Emblemático Julio Andrade, Estrategias de Diseño (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

Gráfico 124: Intención del Programa Arquitectónico



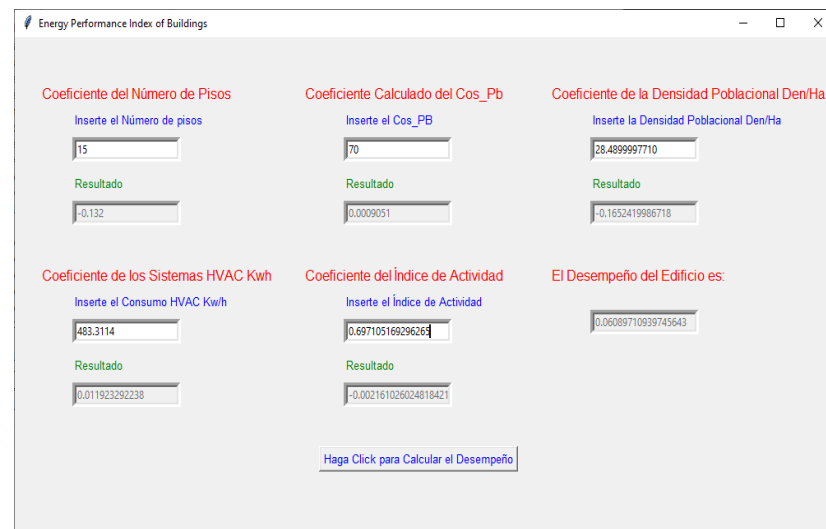
Fuente: Corte Proyecto Emblemático Julio Andrade (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

Por medio de la técnica de coincidencia multidimensional, se procede a empear la información de dichos mapas a las condiciones de entrada propuestos en la ecuación estimada por medio de la técnica (OLS), además, en el Plan Parcial Veintimilla se especifica que los bloques más altos estarán compuestos de 15 pisos, e implantados en una zona cuya ocupación del suelo en planta baja se permite hasta en un 70%; y se estima un consumo aproximado de los equipos de climatización para este edificio.

En el gráfico número 125 se especifican los valores de entrada para cada una de las variables y su correspondiente cálculo. El factor de desempeño energético para este edificio sería igual a 0.0608971093; número el cual sirve para poder estimar el consumo total de energía en la edificación, ya que

si multiplicamos el factor de consumo para el consumo per cápita estimado en la ciudad de Quito, obtendremos que en el edificio por concepto de equipos de climatización se consumirá un total de 93.5076 kW/h, entonces, si a este resultado le sumamos el consumo per cápita, obtendremos que este bloque de edificios consumirá 1431,29 kW/h.

Gráfico 125: Factor de Consumo Calculado Demostración de las Condiciones de Entrada.



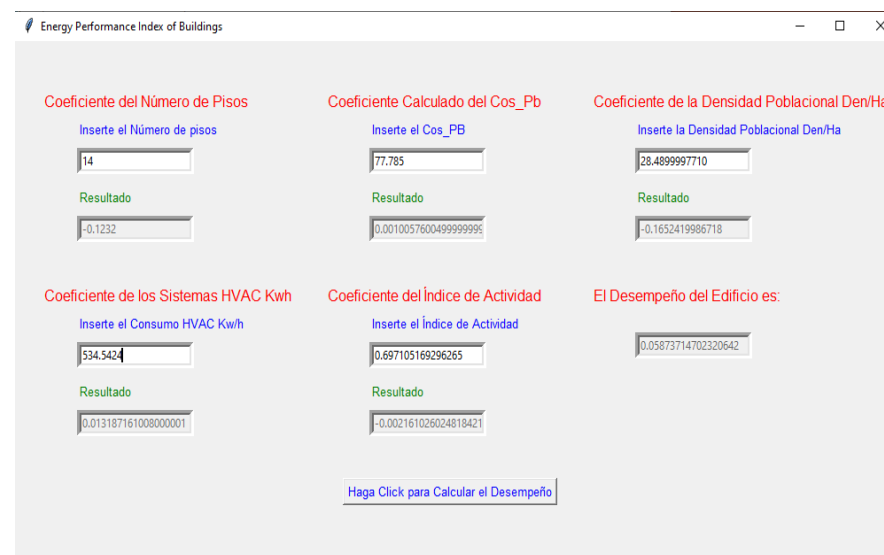
Fuente: Estimación del Factor de Consumo Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Entonces, nace la interrogante de como optimizar este consumo, para este propósito utilizamos los porcentajes que se especifican en el gráfico 109, el proyecto que se prevé construir a futuro, estaría ubicado en la categoría PiX4, es decir que el factor de evaluación usado para determinar el factor de consumo para este edificio le corresponde a -0.0088.

Para las torres que pertenecen a la categoría PiX4, el modelo sugiere que se reduzca el número de pisos en un 5.71%, aumentar el coeficiente de ocupación en planta baja en un 11,25%, mientras que, en el caso de la densidad poblacional, está deberá disminuir en un 5,14% y; finalmente los equipos de climatización y los índices de actividad deberá aumentar en un 10,60% y disminuir en un 5,77% respectivamente.

Suponiendo que no queremos reducir los coeficientes de población y actividad, porque esto significaría que el proyecto deberá cambiar de localización, se procede alterar los demás coeficientes en función a lo especificado en la tabla nova descrita en el gráfico 109.

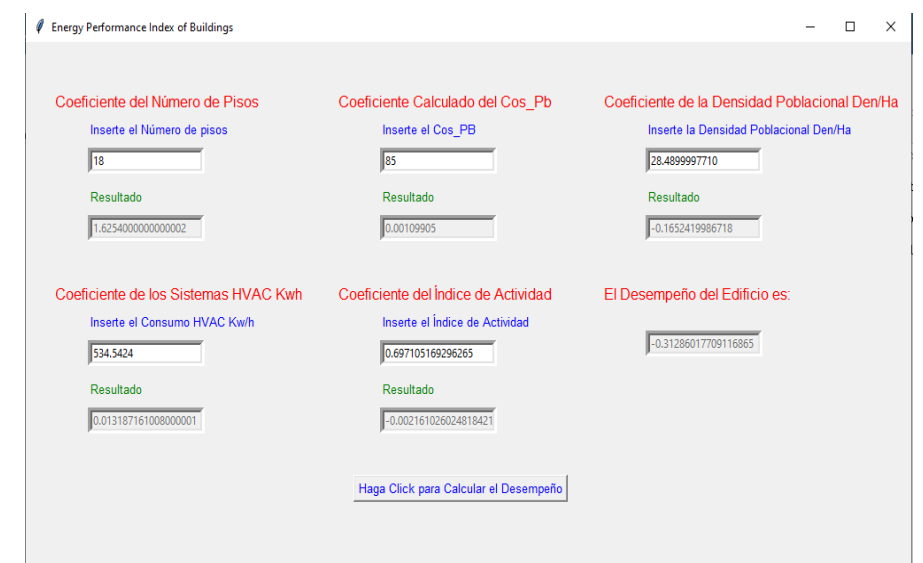
Gráfico 126: Valores de Entrada de Optimización



Fuente: Optimización del Factor de Consumo Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

En el gráfico 126 se especifica que el factor de consumo ha mejorado, ya que obtenemos un resultado de 0.05873714702320, pero el método propuesto permite que se puedan escoger otras alternativas que también resultan más prácticas, por ejemplo, si se aumenta el coeficiente de ocupación del suelo hasta un 85 % y, aumentamos hasta 18 el número de pisos, el sistema se optimiza, porque obtendremos un resultado de -0.031286017709, por lo tanto la optimización dependerá de los recursos de inversión disponibles, pero en este caso es pertinente aumentar hasta 18 pisos con un coeficiente de ocupación en planta baja de 85%, en el gráfico 127 se puede observar las condiciones de entrada usadas para este propósito.

Gráfico 127: Optimización del Proyecto en Base al Aumento del Número de pisos



Fuente: Optimización del Proyecto Emblemático Julio Andrade, Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Si se hace uso del factor de consumo calculado en el gráfico 127 obtendremos que el edificio consumirá 41.8541 kW/h, por concepto de equipos de climatización y, si a este valor le sumamos el consumo per cápita registrado en Quito obtendremos que el edificio consumirá 1379.64 kW/h.

Sería lógico interpretar en base a los resultados de los coeficientes propuestos que, para optimizar un proyecto en función de los campos de entrada relacionado al índice de actividad y densidad de población, se debe establecer la localización más pertinente, en base a las necesidades del proyectista.

1.5. Evaluación del Proyecto Emblemático la Y **Especificado en el Plan Parcial Luces de** **Pichincha**

Proyecto cuya finalidad es establecer un “centro de innovación y una estructura integrada activa en la plaza de toros para albergar nuevos usos” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016), relacionados a la “promoción abierta de servicios adaptados a este nuevo lugar para atraer habitantes al sector” (Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

En el gráfico 128, se presenta la ubicación del proyecto el cual consiste en un conjunto de bloques de edificios los cuales están delimitados al noreste por la Av. La Prensa y al suroeste por la Av. Juan de Ascaray,

Gráfico 128: Ubicación del Proyecto Emblemático la Y, Al Noroeste la Av. La Prensa y al Suroeste la Av. Juan de Ascaray



Fuente: Ubicación del Proyecto Emblemático la Y (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

El conjunto de edificaciones en altura puede ser apreciado de mejor manera en la perspectiva presentada en el gráfico 129, donde estos bloques estarán vinculados con la existente plaza de Toros de Quito, estas torres albergarán un programa arquitectónico en el cual se establecerán actividades tales como oficinas corporativas, oficinas comerciales y vivienda, las cuales estructurarán un centro de innovación para la ciudad. Además, en el gráfico 130 se presenta de manera esquemática como estarán distribuidas las diferentes actividades en este macro lote.

Gráfico 129: Perspectiva General del Bloque de Edificios Planteado para Reactivar la Antigua Plaza de Toros.



Fuente: Perspectiva del Proyecto Emblemático la Y (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

En el macro lote propuesto se planea implantar torres destinadas para albergar programas de vivienda, según lo representado en el gráfico 130, las cuales estarán compuestas de 14 y 16 pisos, mientras que los edificios de oficinas y comercio serán de 10 a 20 pisos, por lo tanto, para evaluar las edificaciones donde se implementaran las residencias, usaremos el coeficiente de la clase PiX4 del gráfico número 109 donde se expuso la tabla resumen de los coeficientes calculados; mientras que la evaluación de los bloques en los cuales se ofertará bienes y servicios, serán testeados por medio del coeficiente perteneciente a la clase Pix5 y PiX2

Para ejecutar la evaluación del rendimiento energético de estos edificios, primero se procede a establecer los campos de entrada donde, el índice de actividad registrado en esta parte de la ciudad es de 0.5201764, mientras que la densidad

Gráfico 130: Tipología de los Edificios del Proyecto Emblemático la Y



Fuente: Planificación del Conjunto de Torres del Proyecto Emblemático la Y (Distrito Metropolitano de Quito, 2016)

poblacional registrada en número de habitantes por hectárea es igual a 23.5149993900, cabe destacar que estos dos campos no sufrirán alteraciones para evaluar los edificios residenciales y comerciales, ya que están ubicados en el mismo lote.

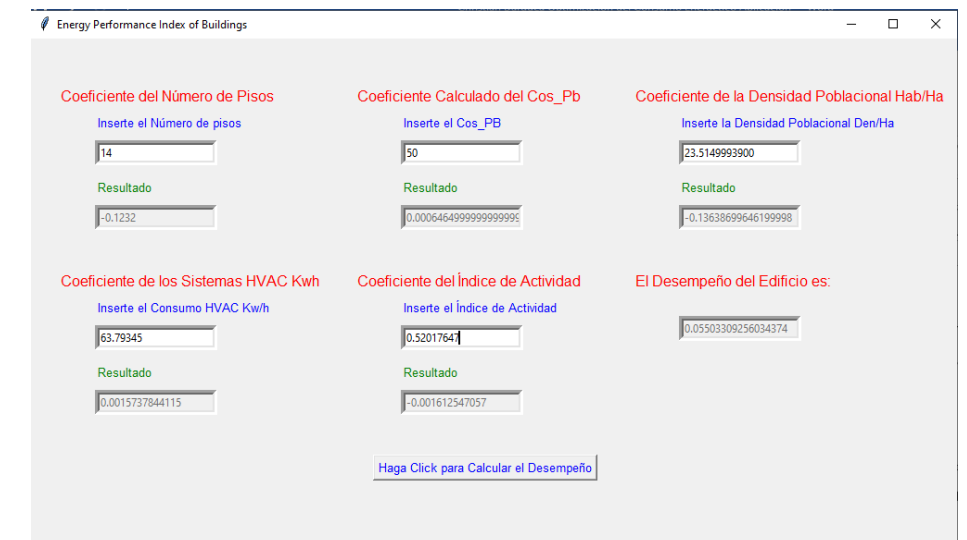
Por lo tanto, en el gráfico 131 se expone los campos de entrada utilizados para evaluar los edificios residencias proyectados, cuyo coeficiente de ocupación en planta baja corresponde a un 50% y el consumo de equipos de equipos de

climatización estimado corresponde a 63.79345 kW/h, una vez ejecutado el cálculo obtendremos un factor de consumo de 0.05503309256, es decir que si multiplicamos para el consumo per cápita obtendremos un gasto de 73.6227 kW/h, para un consumo total de la edificación de 1410.992 kW/h.

Para optimizar estos resultados, correspondientes a los edificios de la clase PiX4, se procede a multiplicar los campos de entrada de la misma manera que se lo hizo en el proyecto Emblemático Julio Andrade, entonces procedemos a cambiar

los datos y obtenemos un factor de consumo igual a 0.0154770470.

Gráfico 131: Evaluación del Proyecto Emblemático la Y Sin Optimizar

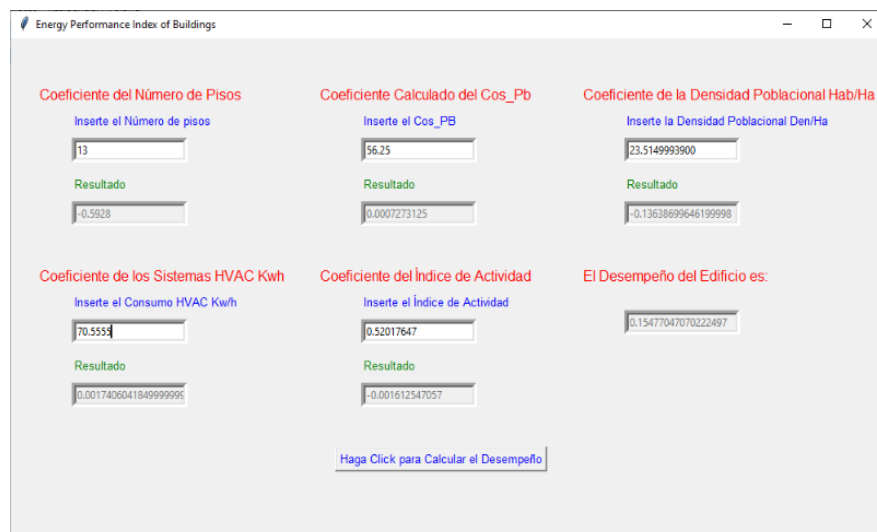


Fuente: Evaluación del Proyecto Emblemático la Y. Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Entonces, se obtiene un consumo menor ya que si multiplicamos por el consumo per cápita obtendremos un consumo real de equipos de climatización de 20.7050 kW/h para un consumo total de 1358.49 kWh; en este caso se puede optar por esta opción para alcanzar un mejor desempeño de la edificación. La optimización al igual que en el ejemplo anterior donde se analizó el proyecto Emblemático Julio Andrade puede ocupar una mayor área en planta baja sin necesidad de que se afecte de manera considerable el factor de consumo resultante.

Las condiciones de entrada para la correspondiente optimización se las puede apreciar en el gráfico 132. Cabe destacar que la clase PiX4 usa el coeficiente calculado de -0.0084 para gestar las predicciones o correspondientes reducciones, sin embargo, esto puede ser aplicado a los individuos cuyo número de pisos está enmarcado en el intervalo de (14 – 16) pisos. Si al momento de evaluar otras opciones que se salgan de este intervalo se procede a usar los coeficientes de las otras clases.

Gráfico 132: Desempeño Mejorado de los Edificios Residenciales que Serán Planificados.

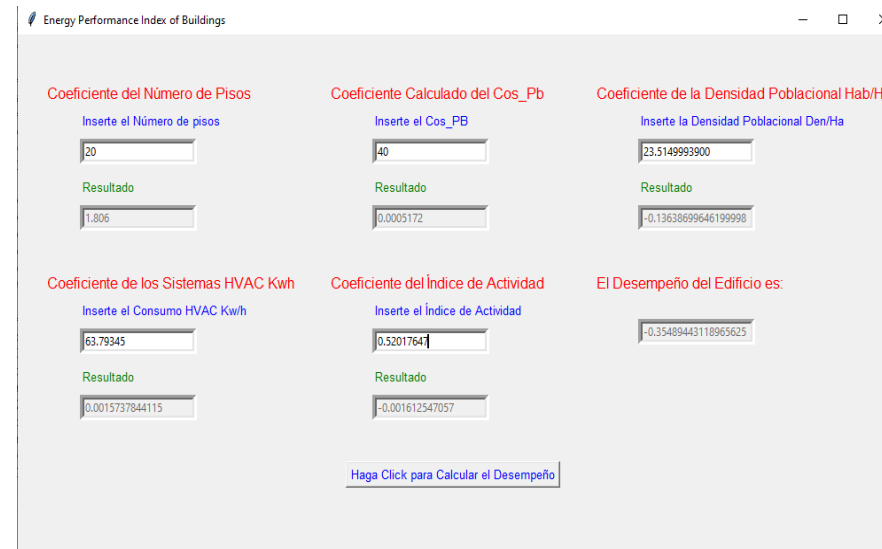


Fuente: Optimización del Proyecto Emblemático la Y. Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

En el caso de los edificios comerciales se procede a usar el coeficiente calculado para la clase PiX5, en el gráfico 133 se puede observar que el factor de consumo es igual a -0.354894431189, es decir que si a este valor lo multiplicamos

por el consumo per cápita obtendremos como resultado que estas torres ocuparán 474.774 kW/h para el funcionamiento de los equipos de climatización y un total de 1812.564 kW/h, como consumo global del edificio.

Gráfico 133: Calculo del Desempeño Energético del Proyecto Emblemático la Y



Fuente: Desempeño Energético de los Edificios Comerciales Propuestos en el Proyecto Emblemático la Y Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Para optimizar proyectos arquitectónicos que están clasificados como PiX5, se debe proceder aplicar los coeficientes estimados por medio del modelo, donde se estipula que el número de pisos debe aumentar en 2.40%, el coeficiente de ocupación en planta baja debe incrementar 11.25%, mientras que los equipos de climatización pueden poseer un consumo mayor hasta en un 10.60%, y finalmente la densidad poblacional y el índice de actividad deberá disminuir en 5.14% y 5.77% respectivamente.

Aplicando los coeficientes calculados obtenemos una evaluación en la cual el factor de consumo calculado es igual a -0.37420105914, es decir que el límite para esta zona es hasta 20 pisos, ya que si se sigue aumentando el número de pisos afectaremos negativamente el consumo final, que en este caso aumento a un gasto global de 1838.392 kW/h, entonces, los edificios de oficinas propuestos están en un rango óptimo ya que para esta localización se puede inferir que el límite máximo son los 20 pisos de altura; los resultados están expuestos en el gráfico 134.

Es muy probable que el resultado final haya sido afectado en base a términos de localización, es decir, que si se quiere crecer en altura, se debe buscar otra localización donde los índices de actividad y densidad poblacional sean menores, ya que seguramente se está congestionando el lugar con una masa edificada que en términos de energía no es sostenible.

Gráfico 134: El Límite de Pisos que se puede Establecer en el Proyecto Emblemático la Y es Hasta 20.

