

VARIACIÓN DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL Y SUS COSTOS DIRECTOS EN UN  
EDIFICIO CONVENCIONAL DE 5 PISOS CON LAS ALTERNATIVAS DE TECHO VERDE  
REGULADOS POR LA ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ.

DIEGO FELIPE CAMPOS HERRERA  
DANIEL OSWALDO CHÁVEZ SUÁREZ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C 2014

VARIACIÓN DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL Y SUS COSTOS DIRECTOS EN UN  
EDIFICIO CONVENCIONAL DE 5 PISOS CON LAS ALTERNATIVAS DE TECHO VERDE  
REGULADOS POR LA ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ.

DIEGO FELIPE CAMPOS HERRERA  
DANIEL OSWALDO CHÁVEZ SUÁREZ

Trabajado presentado para la obtención del título de Ingeniero Civil

DAVID GOMEZ VILLASANTE  
(IC)  
Director

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C 2014

## DEDICATORIA

A nuestras familias y amigos que han sido parte de nuestro proceso de aprendizaje y que sin importar el tiempo seguirán a nuestro lado apoyándonos. Ustedes son la motivación, la fuerza y la razón para seguir creciendo personal y profesionalmente, con el ánimo de hacerlos sentir orgullosos de lo que somos hasta el día de hoy.

“Mis padres Oswaldo Chávez y Margarita Suárez, siempre me han apoyado y dado todo lo que han podido para hacerme crecer como persona; siempre han estado conmigo sin importar las decisiones que tome en la vida. Gracias al ejemplo que me han dado de personas trabajadoras ha sido parte fundamental de mi desarrollo como ser humano. Mi hermana Juliana y mi hermano Javier, siempre han confiado en mí, han sido muy importantes en mi vida, nunca me desamparan y luchan a mi lado con el fin de cumplir todos mis objetivos.”

Daniel Oswaldo Chávez Suárez.

“Dedicado a la memoria del Capitán William Valderrama 2013, a mis papas y hermanos que me apoyaron durante todo este proceso con sus múltiples enseñanzas.”

Diego Felipe Campos Herrera

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por habernos puesto personas en nuestro camino que siempre nos han brindado su apoyo; por habernos dado las oportunidades para salir adelante y por habernos dado unos padres amorosos que nos han ofrecido todo lo que ha estado a su alcance para terminar nuestra carrera profesional.

A nuestro director de trabajo de grado, el Ingeniero David Gómez Villasante quien fue nuestra guía y nos apoyó en el desarrollo de este trabajo, depositando su confianza, paciencia y soporte. Gracias a él por sus excelentes recomendaciones para la realización de este proyecto.

A nuestros amigos que nos dieron el aliento para continuar por este camino sin importar las dificultades durante el trayecto. La amistad es uno de los mayores regalos que hemos encontrado hasta el momento en nuestras vidas.

A todos nuestros profesores en nuestra carrera universitaria que has sido parte activa en nuestro proceso de aprendizaje.

A la Pontificia Universidad Javeriana, el medio que nos brindó siempre un ambiente de confianza y trabajo para realizar nuestros estudios, además de dejarnos miles de experiencias vividas que recordaremos siempre.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
1. INTRODUCCION.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN .....	17
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 GENERAL.....	20
1.2.2 ESPECÍFICOS .....	20
1.3 METODOLOGÍA .....	21
1.3.1 Estudio del estado del arte .....	21
1.3.2 Identificación e investigación de los tipos de techo verde precisados en la Guía de Techos Verdes de Bogotá.....	21
1.3.4 Identificación de las diferencias para cargas unitarias que transmiten cada uno de los tipos de techo verde a la estructura principal.....	22
1.3.5 Análisis y revisión del edificio con la Norma Sismo Resistente (NSR-10) sin techo verde .....	24
1.3.6 Modelación del edificio para cada una de las alternativas de techos verdes .....	24
1.3.7 Cuantificación y costeo comparativo del edificio propuesto con y sin la implementación de techos verdes .....	26
2. MARCO TEÓRICO .....	27
2.1 ¿QUÉ ES UN TECHO VERDE?.....	27
2.2 VENTAJAS DE IMPLEMENTAR UN TECHO VERDE.....	28
2.2.1 Vida útil .....	32
2.2.2 Efecto de aislación térmica .....	33
2.2.3 Aislación acústica .....	35