Coeficiente del Número de Pisos	Coeficiente Calculado del Cos_Pb	Coeficiente de la Densidad Poblacional Hab/Ha
Inserte el Número de pisos 21	Inserte el Cos_PB 70	Inserte la Densidad Poblacional Den/Ha 23.5149993900
Resultado 1.8963	Resultado 0.0009051	Resultado -0.13638699646199998
Coeficiente de los Sistemas HVAC Kwh	Coeficiente del Índice de Actividad	El Desempeño del Edificio es:
Inserte el Consumo HVAC Kwh 70.5555	Inserte el Índice de Actividad 0.5201764	-0.374201059141525
Resultado 0.0017406041849999995	Resultado -0.001612547057	

Haga Click para Calcular el Desempeño

Fuente: No se Optimizó los Resultados en Base a los Coeficientes Determinados. Programa Realizado en Base a la Fuente (Kontokosta, 2014)

Por lo tanto, los edificios de 10 pisos de oficinas que se implantarán en este lugar pueden crecer hasta 10 pisos sin que se altere negativamente el factor de consumo, aunque eso dependerá del flujo de inversión que se tenga disponible.

1.6. Evaluación de los Resultados en Base al Desempeño de la Fachada y Otras Características Físicas de los Edificios

Los edificios cuya fachada está constituida por muros de mampostería tienen índices de transferencia de calor más bajos que los edificios que poseen envolventes con una alta relación de acristalamiento, sin embargo, también es determinante el tratamiento que se le da a la fachada, ya que

no se puede afirmar deliberadamente que los muros de mampostería serán mejores energéticamente.

Por ejemplo, gracias a las simulaciones (CFD) realizadas para evaluar la interacción de las variables ambientales y sus efectos termodinámicos sobre la envolvente de las torres, se pudo concluir que el edificio 384322, posee una transferencia de calor que oscila entre 12000000 a 570, mientras que el edificio 46738, tiene una transferencia de calor de 12000000 a 2900, y el edificio 46963, posee una variación en la transferencia de calor que oscila entre 1200000 a 1200.

Entonces, los edificios mencionados con anterioridad presentan niveles de transferencia de calor similar, mientras que el porcentaje de acristalamiento varía considerablemente, si bien es cierto que el vidrio produce un efecto invernadero en el interior de los inmuebles, aspecto que no es deseable si se quiere ahorrar energía; la evidencia que arroja el modelo regresivo propuesto en el presente trabajo y el arquetipo formulado por el señor Constanti E. Kontokosta; sugiere que la mayoría de la pérdida de calor en los edificios de gran altura es a través de la envolvente y no por el techo.

Lo que quiere decir que el edificio 46963 posee una transferencia de calor similar a los demás edificios con índices de acristalamiento inferior; esto se debe a su condición de implantación y a los elevados porcentajes de acristalamiento, es decir, como esta torre pertenece a la categoría A, y por lo tanto son estructuras aisladas que no se adosan, provoca que la transferencia de calor que se obtiene en base a la interacción con el flujo del aire y la radiación, se pierda a través de la envolvente, aspecto que tiende a aumentar con respecto a la altura, ya que interactúa con masas de aire más frías.

En la ciudad de New York los edificios adosados y con una gran área de implantación son beneficiosos, ya que no permiten la pérdida de calor en los tiempos de invierno, lo que significa un ahorro en equipos de climatización, pero en el caso de la ciudad de Quito al no existir las condiciones climáticas que el invierno significa, los edificios aislados son los más eficientes, porque independientemente del grado de acristalamiento, la pérdida de calor producto de la transferencia se perderá conforme a la altura y en base a su implantación aislada.

Cabe recalcar que, para mejorar aún más dicho comportamiento, se sugiere realizar perforaciones en la envolvente para facultar la circulación de masas de aire frío en el interior de las torres, además de usar colores más claros, como es el caso del edificio 46738. Por lo tanto, esta evidencia justifica la inversión energética que se puede apreciar en los gráficos 119 y 120, donde se especifica que los edificios más altos, requiere una menor demanda en el uso de equipos HVAC.

Además, existe la suficiente evidencia científica para sustentar que, a menor coeficiente de ocupación del suelo en planta baja, los índices de transferencia de calor tienden a mejorar, un aspecto que afecta de forma significativa a los edificios que poseen un área de implantación muy grande.

El modelo regresivo además sugiere que los edificios no deben poseer un volumen exagerado, y que es preferible que crezcan en altura, para aprovechar los beneficios de la iluminación natural.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

1.1. Breves Recomendaciones

Se recomienda clasificar las actividades que se vayan a desarrollar en los edificios y para las cuales estos son diseñados, este factor sería de vital importancia para ordenar a las estructuras en diferentes tipologías y estimar de una manera más precisa el consumo de energía en base a los requerimientos que cada actividad demanda, es decir los resultados estarían en base a una comprensión de dinámicas de mercado más concisas, esta información debería ser recolectada y organizada en los polígonos de los sistemas de información geográfica del Distrito Metropolitano de Quito.

Cabe recalcar que el modelo regresivo propuesto en el presente trabajo es una herramienta idónea que sirvió para evaluar, medir, pronosticar y validar bajo la rigurosidad del método científico el desempeño energético de las edificaciones que superan los 4000 m² de área de implantación y, que están localizadas en los usos del suelo primario (R2-R3) y uso múltiple.

Además, la optimización es posible gracias a la determinación de un valor teórico de desempeño que es

calculado en base a un conjunto de variables ambientales, físicas, de ocupación y localización; las cuales tienen un directo impacto en el consumo energético de los edificios en la ciudad de Quito, este índice multifactorial puede ser considerado como marco de referencia para gestar una comparación de rendimientos, aspecto que es fundamental para la optimización de recursos desde una perspectiva de mercado que puede ser útil para las inversiones futuras.

Hoy en la ciudad de Quito, existen edificios que poseen certificaciones basadas en reglas de métrica general, como es el caso del certificado EDGE, sin bien es cierto que estos métodos de evaluación no son del todo confiables debido a las asimetrías de información que estos representan; valdría la pena introducir en un futuro a la base de datos a las certificaciones de regla general como una variable explicativa, con la finalidad de verificar si en la ciudad de Quito es determinante poseer o no un certificado de esta índole.

En el presente trabajo se demostró que no se rechazó la hipótesis nula, es decir, que la afirmación de los parámetros estimados sucederá en la muestra poblacional, ya sean estos en los valores de la media como en los resultados de la

desviación estándar; además que cada variable explicativa del sistema es independiente una de las otra evadiendo de esta manera la correlación entre parámetros.

Por lo tanto, podemos inferir que a mayores índices de actividad y densidad poblacional el sistema se verá afectado negativamente en -5.77% y -5,14% por cambio de unidad respectivamente, mientras que las variables como es el caso de los equipos de climatización, coeficiente de ocupación del suelo y el número de pisos no afectan de manera negativa el desempeño energético.

Aunque los edificios de entre 12 y 14 pisos y las torres de entre 14 y 16 pisos afectaran negativamente al sistema en -3.08% y -5.71% por cambio de unidad, es decir, si aumentamos para estas clases un piso el rendimiento energético disminuirá en dicho porcentaje.

Entonces, en la ciudad de Quito es posible construir edificios de 20 pisos y más, porque se gastará una cantidad de energía similar que, en los edificios de las otras clases especificadas, lo que abre el camino a la densificación vertical en la urbe.

En cuanto al rendimiento de la fachada no se puede inferir de manera concluyente que los edificios acristalados son peores que los edificios que poseen un menor índice de acristalamiento, esto se debe en gran parte a la acción del viento, el cual ayuda a disipar el calor que se absorbe a causa de las condiciones ambientales del exterior; reduciendo las cargas de calor a media que aumenta la altura del edificio, es por esta razón que la variable explicativa referente a los equipos de climatización no afectan negativamente al sistema.

Sin embargo, el modelo regresivo pudo haber perdido precisión a causa de una muestra limitada, ya que las simulaciones se gestaron en solamente 15 edificios, y estos resultados se los interpoló a los demás individuos de la muestra analizada; pero es gracias a las correspondientes validaciones que podemos concluir que es posible construir torres con mayores índices de acristalamiento, porque ayudaría a disminuir el uso de iluminación artificial.

Un aspecto negativo de los modelos regresivos es que requieren una mayor cantidad de información, la cual puede ser perjudicial si existen sesgos debido a la falta de representatividad, por lo tanto, los edificios que poseen

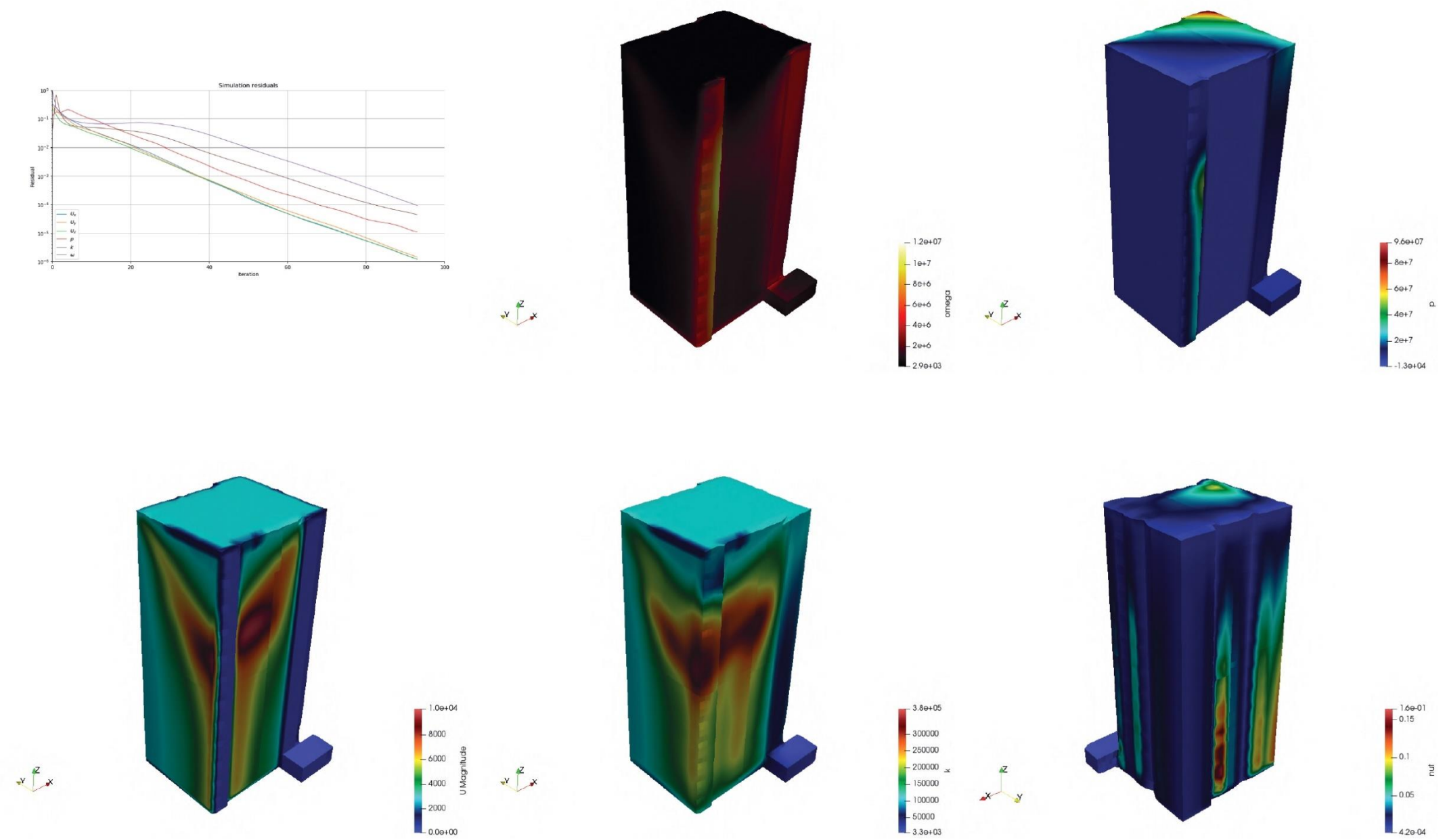
certificaciones de métrica general como es el caso del certificado EDGE no fueron tomados en cuenta como variable explicativa.

Si bien es cierto que estos sistemas de evaluación no son del todo confiables para optimizar el consumo energético de los edificios a causa de asimetrías de información relevante, sería una buena idea incluir a las torres certificadas en base a otros sistemas de calificación con la finalidad de determinar si son o no indispensables para optimizar el consumo energético en los edificios de variadas alturas.

ANEXOS

Gráfico 135: Resultado de la Simulación

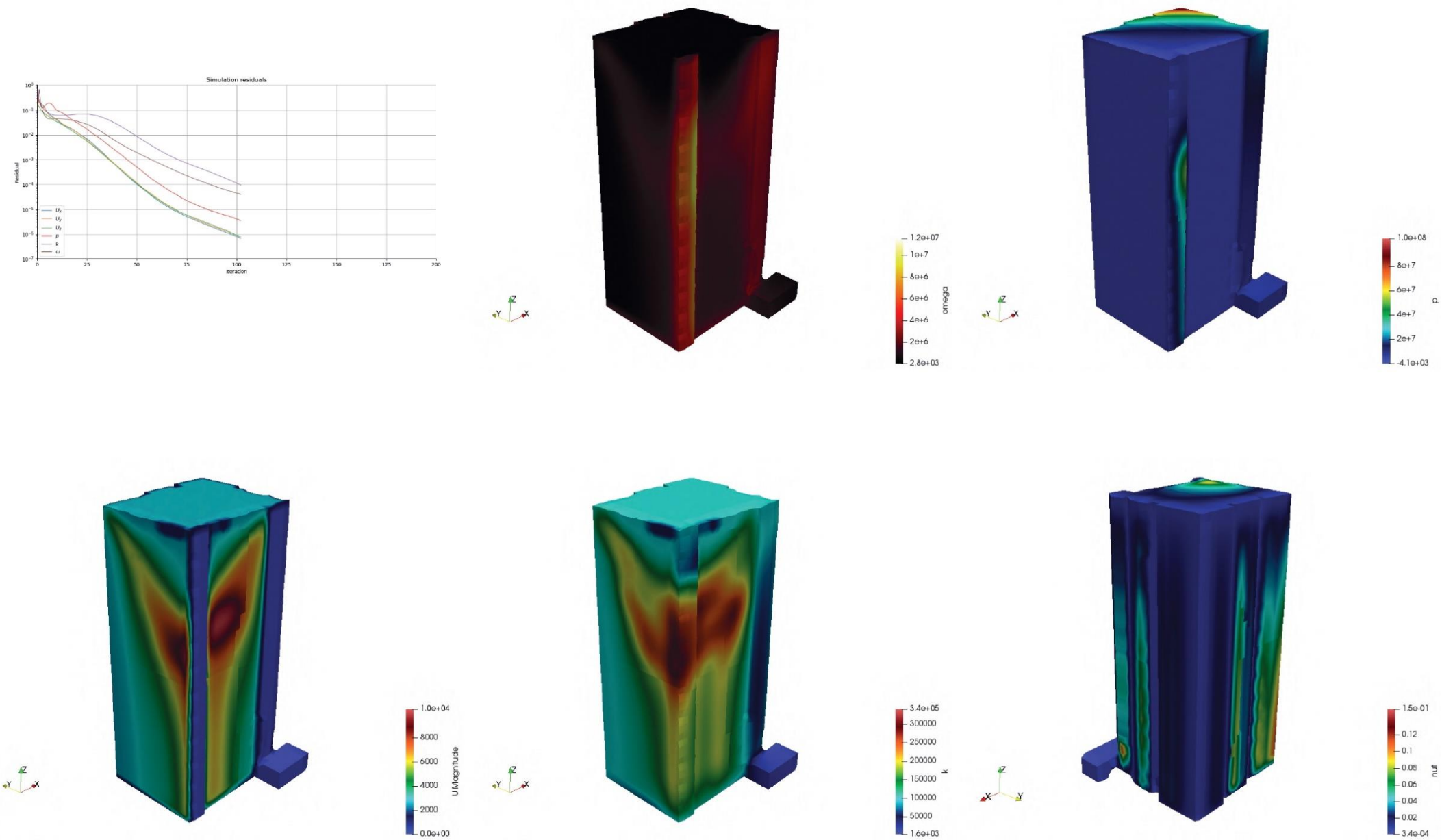
Edificio 46738 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46738 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 136: Resultado de la Simulación

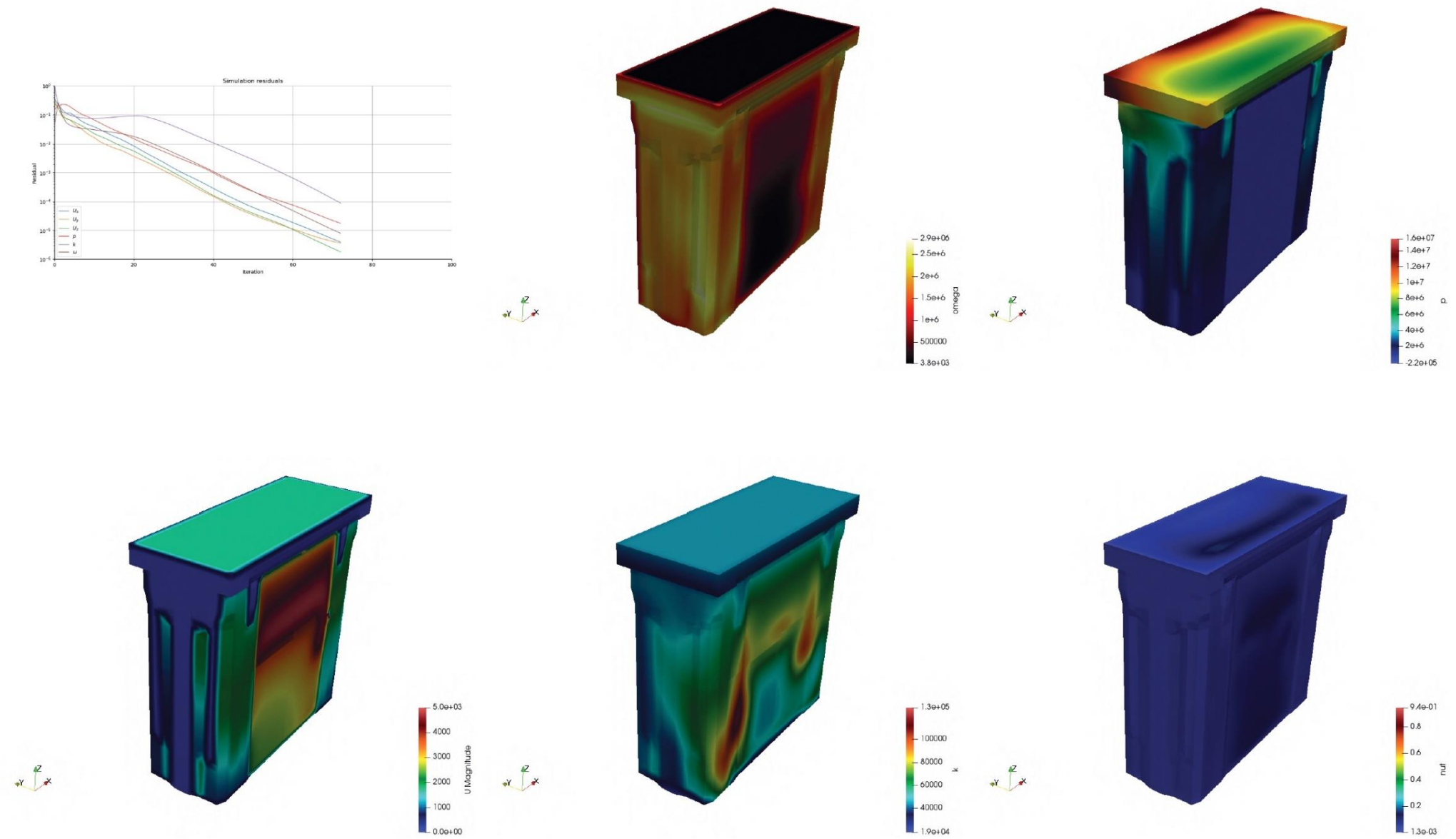
Edificio 46738 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46738 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 137: Resultado de la Simulación

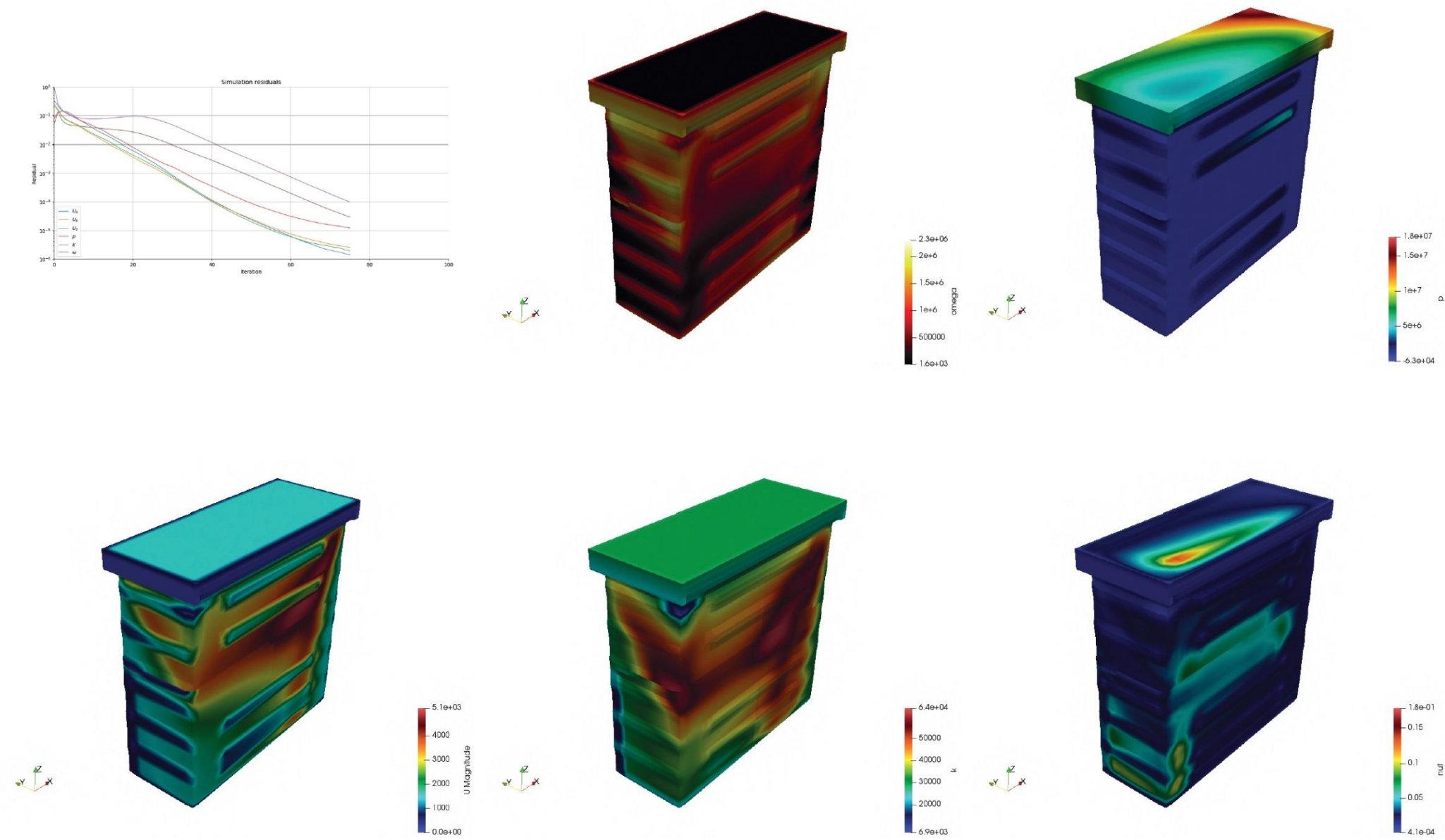
Edificio 46751 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46751 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 138: Resultado de la Simulación

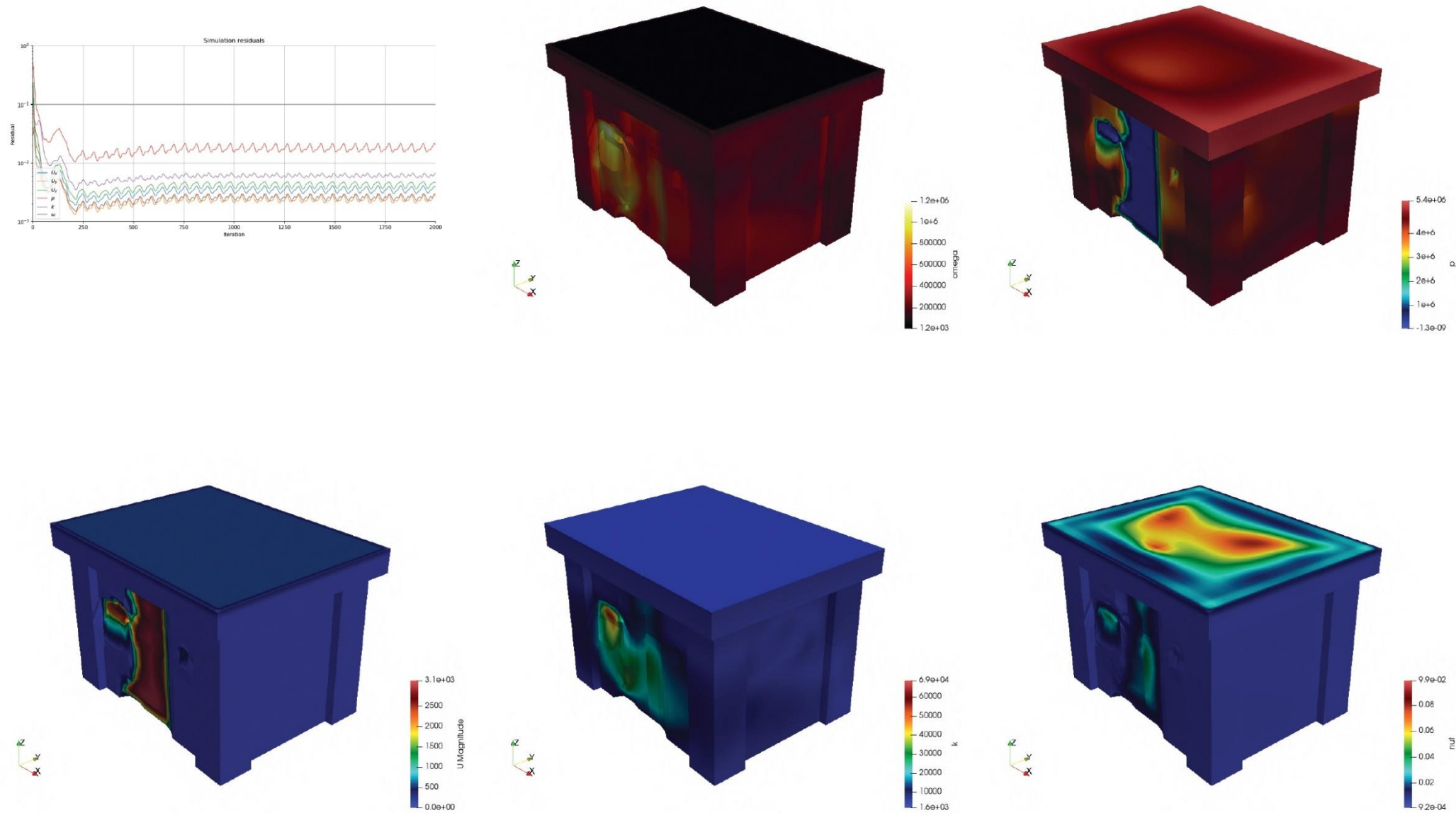
Edificio 46751 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46751 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 139: Resultado de la Simulación

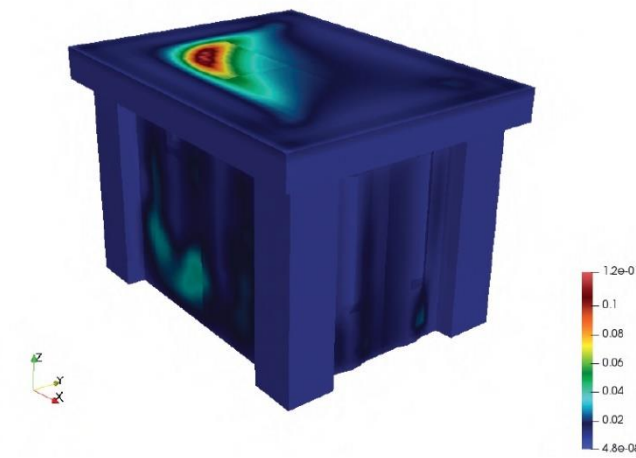
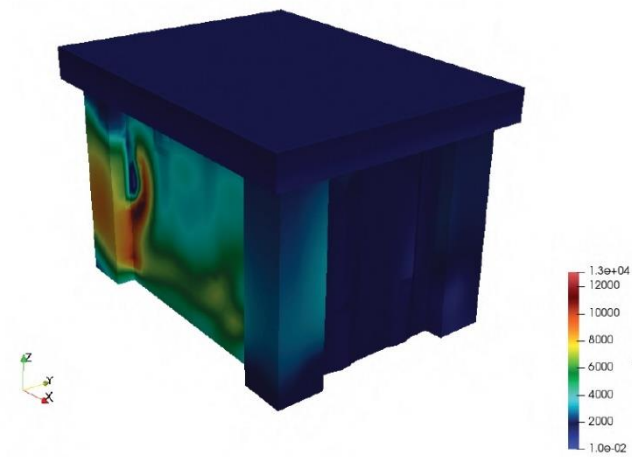
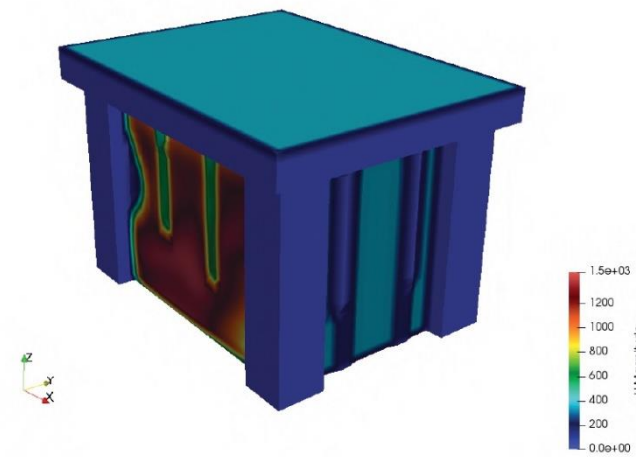
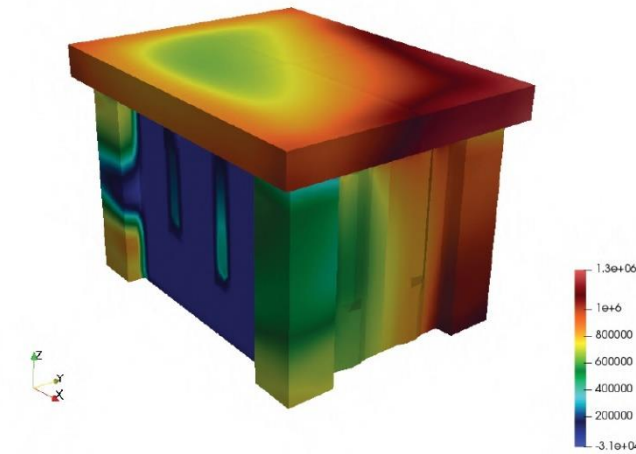
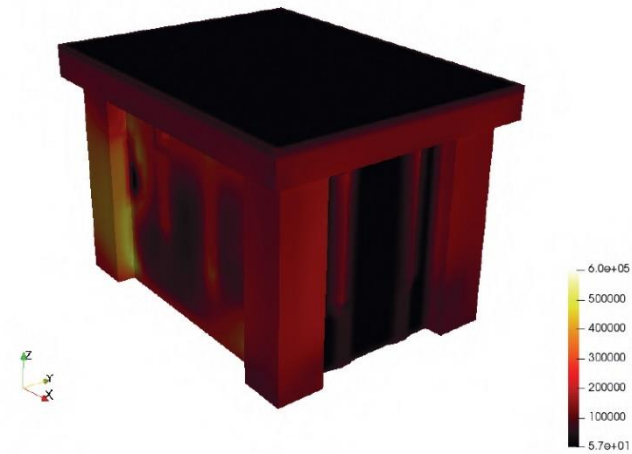
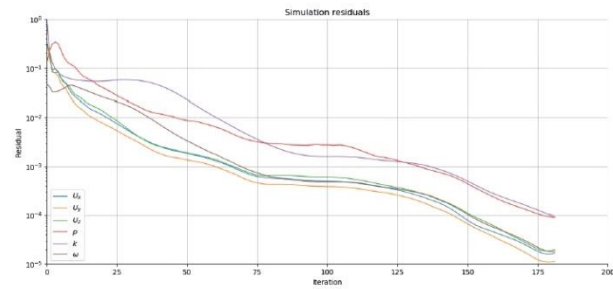
Edificio 46963 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46963 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 140: Resultado de la Simulación

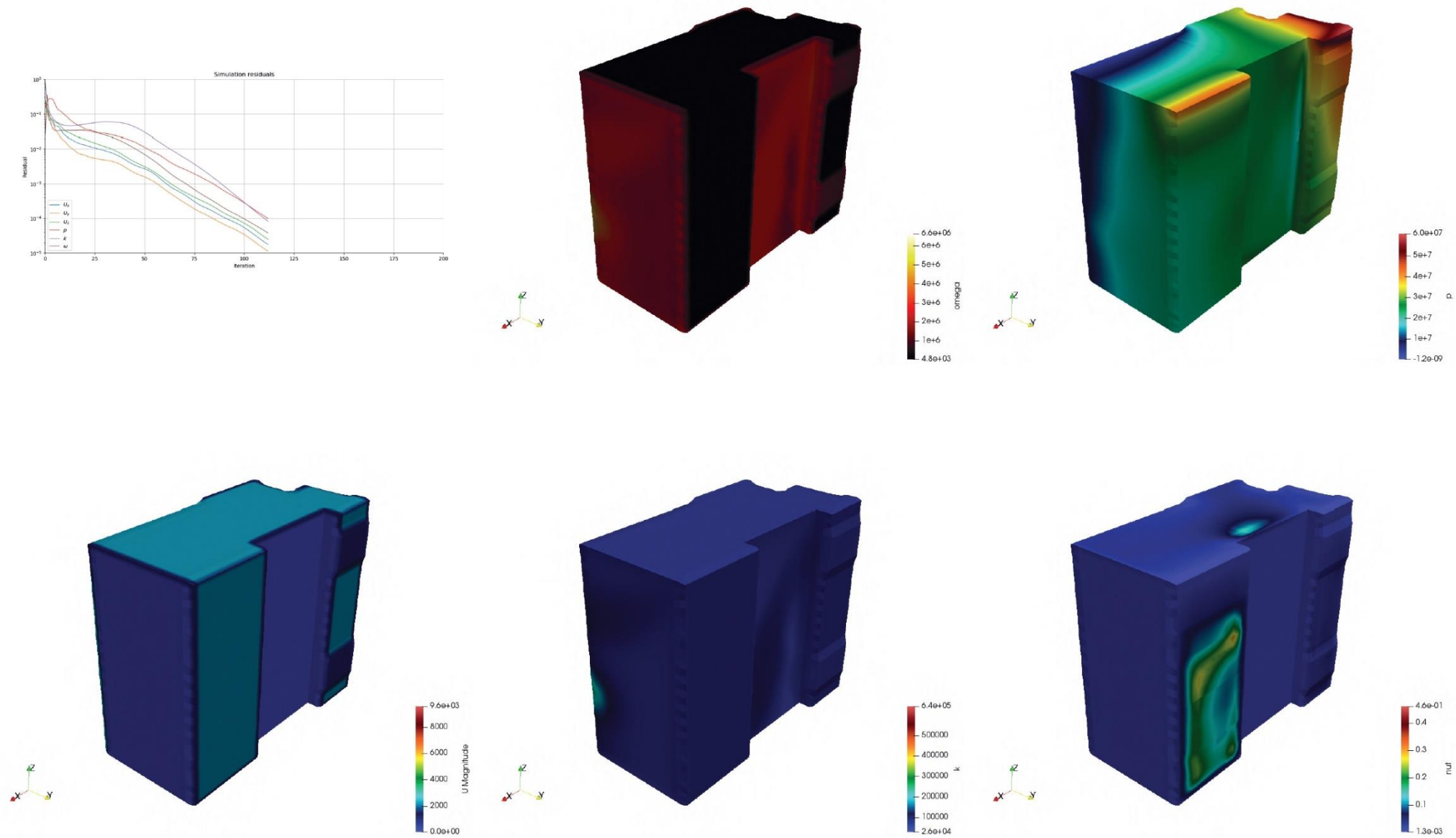
Edificio 46963 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 46963 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 141: Resultado de la Simulación

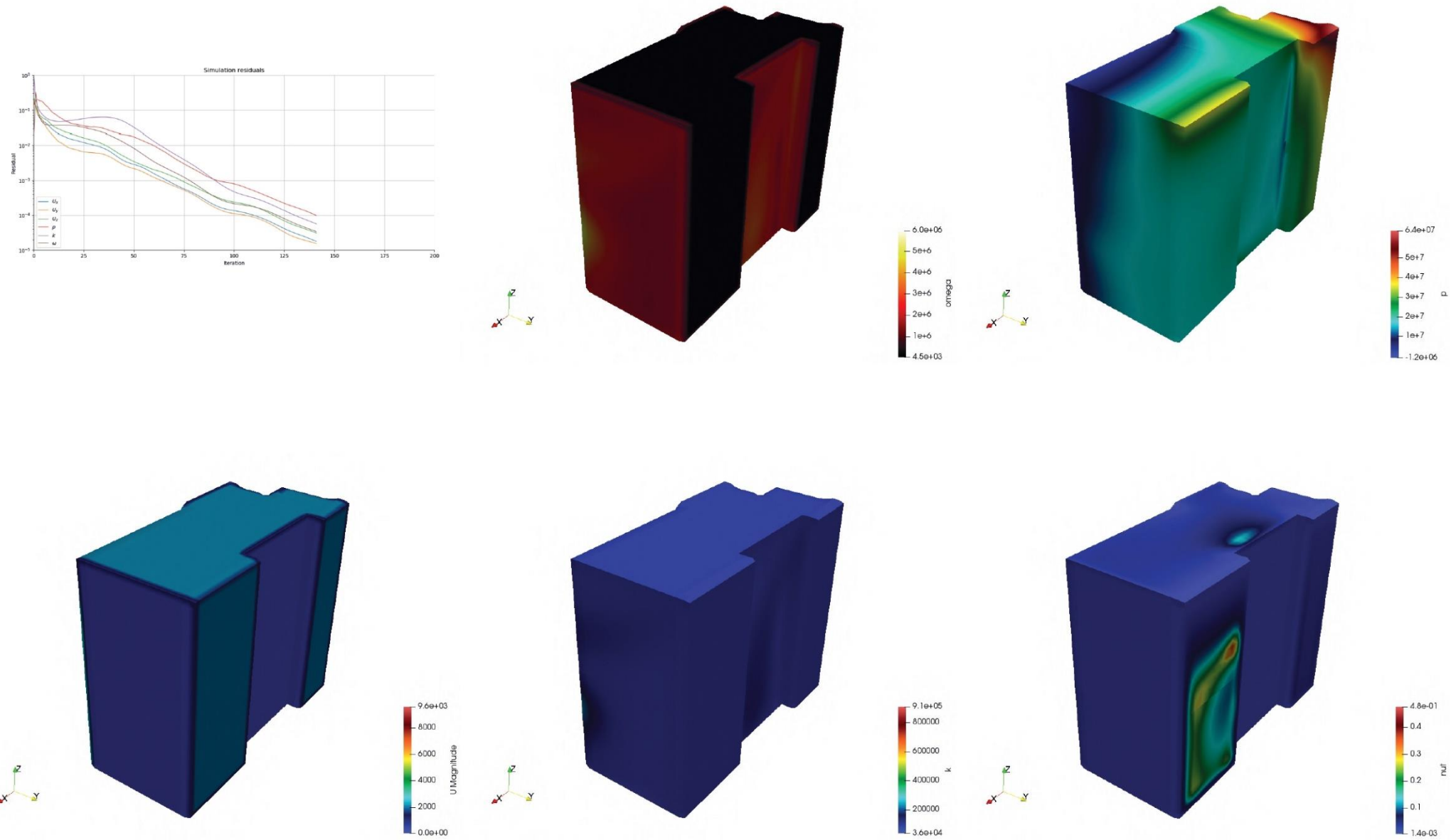
Edificio 50017 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 50017 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 142: Resultado de la Simulación

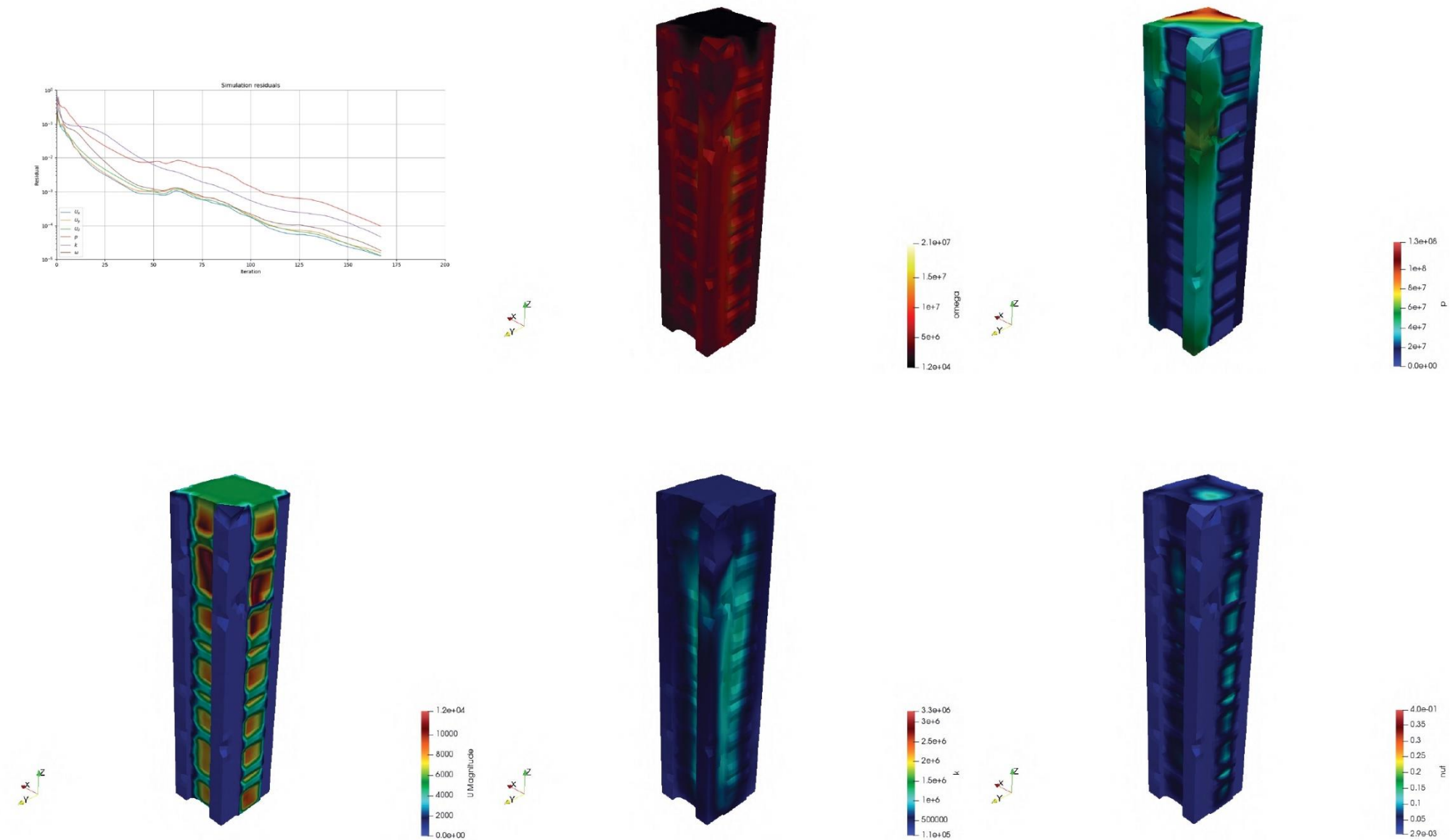
Edificio 50017 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50017 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 143: Resultado de la Simulación

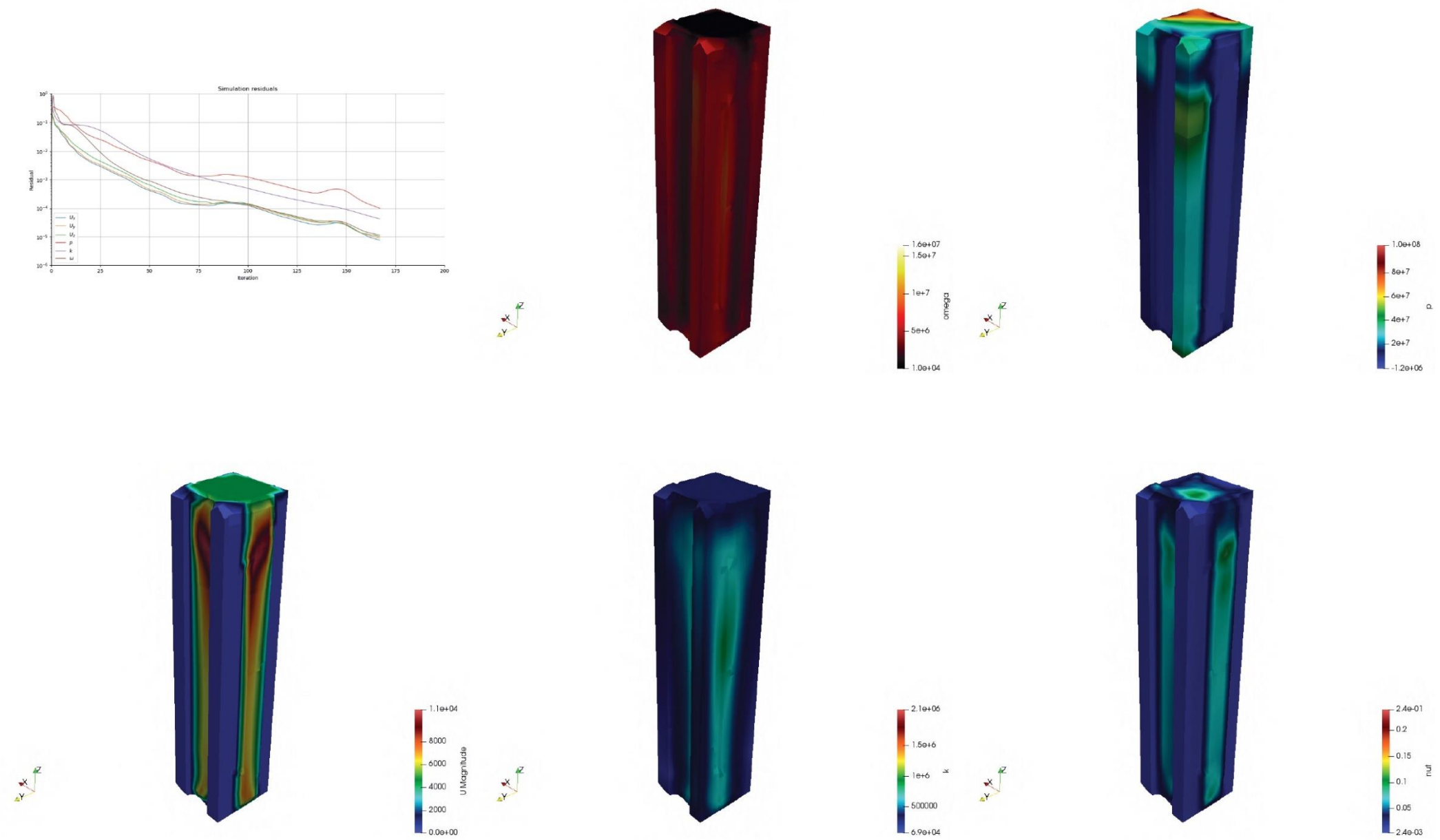
Edificio 50185 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50185 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 144: Resultado de la Simulación

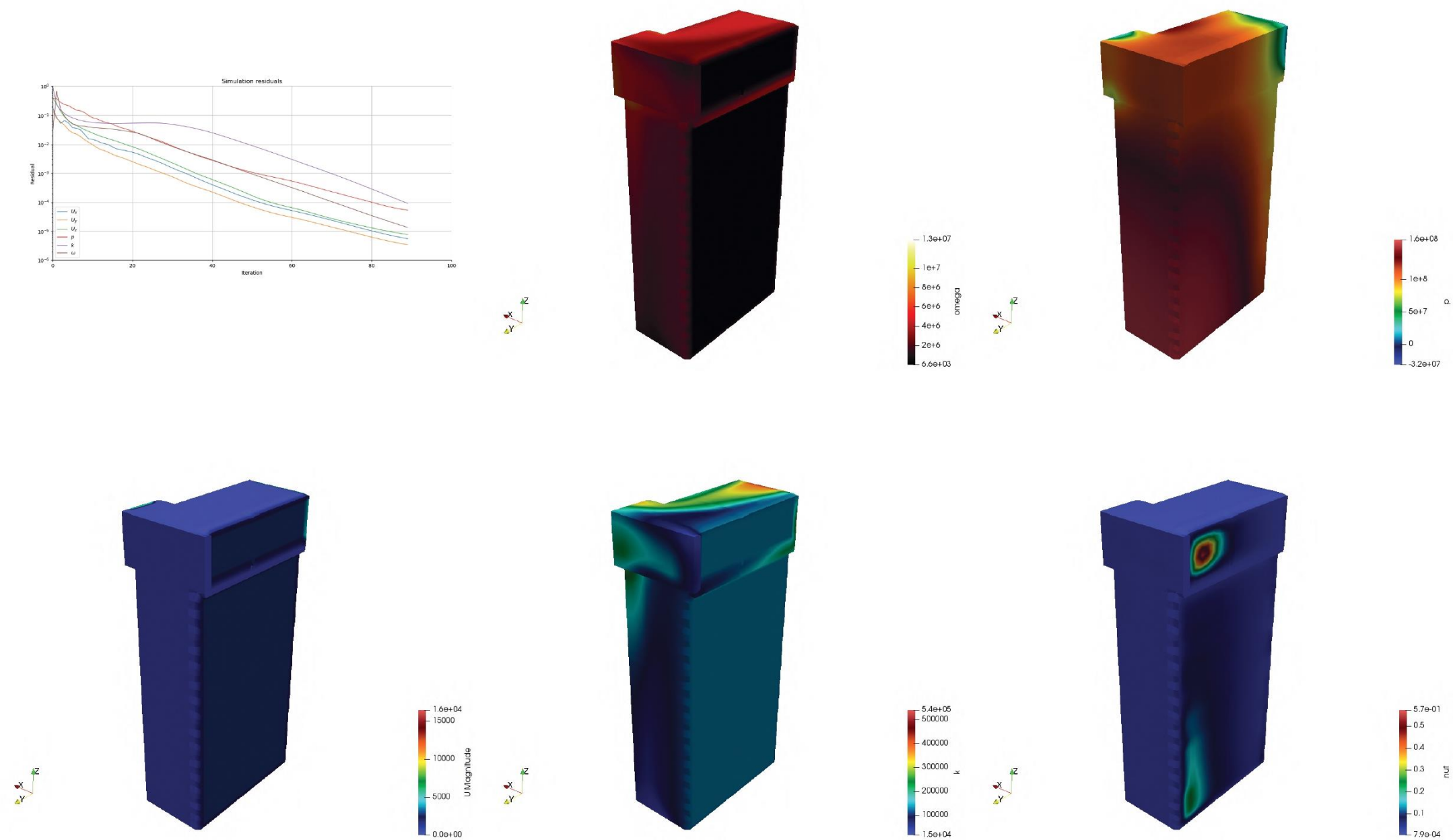
Edificio 50185 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 50185 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 145: Resultado de la Simulación

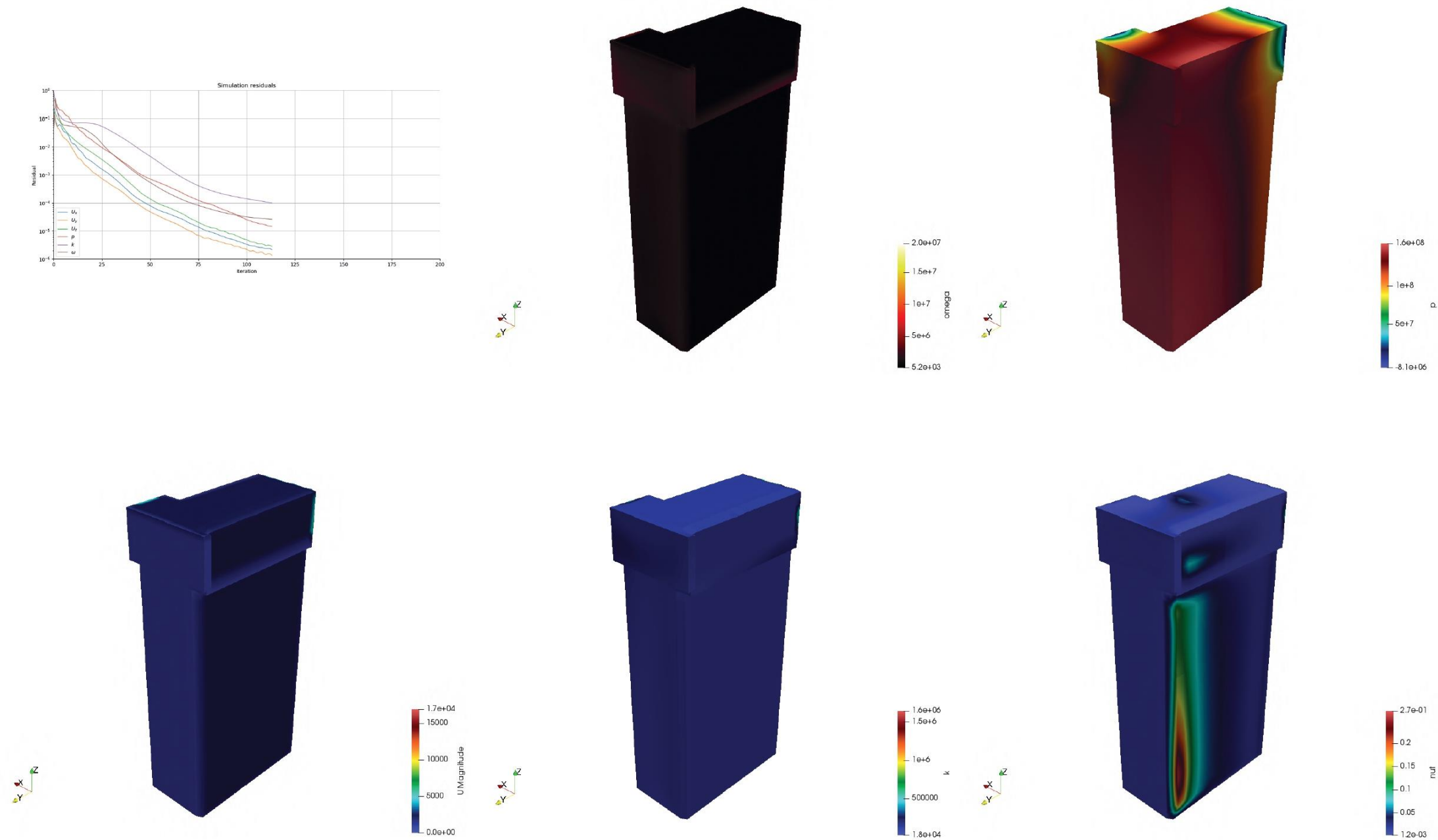
Edificio 50365 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación Edificio 50365 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 146: Resultado de la Simulación

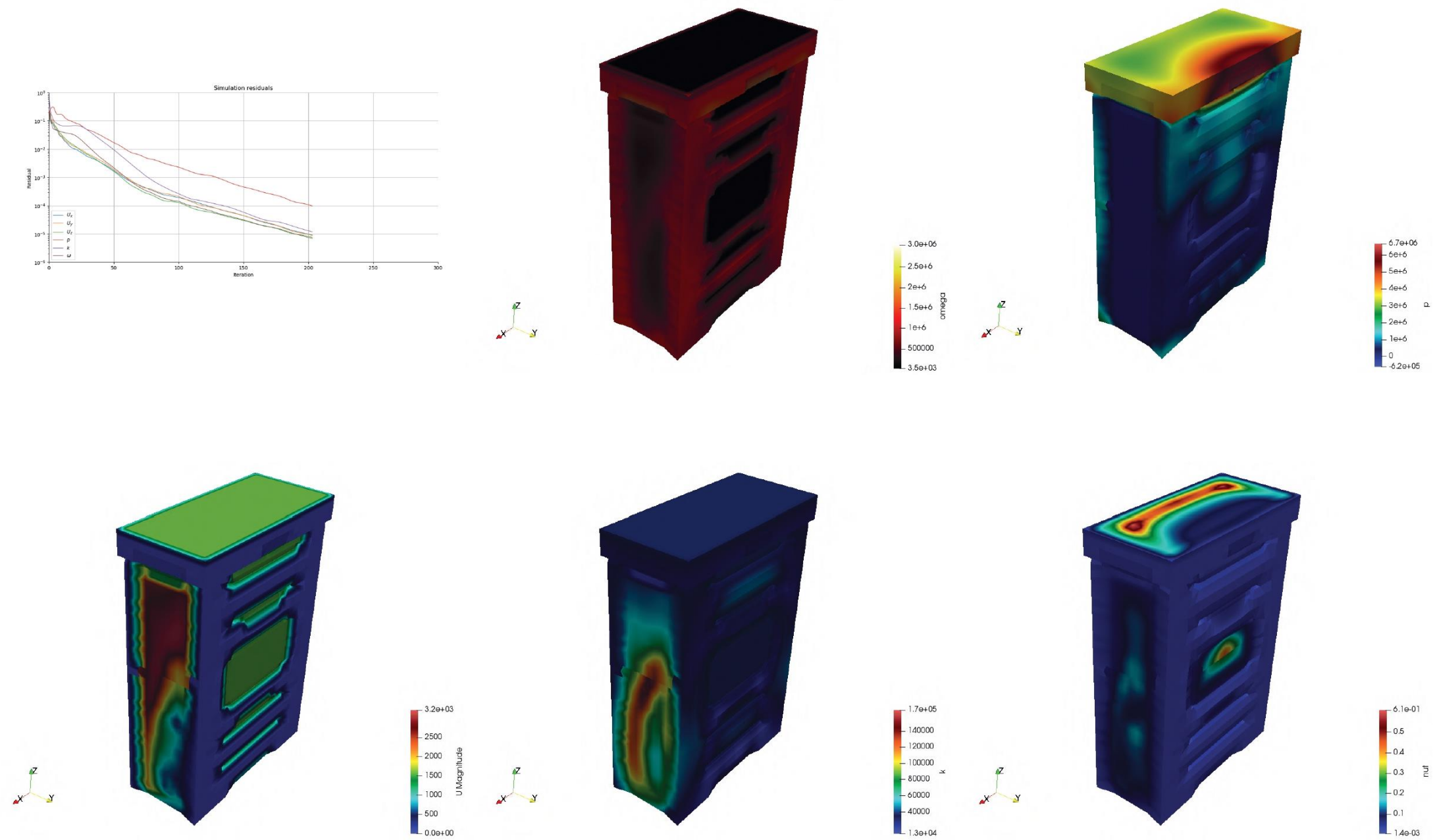
Edificio 50365 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50365 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 147: Resultado de la Simulación

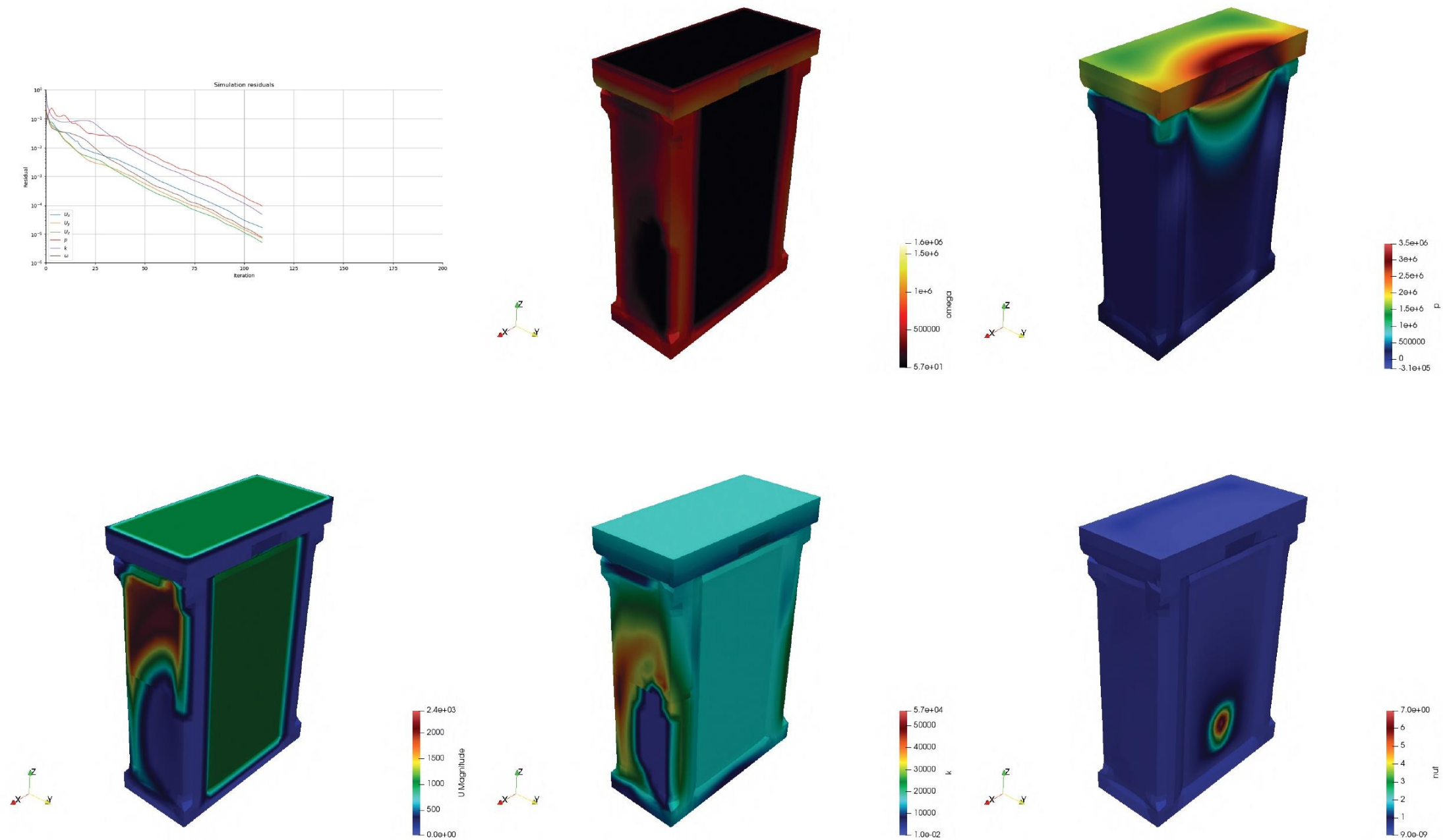
Edificio 50379 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50379 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 148: Resultado de la Simulación

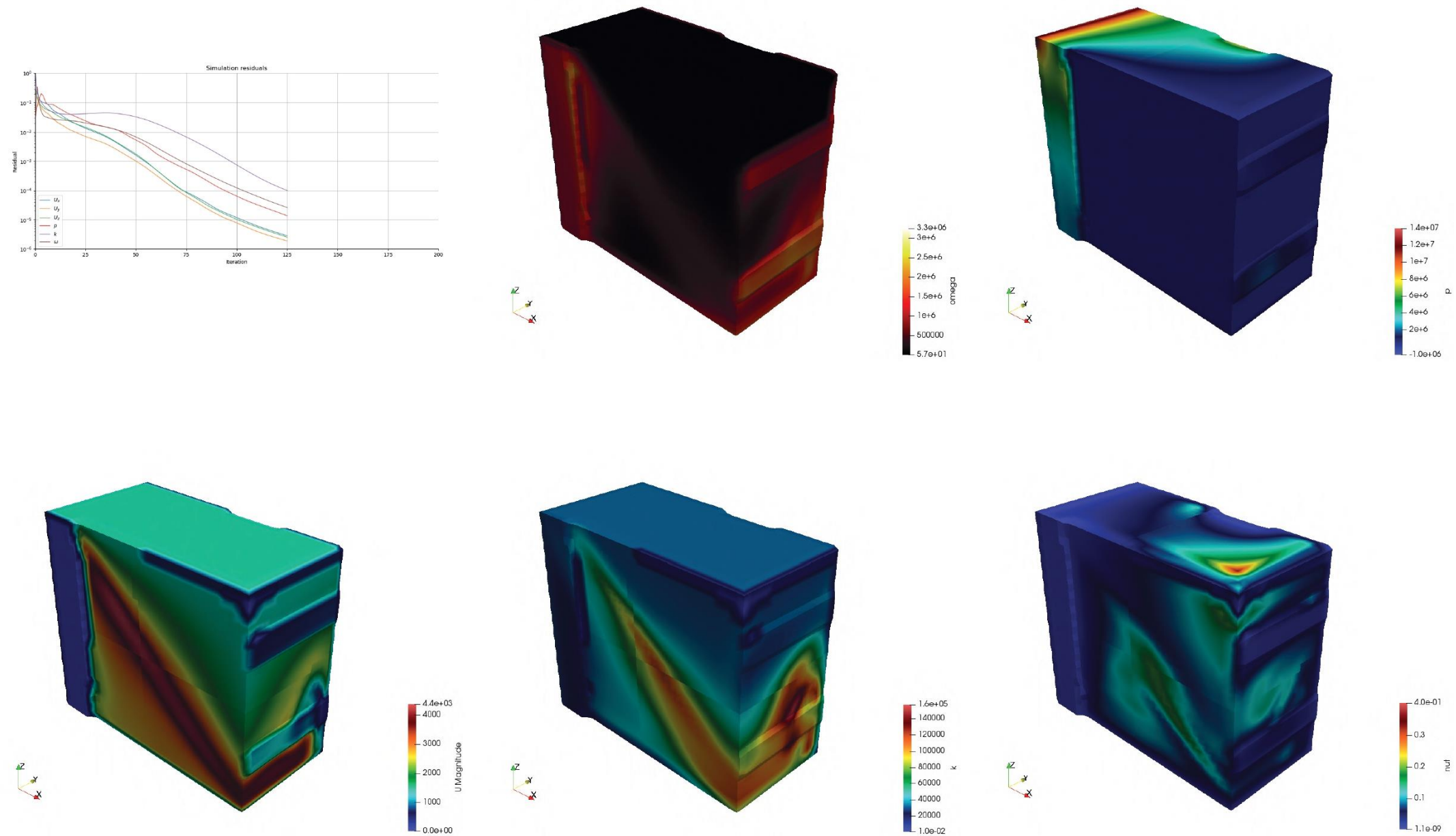
Edificio 50379 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 50379 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 149: Resultado de la Simulación

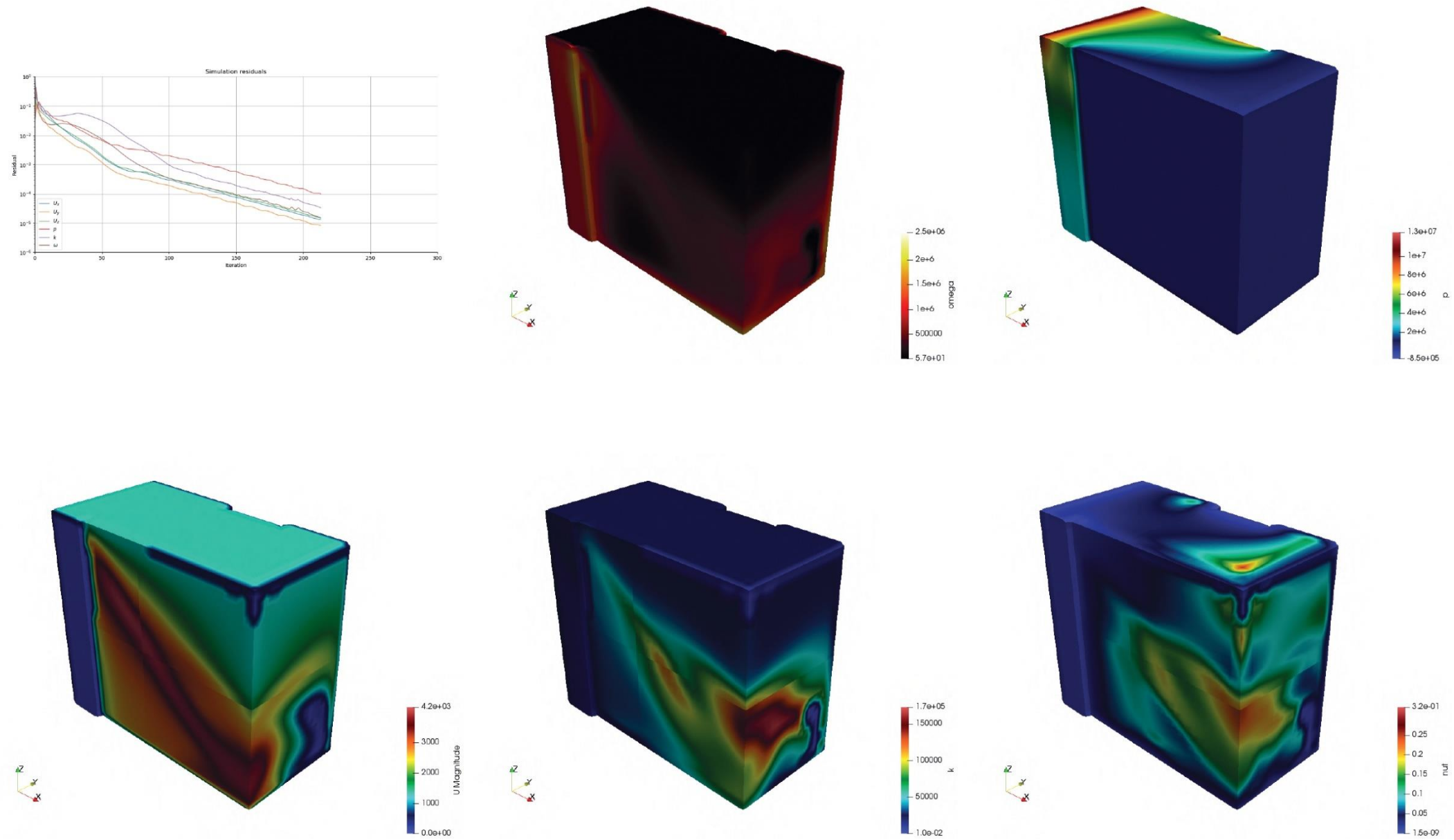
Edificio 59149 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 59149 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 150: Resultado de la Simulación

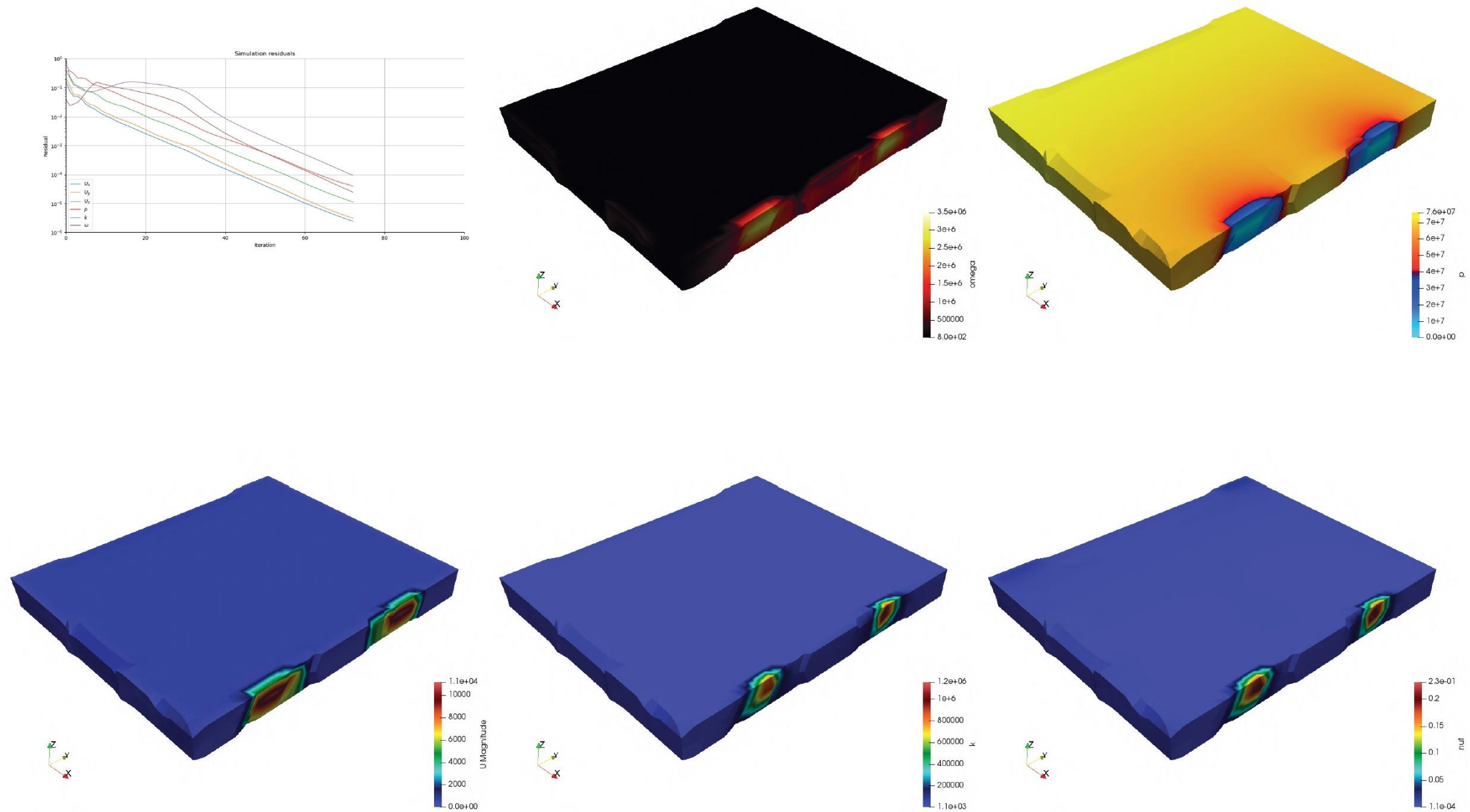
Edificio 59149 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 59149 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 151: Resultado de la Simulación

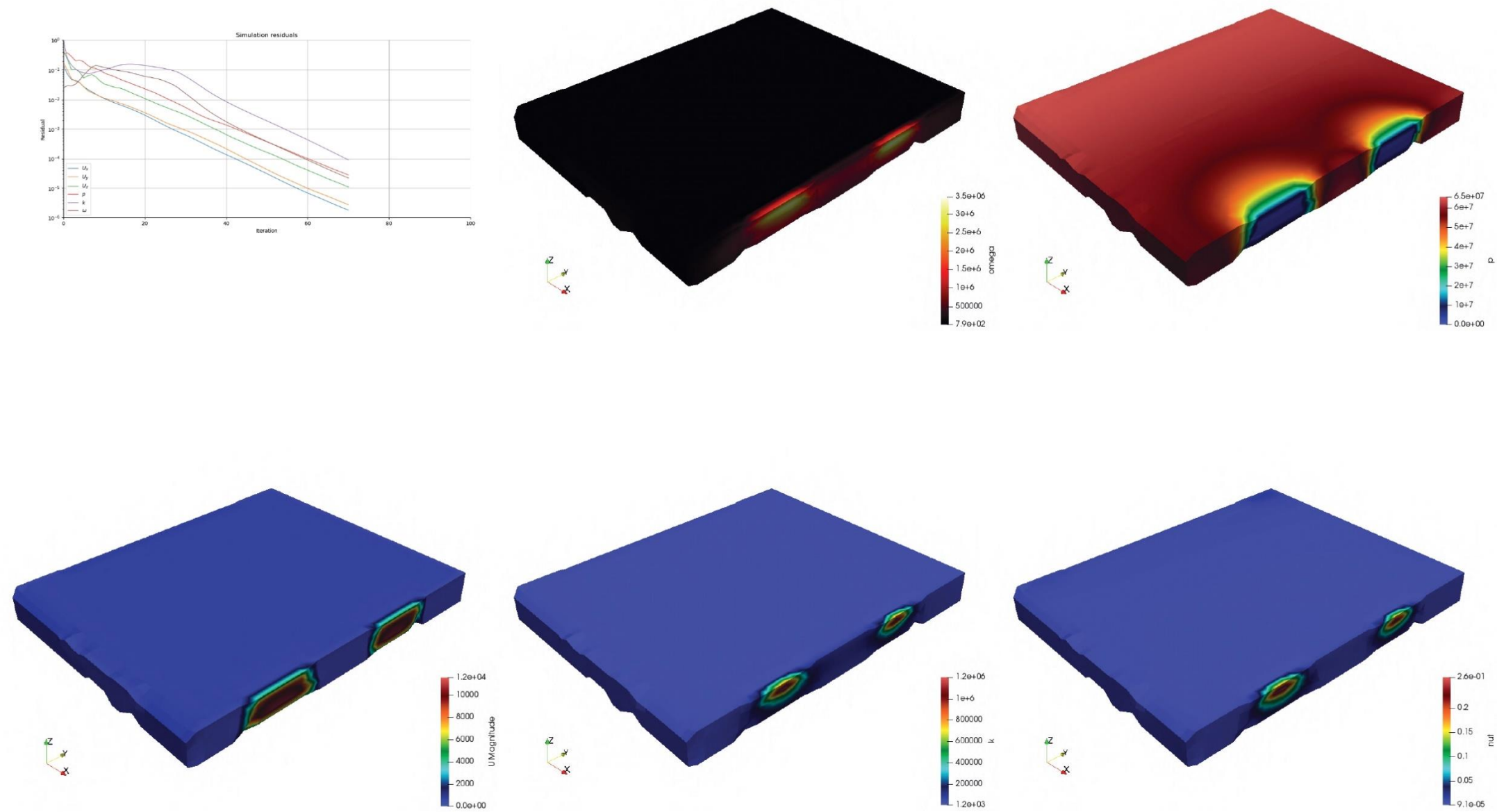
Edificio 85749 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 85749 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 152: Resultado de la Simulación

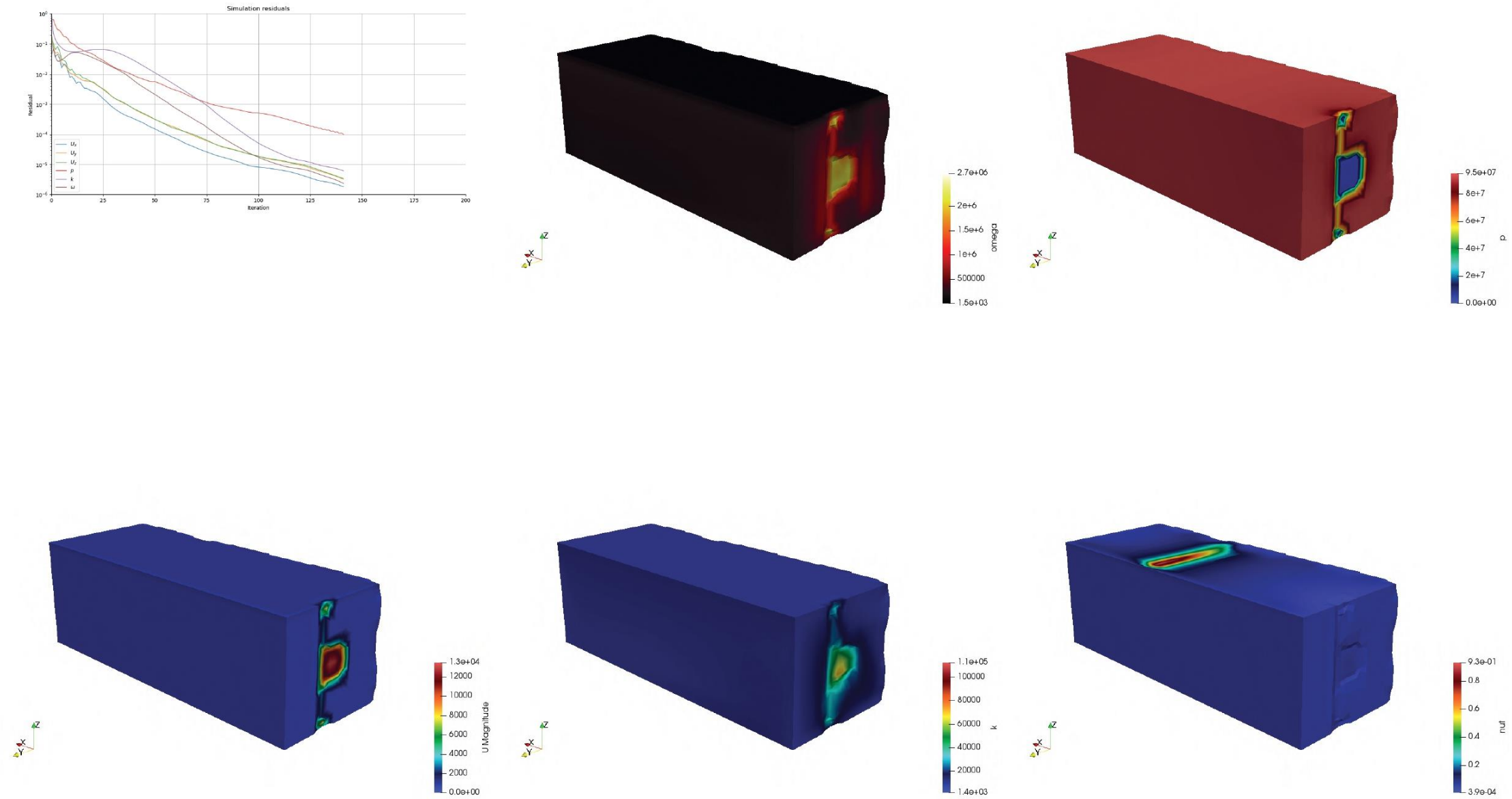
Edificio 85749 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 85749 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 153: Resultado de la Simulación

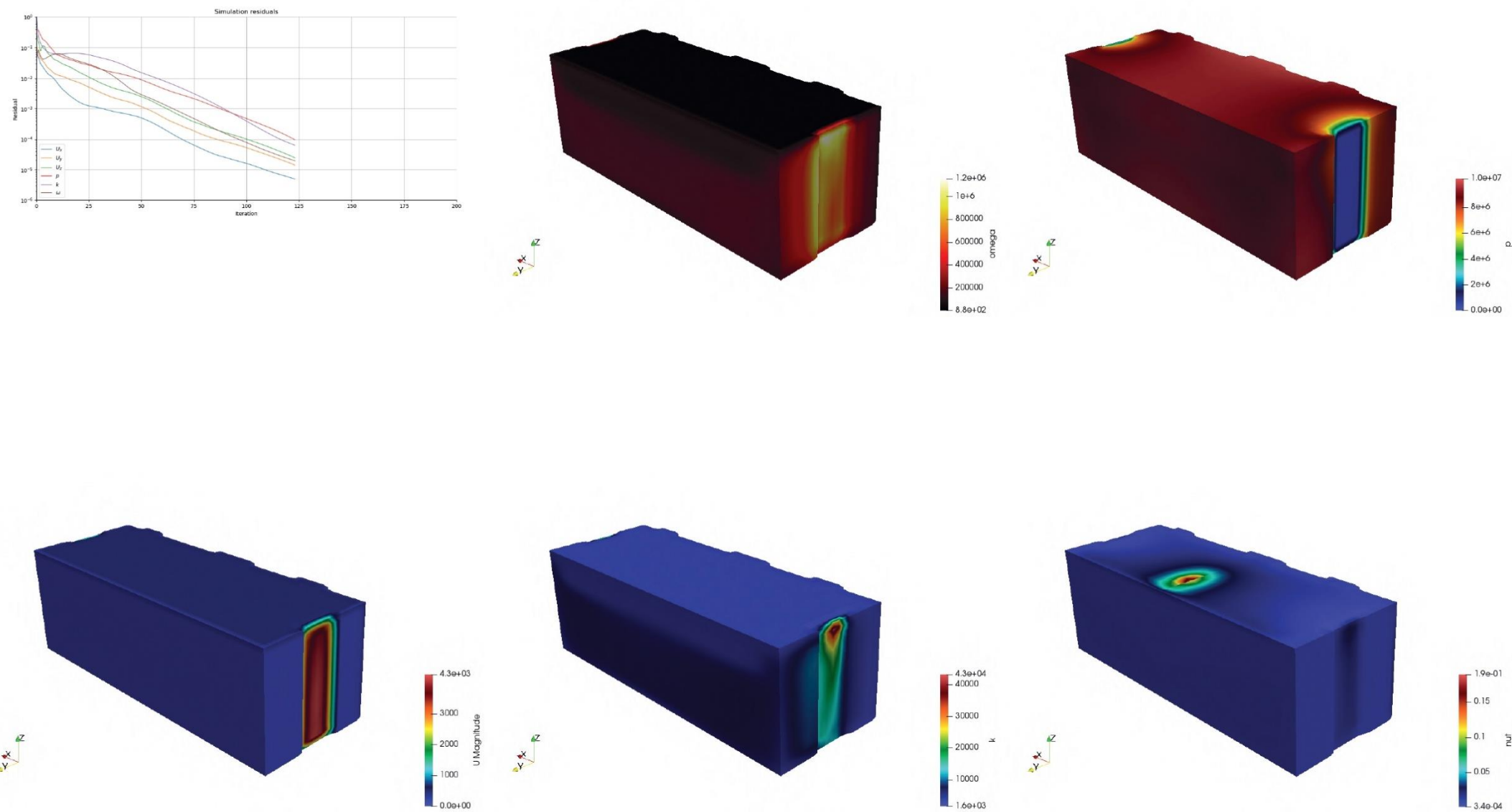
Edificio 86198 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 86198 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 154: Resultado de la Simulación

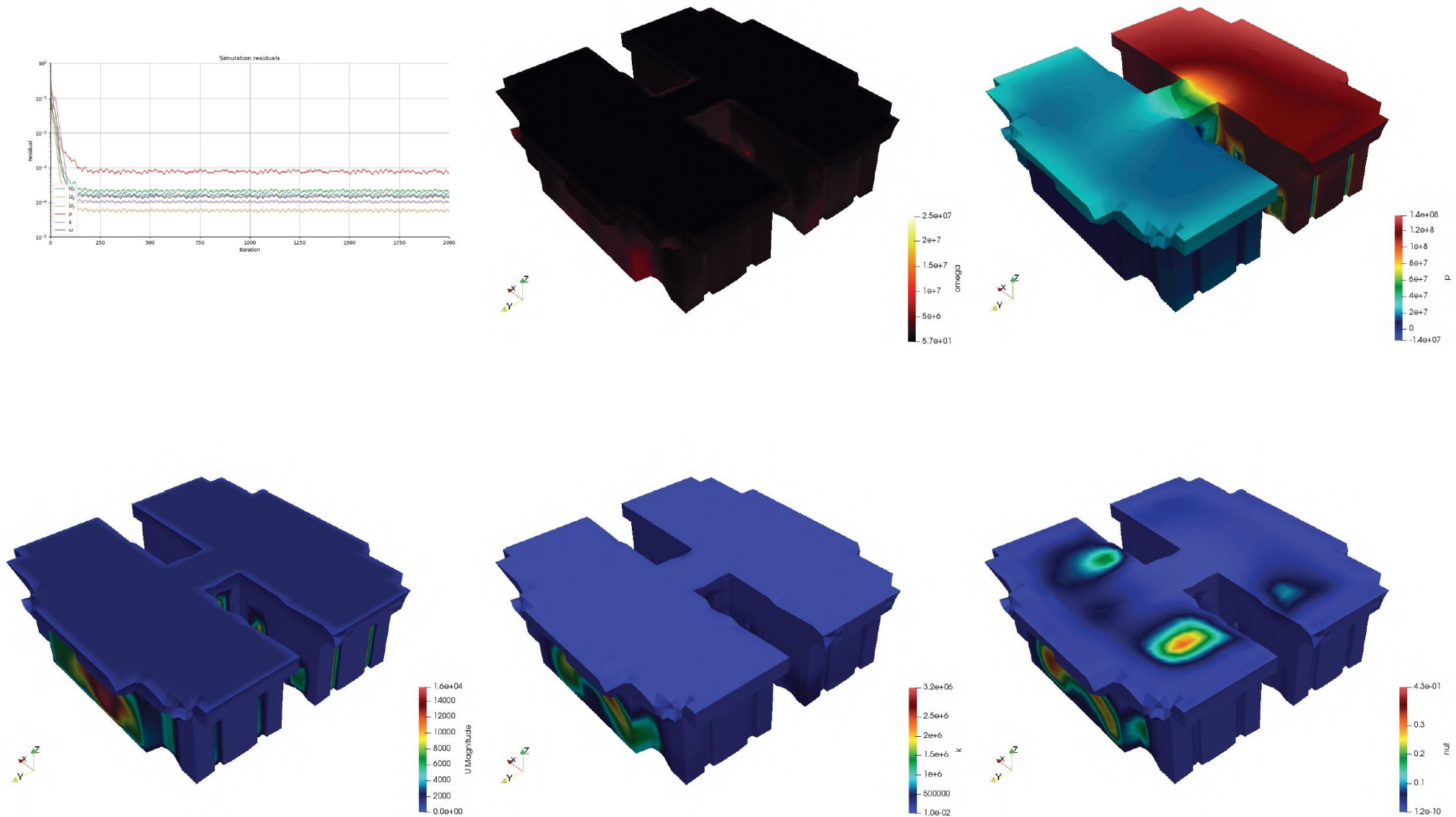
Edificio 86198 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 86198 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 155: Resultado de la Simulación

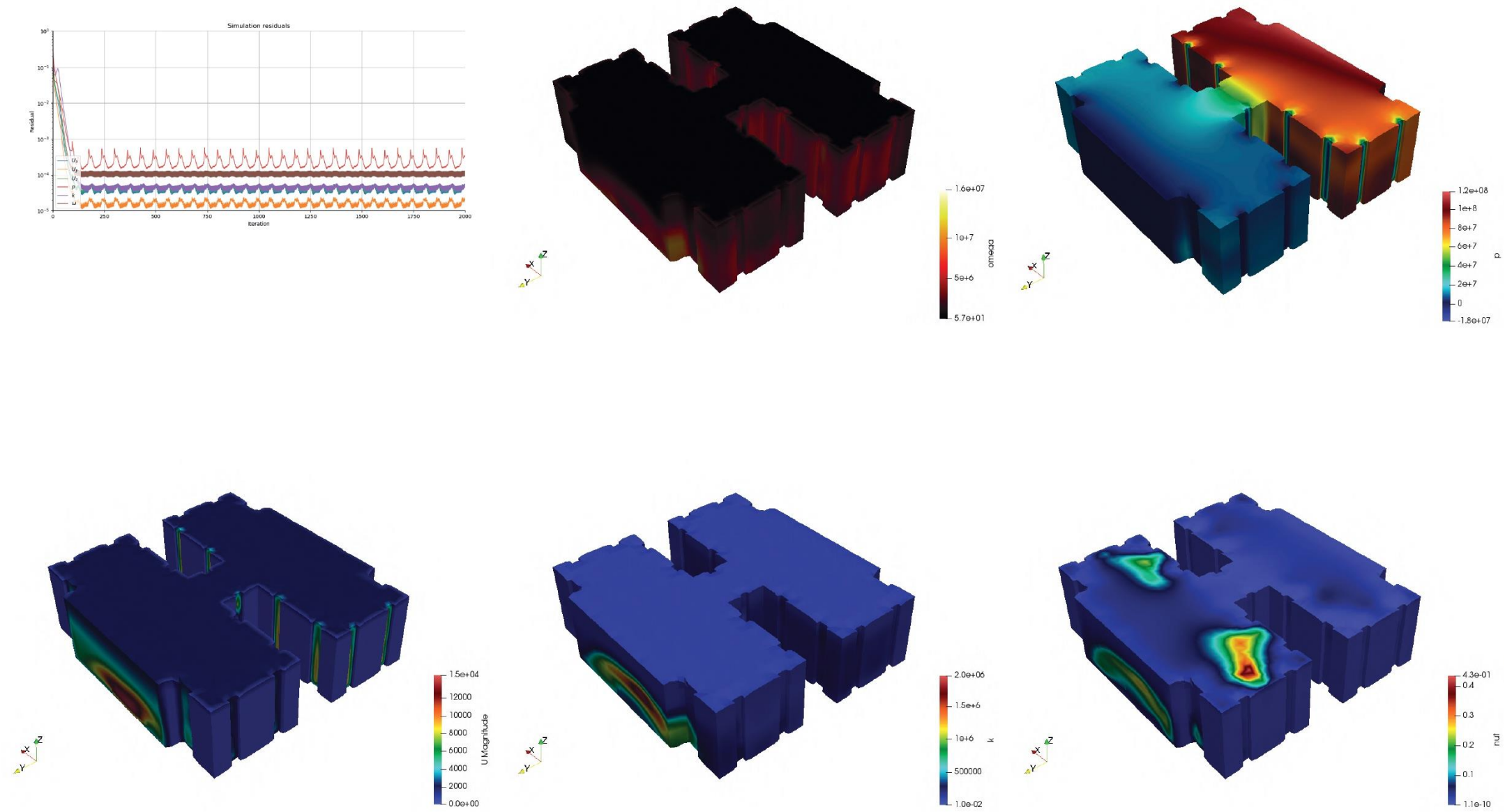
Edificio 138940 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 138940 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 156: Resultado de la Simulación

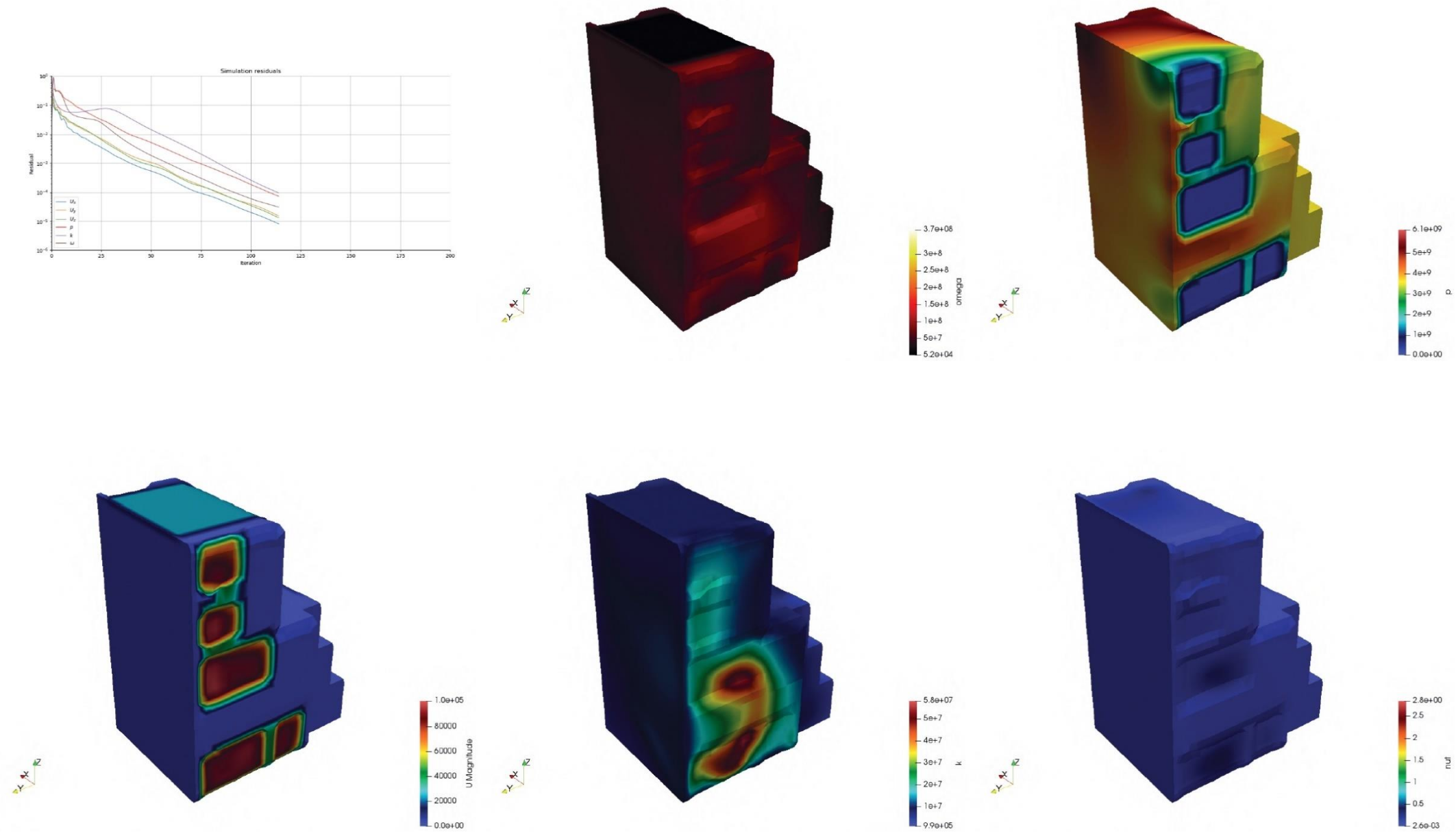
Edificio 138940 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 138940 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 157: Resultado de la Simulación

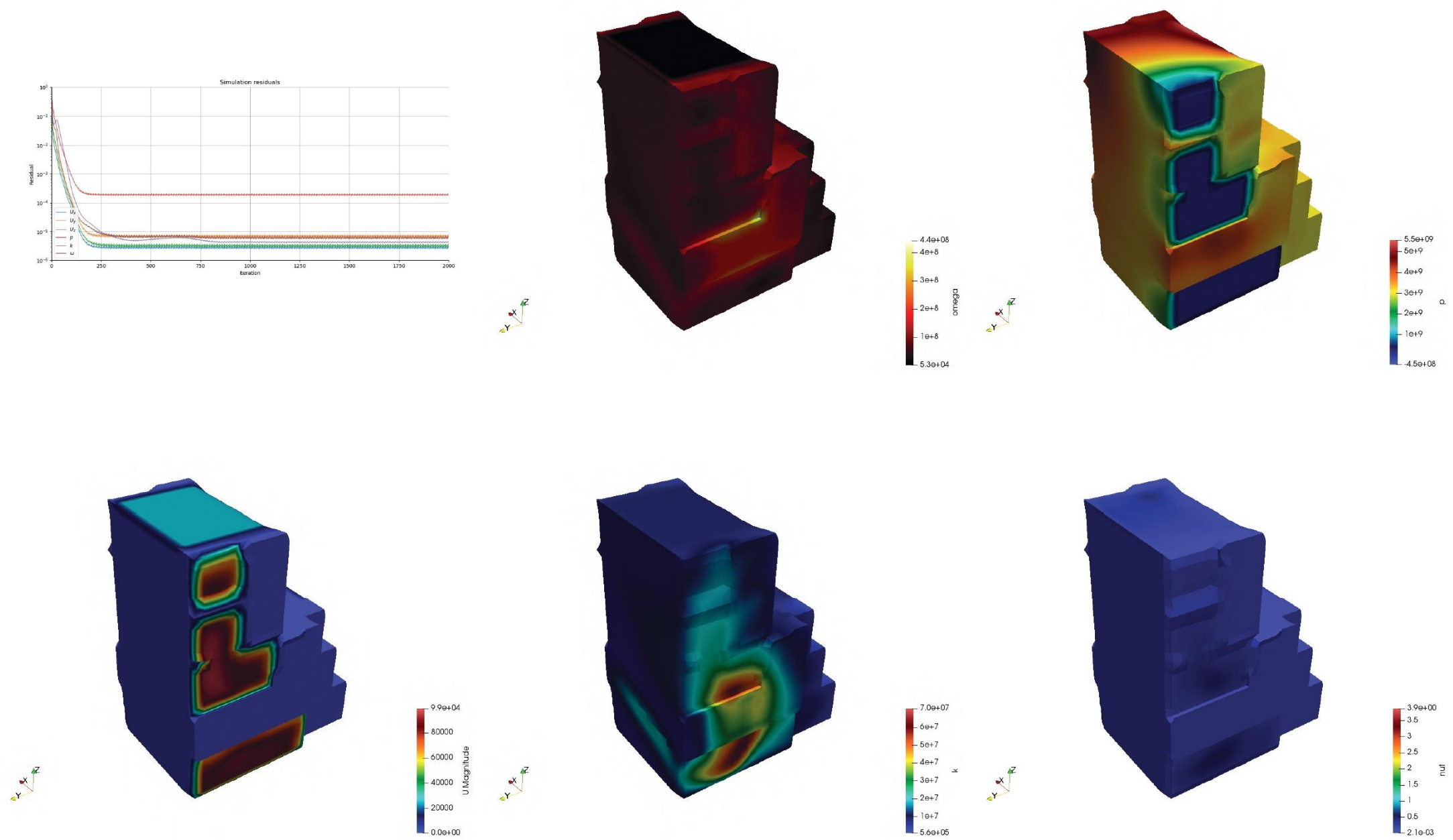
Edificio 239336 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 239336 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 158: Resultado de la Simulación

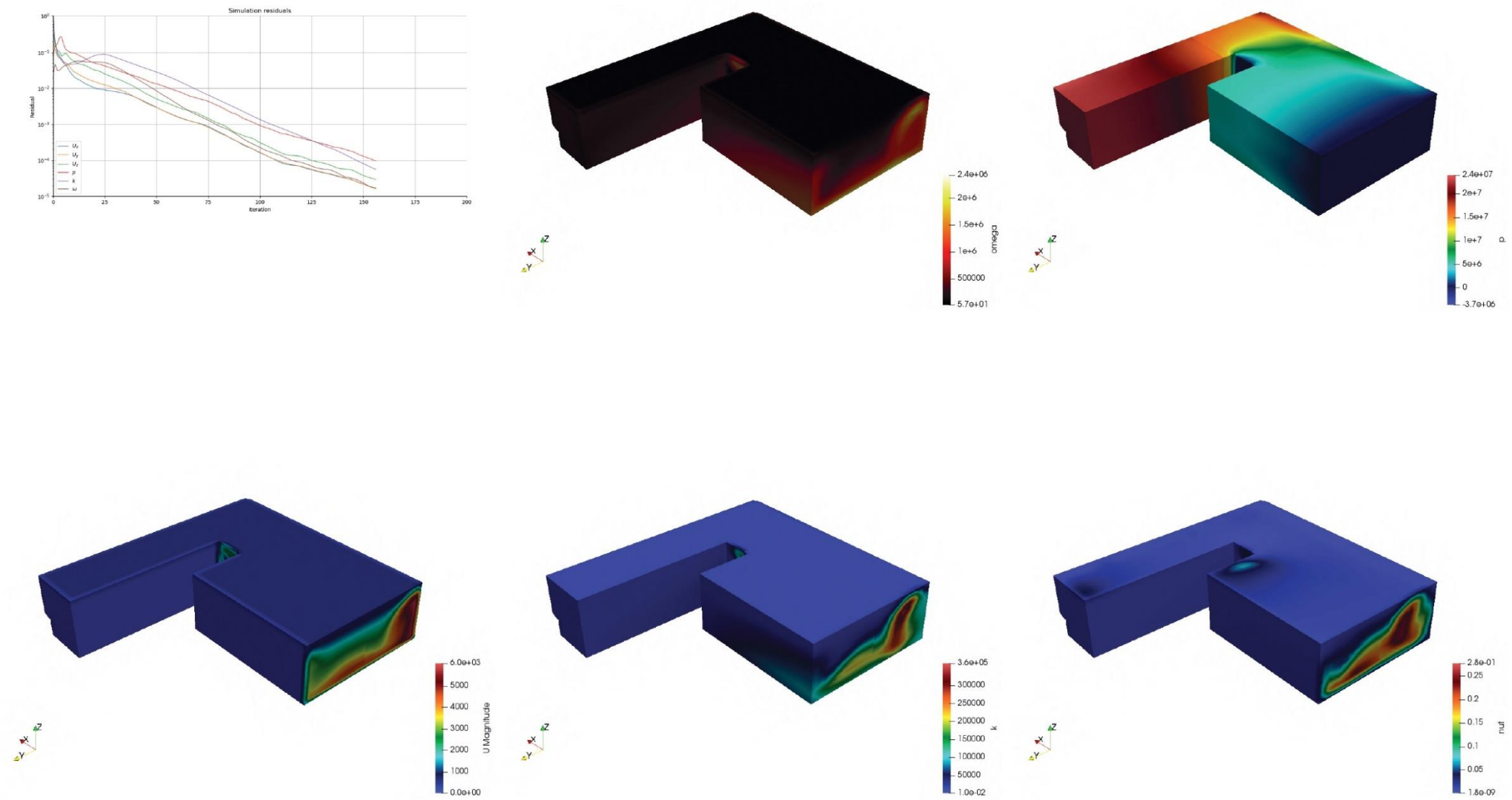
Edificio 239336 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 239336 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 159: Resultado de la Simulación

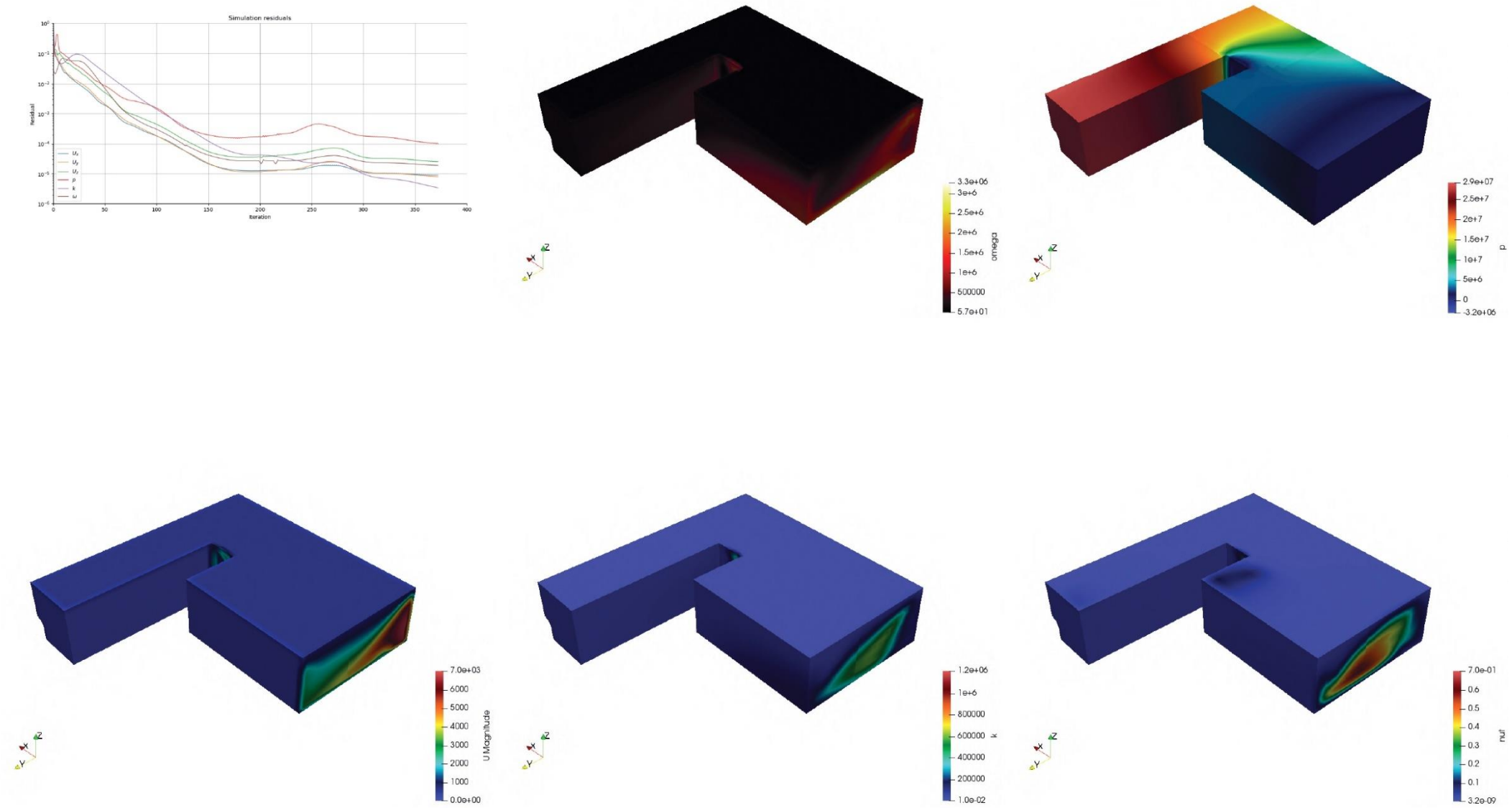
Edificio 383610 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 383610 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 160: Resultado de la Simulación

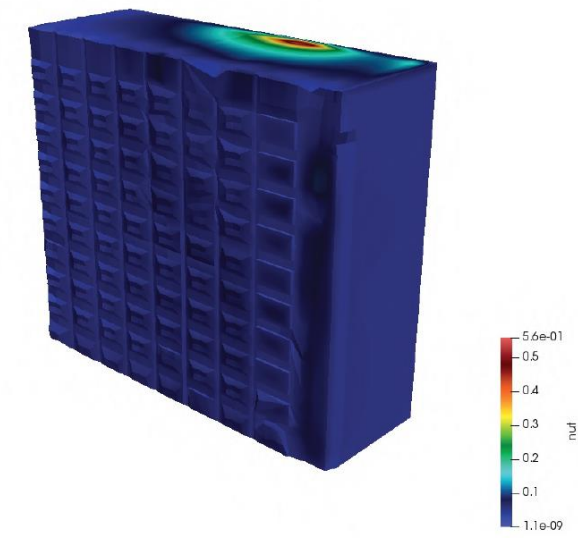
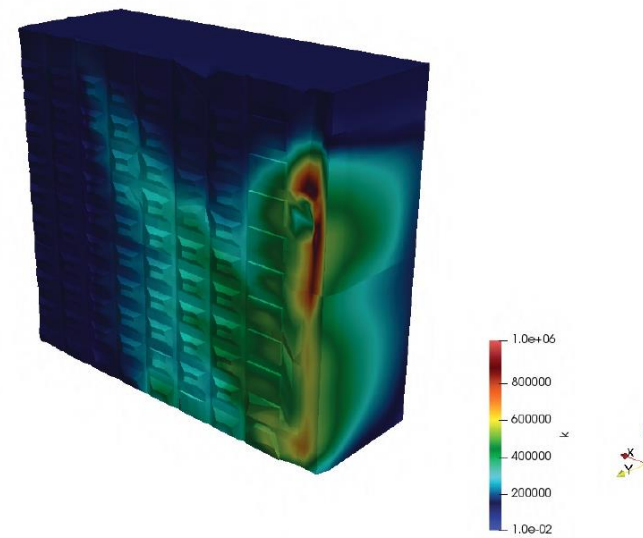
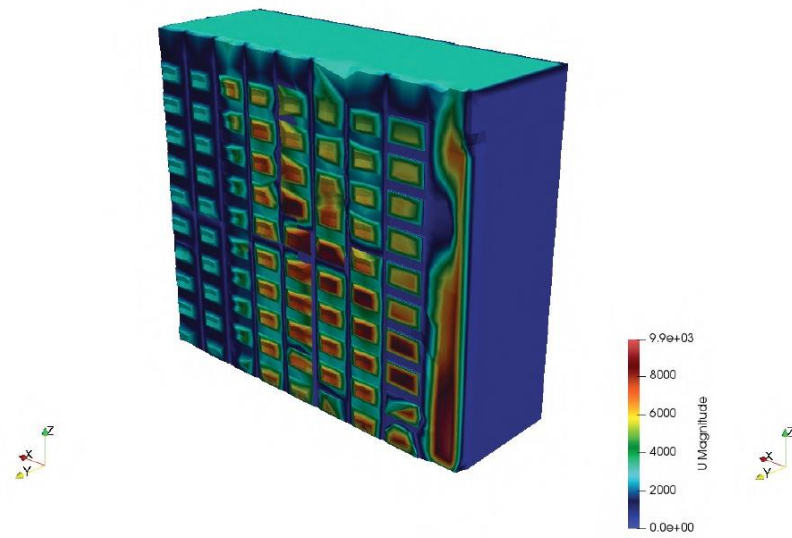
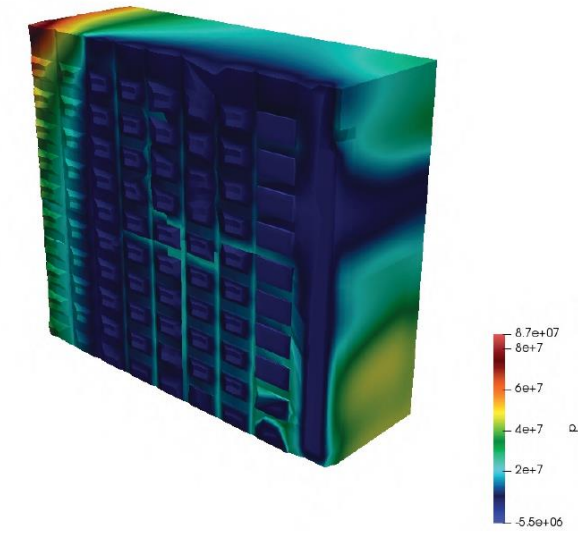
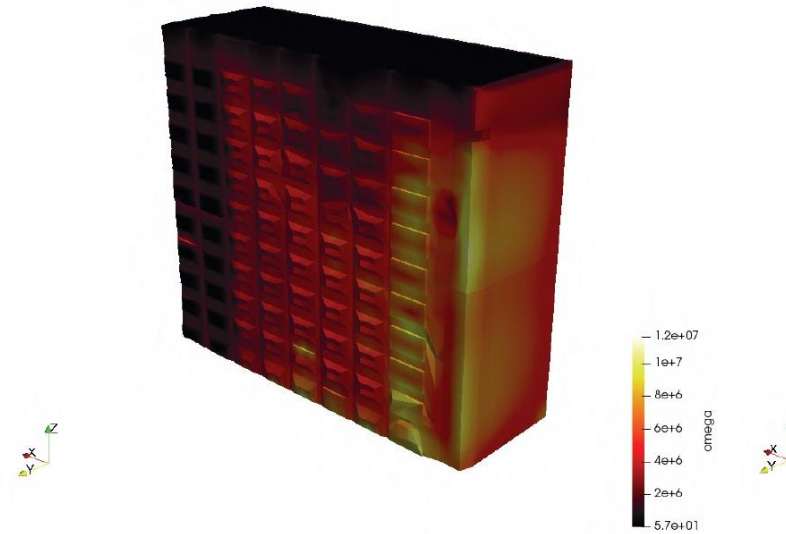
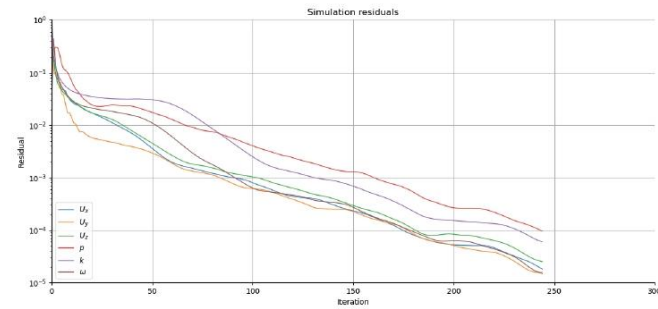
Edificio 383610 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 383610 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 161: Resultado de la Simulación

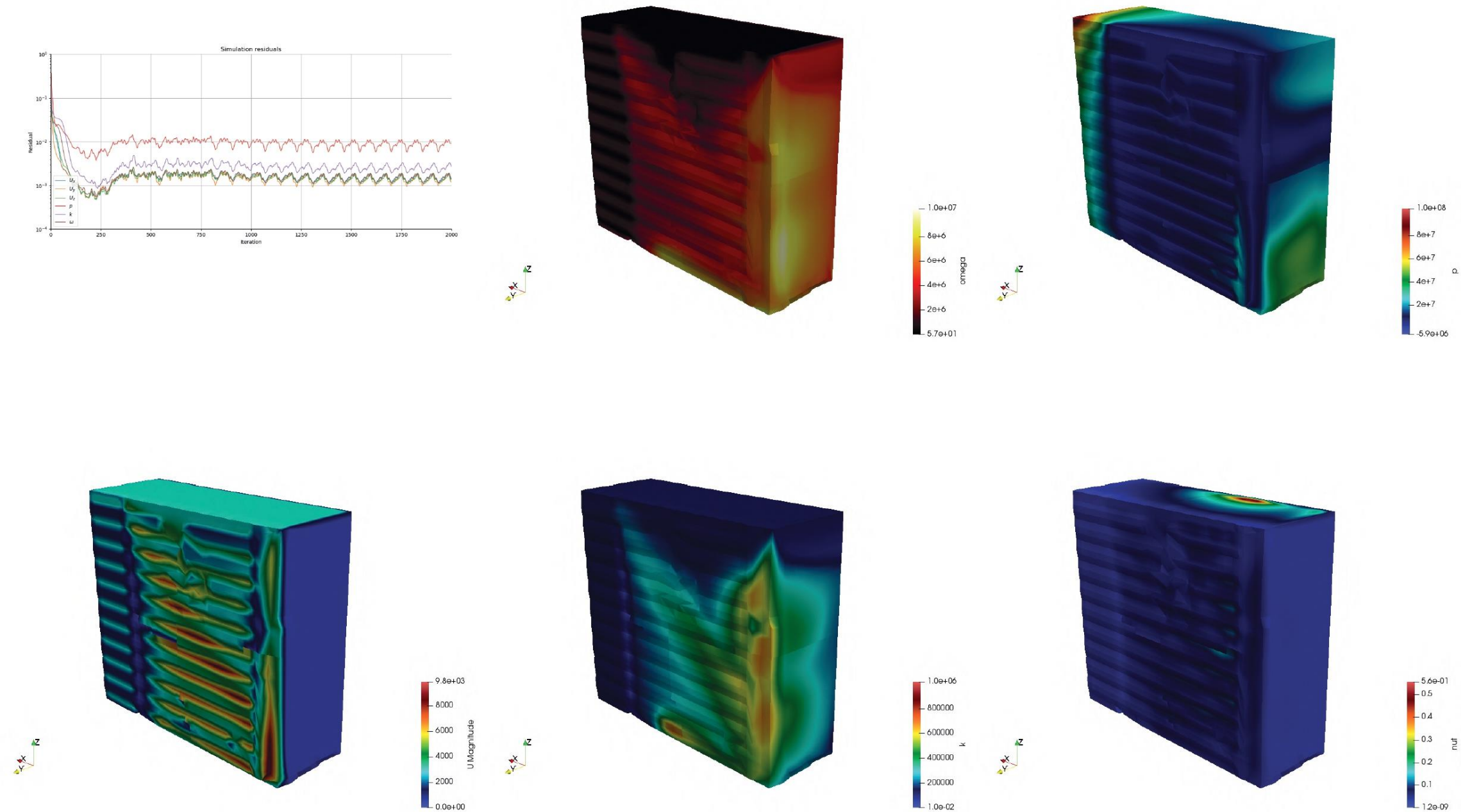
Edificio 384322 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384322 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 162: Resultado de la Simulación

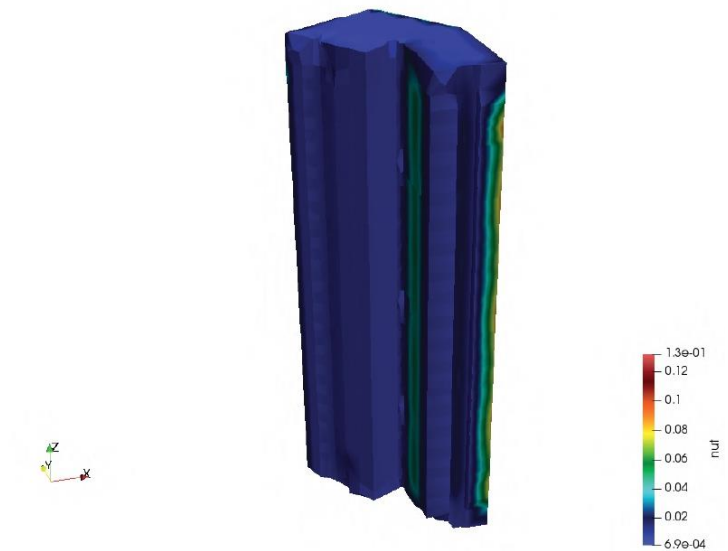
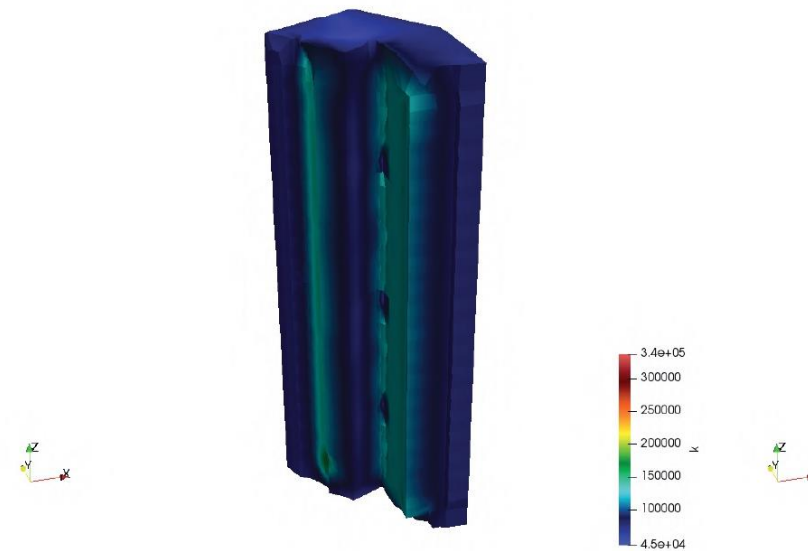
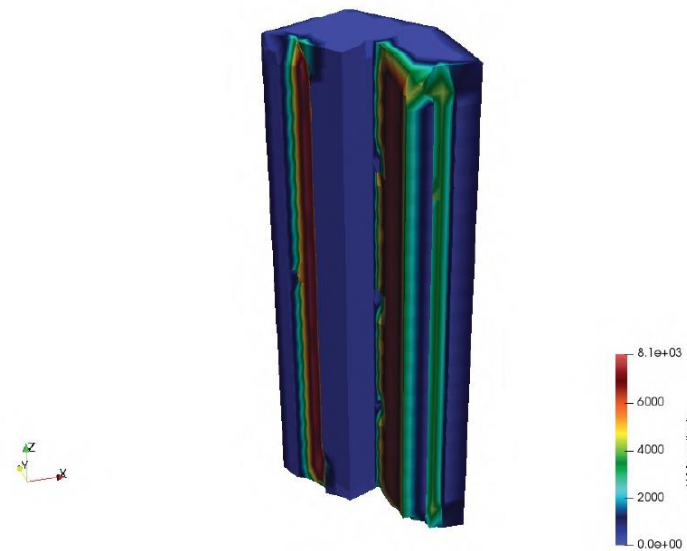
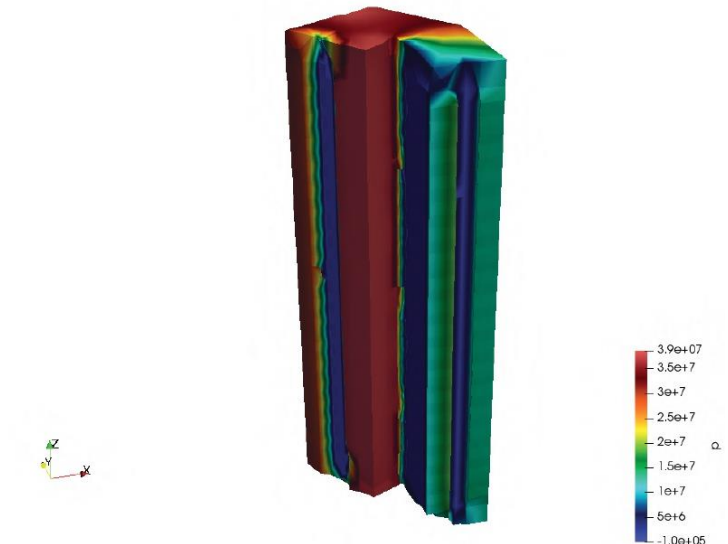
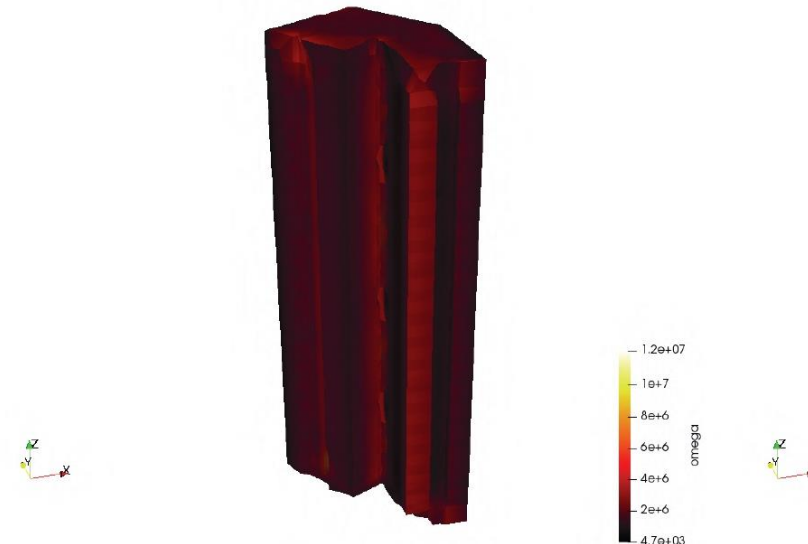
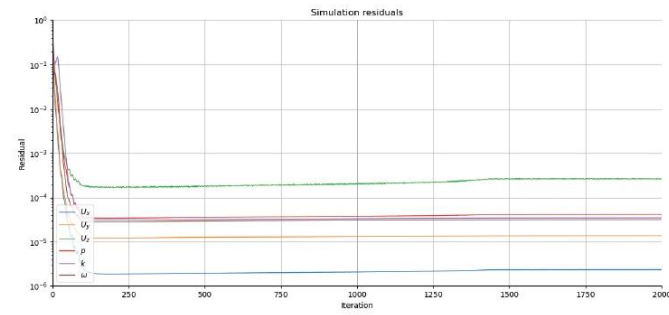
Edificio 384322 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384322 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 163: Resultado de la Simulación

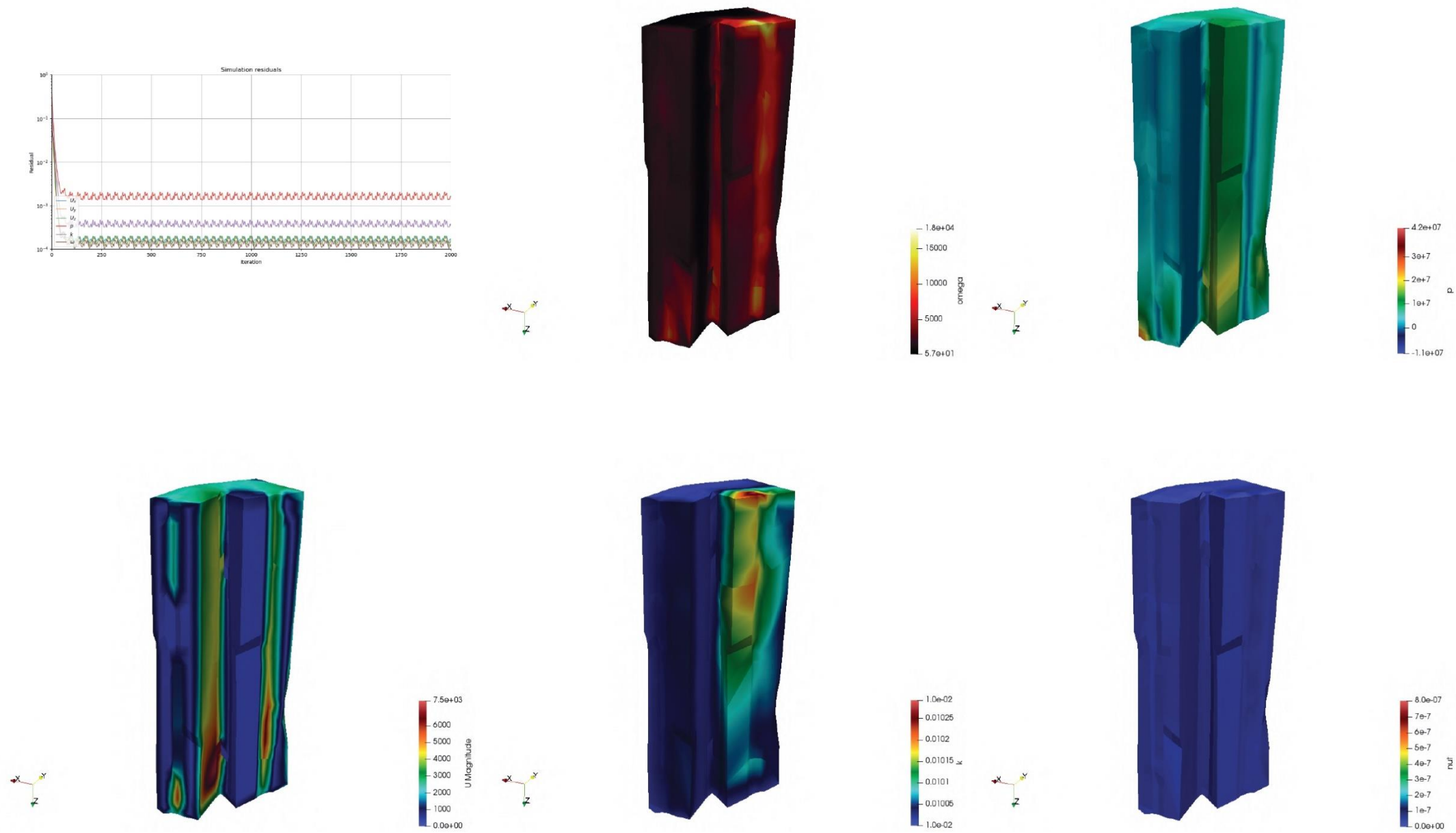
Edificio 384337 Simulación Resultado Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384337 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Gráfico 164: Resultado de la Simulación

Edificio 384337 Simulación Resultado no Óptimo



Fuente: Resultado de la Simulación del Edificio 384337 en Referencia a los Resultados Obtenidos de la Fuente (Bandi, 2013)

Bibliografía

- Abuín, J. R. (2017). *humanidades.cchs.csic.es*. Obtenido de Regresión Lineal Múltiple : http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutorial/es/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf
- Agencia Ecológica Urbana de Barcelona . (Diciembre 2010). *Plan de Indicadores de Sostenibilidad Urbana de Victoria - Gasteiz*. Barcelona : Agencia Ecológica Urbana de Barcelona y Departamento de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Victoria - Gasteiz.
- ARCONEL Agencia de Regulación y Control de Electricidad . (2017). <https://www.regulacionelectrica.gob.ec>. Obtenido de Consumo Anual Per Cápita: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/recaudacion-anual/>
- Bandi, E. K. (Septiembre de 2013). *www.researchgate.net*. Obtenido de Aerodynamic and Flow Characteristics of Tall Buildings with Various Unconventional Configurations : https://www.researchgate.net/publication/260157211_Aerodynamic_and_Flow_Characteristics_of_Tall_Buildings_with_Various_Unconventional_Configurations
- Basilea, N. O. (2020). *meteoblue weather close to you* . Obtenido de <https://www.meteoblue.com>: https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/quito_ecuador_3652462
- Carlos Morón, P. S. (2018). Comparative Analysis of Infrared Thermography and CFD Modelling for Assessing the Thermal Performance of Buildings . *MDPI Energies* , 1-19.
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat . (2020). *The Skyscraper Center Global Tall Building Database of the CTBUH*. Obtenido de The Bank of America Tower: <http://www.skyscrapercenter.com/building/bank-of-america-tower/291>
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat . (2020). *The Skyscraper Center Global Tall Building Database of the CTBUH* . Obtenido de One World Trade Center : <http://www.skyscrapercenter.com/building/one-world-trade-center/98>
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat . (2020). *The Skyscraper Center Global Tall Building Database of the CTBUH* . Obtenido de Tehran International Tower : <http://www.skyscrapercenter.com/building/tehran-international-tower/3180>
- Distrito Metropolitano de Quito . (12 de Agosto de 2003). <http://www7.quito.gob.ec>. Obtenido de La Ordenanza Sustitutiva a la Ordenanza No. 3445 que Contiene las Normas de Arquitectura y Urbanismo Ordenanza 3457 : http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS%20A%C3%91OS%20ANTERIORES/ORD-3457%20-%20NORMAS%20DE%20ARQUITECTURA%20Y%20URBANISMO.pdf
- Distrito Metropolitano de Quito . (20 de Agosto de 2014). *Secretaría de Territorio Alcaldía* . Obtenido de <https://www.ecp.ec>: <https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2018/01/STHV-RT-02-2015-Estacionamientos.pdf>
- Distrito Metropolitano de Quito . (2 de Febrero de 2015). <http://www7.quito.gob.ec>. Obtenido de Plan de Uso y Ocupación del Suelo :

http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Sesiones%20del%20Concejo/2015/Sesi%C3%B3n%20Extraordinaria%202015-02-13/PMDOT%202015-2025/Volumen%20III/2.%20PUOS%202015.pdf

Distrito Metropolitano de Quito . (19 de Diciembre de 2017).

<http://www7.quito.gob.ec>. Obtenido de Ordenanza Metropolitana Modificatoria de la Ordenanza Metropolitana No. 127 del Plan de Uso y Ocupación del Suelo del Distrito Metropolitano de Quito: http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Sesiones%20del%20Concejo/2018/Sesi%C3%B3n%20Ordinaria%202018-01-11/II.%20%20%20Primer%20debate/ICO-2018-003.pdf

Distrito Metropolitano de Quito (Concejo Metropolitano de Quito) . (26 de Octubre de 2005).

<http://www7.quito.gob.ec>. Obtenido de La Ordenanza de Zonificación que Contiene el Plan de Uso y Ocupación del Suelo (PUOS), y que Deroga las Ordenanzas de Zonificación Nos. 001, 0013, 0014, 0016 y 0019; y a las Ordenanzas Especiales de Zonificación Nos. 001 y 0017. : http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanz

<as/ORDENANZAS%20A%C3%91OS%20ANTERIORES/ORDZ-024%20-%20PUOS%20-%20DEROGA%20ORDZ-011,%20ORDZ-014,%20ORDZ-016%20y%20ORDZ-019;%20ORDE-001%20y%20ORDE-017.pdf>

Distrito Metropolitano de Quito. (2015).

<http://www7.quito.gob.ec>. Obtenido de PROYECTO DE SEGUNDA REFORMA DEL ANEXO: PLAN DE USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO-PUOS : http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Comisiones%20del%20Concejo/Usode%20Suelo/2017/2017-10-02/7.%20%20Reforma%20Ordenanza%20No.%20127/2.%20%20Proy.%20Segunda%20Reforma%20del%20Anexo.pdf

Fu, R. (24 de Agosto de 2019). <https://github.com>. Obtenido de 1D Heat Conduction Solver: <https://github.com/rickfu415/heatConduction>

H.H. Hurt, J. (2002). *Aerodynamics for Naval Aviators* . California : Naval Air Systems Command .

Ha, P. T. (2016). www.sciencedirect.com. Obtenido de A Concept for Energy-Efficient High-Rise Buildings in Hanoi and a Calculation Method for Building Energy Efficiency Factor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816003908>

Hazem Elotefya, K. S. (2015). <https://www.sciencedirect.com>. Obtenido de Energy-efficient Tall Buildings Design Strategies: A Holistic Approach: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215015507>

INDOAMÉRICA, U. T. (2017). *LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA*. Ambato: Universidad Indoamérica.

Kontokosta, C. E. (12 de Agosto de 2014). <https://link.springer.com>. Obtenido de A Market-Specific Methodology for a Commercial Building Energy Performance Index: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11146-014-9481-0>

matplotlib Version 3.3.1 . (14 de Agosto de 2020).
<https://matplotlib.org/>. Obtenido de Matplotlib:
Visualization with Python: <https://matplotlib.org/>

Moreno, C. E. (2001). *Metodología para Medir la Biodiversidad*
. Zaragoza (España) : COOPERACION
IBEROAMERICANA CYTED CIENCIA Y
TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO, Sociedad
Entomológica Aragonesa S.E.A. UNESCO ORCYT.

Numpy . (2020). <https://numpy.org/>. Obtenido de Numpy The
fundamental package for scientific computing with
python : <https://numpy.org/>

Orbe, C. P. (2018). *Plan Especial Bicentenario para la
Consolidación del Parque de la Ciudad y el Redesarrollo
de su Entorno Urbano Revisión Quinquenal del
Instrumento Normativo 2018*. Distrito Metropolitano de
Quito : Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda -
DMPPS .

Orbe, C. P. (2018). *Plan Especial Bicentenario para la
Consolidación del Parque de la Ciudad y el Redesarrollo
de su Entorno Urbano Revisión Quinquenal del*

Instrumento Normativo-2018. Quito: Secretaría de
Territorio, Hábitat y Vivienda - DMPPS.

pandas. (2020). <https://pandas.pydata.org>. Obtenido de Package
overview:
[https://pandas.pydata.org/docs/getting_started/overview
.html](https://pandas.pydata.org/docs/getting_started/overview.html)

Reed, A. (23 de Noviembre de 2019). *github.com*. Obtenido de
Mutivariate Regression Analysis:
[https://github.com/areed1192/sigma_coding_youtube/bl
ob/master/python/python-data-science/machine-
learning/multi-linear-
regression/Machine%20Learning%20-
%20Multi%20Linear%20Regression%20Analysis.ipyn
b](https://github.com/areed1192/sigma_coding_youtube/blob/master/python/python-data-science/machine-learning/multi-linear-regression/Machine%20Learning%20-%20Multi%20Linear%20Regression%20Analysis.ipynb)

Sabareesh, K. S. (28 de Octubre de 2018).
<https://link.springer.com>. Obtenido de Across Wind
Load Analysis Using CFD for Sustainable Design of Tall
Structures:
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-
01932-7_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01932-7_19)

scikitlearn. (Agosto de 2020). <https://scikit-learn.org>. Obtenido
de scikit-learn Machine Learning in Python :
<https://scikit-learn.org/stable/index.html>

Scipy.org. (2020). <https://www.scipy.org>. Obtenido de Getting
started : <https://www.scipy.org/getting-started.html>

seaborn 0.10.1. (2020). <https://seaborn.pydata.org/>. Obtenido de
seaborn: statistical data visualization:
<https://seaborn.pydata.org/>

Spiegel, M. R. (1970). *Teoría y Problemas de Estadística* .
Bogotá : McGraw - Hill y Latino Americana, S.A.

statsmodels v0.11.1. (21 de Febrero de 2020).
<https://www.statsmodels.org>. Obtenido de statistical
models, hypothesis test, and data exploration :
<https://www.statsmodels.org/stable/index.html>

T. Sultana Saroglou, I. M. (Diciembre de 2017). *ResearchGate*.
Obtenido de Quantifying Energy Consumption in
Skyscrapers of Various Heights:
[https://www.researchgate.net/publication/316048998_Q
uantifying_Energy_Consumption_in_Skyscrapers_of_V
arious_Heights](https://www.researchgate.net/publication/316048998_Quantifying_Energy_Consumption_in_Skyscrapers_of_Various_Heights)

Toby, O. (15 de Julio de 2020). <https://github.com>. Obtenido de
CfdOF: A Computational fluid dynamics (CFD)
workbench for FreeCAD:
<https://github.com/jaheyns/CfdOF>

Wikipedia La enciclopedia libre. (15 de Julio de 2020).
<https://es.wikipedia.org>. Obtenido de Quito:
<https://es.wikipedia.org/wiki/Quito>