2.2.4	Capacidad de retención del agua.....	36
2.2.5	Polución y calidad del aire.....	37
2.3	CLASIFICACIÓN DE LOS TECHOS VERDES.....	38
2.3.1	Techos Verdes Extensivos.....	38
2.3.2	Techos Verdes Intensivos.....	40
2.4	Componentes de techos verdes según la guía de techos verdes de Bogotá (Nieto Escalante, 2011).....	43
2.4.1	Multicapa monolíticos.....	43
2.4.2	Multicapa elevados.....	44
2.4.3	Sistemas tipo receptáculo.....	45
2.4.4	Monocapa.....	45
2.4.5	Sistemas aeropónicos.....	46
2.5	Clasificación primaria de techos verdes según guía de techos verdes de Bogotá (Nieto Escalante, 2011).....	47
2.6	Clasificación secundaria de techos verdes según la guía de techos verdes de Bogotá ..	48
3	ANÁLISIS DEL EDIFICIO.....	52
3.1	ASPECTOS GENERALES.....	52
3.2	ESPECTRO DE DISEÑO.....	56
3.3	MODELACIÓN DEL EDIFICIO.....	56
3.3.1	Materiales.....	57
3.3.2	Elementos Estructurales.....	57
3.3.3	Combinaciones de carga.....	60
3.3.4	CÁLCULOS DE CARGAS PARA TECHOS VERDES.....	67
3.3.5	Dimensionamiento de columnas y acero de refuerzo para cada una de las condiciones de techo verde.....	76
3.4	TECHO VERDE AUTORREGULADO.....	77

3.5	TECHO VERDE AJARDINADO .....	80
3.6	TECHO VERDE ECOLOGICO ESPECIAL .....	83
3.7	TECHO HUERTA .....	86
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	89
4.1	Desplazamientos y derivas .....	89
4.2	Cantidades de concreto.....	92
4.3	Cantidades de acero.....	95
4.4	Cantidades de formaleta.....	98
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	107
	BIBLIOGRAFÍA .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variedad de especies de plantas en un techo verde extensivo típico. ....	40
Figura 2: Ejemplos de techos verdes intensivos y techos verdes extensivos.....	41
Figura 3: Perfil de Techo Verde con tecnología: Multicapa Monolíticos .....	44
Figura 4: Perfil de Techo Verde con tecnología: Multicapa Elevados .....	44
Figura 5: Perfil de Techo Verde con tecnología: Sistemas tipo receptáculo .....	45
Figura 6: Perfil de Techo Verde con tecnología: Monocapa .....	46
Figura 7: Perfil de Techo Verde con tecnología: Sistemas aeropónicos .....	46
Figura 8: Techo verde autorregulado, clasificación secundaria según sus cargas .....	49
Figura 9: Techo verde ajardinado, clasificación secundaria según sus cargas .....	50
Figura 10: Techo verde ecológico especializado, clasificación secundaria según sus cargas .....	50
Figura 11: Techo verde huerta, clasificación secundaria según sus cargas .....	51
Figura 12: Planta arquitectónica del edificio sin techo verde semi-sótano.....	52
Figura 13: Planta arquitectónica del edificio sin techo verde pisos 1 y 2.....	53
Figura 14: Planta arquitectónica del edificio sin techo verde pisos 3-4. ....	54
Figura 15: Espectro de diseño tipo lacustre 300 .....	56
Figura 16: Frames utilizados en SAP2000 y Perfil columna de concreto introducido en SAP2000 .....	58
Figura 17: Modelo Estructural SAP2000 v15.....	59
Figura 18: Tabla B.4.2.1-2 tomada de la NSR-10, Título B.....	67
Figura 19: Grafica de derivas por piso del edificio sin carga por techo verde vs derivas de carga por techo huerta (T4) de peso mínimo, que arroja también el cambio mínimo en las derivas de todos los modelos estudiados.....	91
Figura 20: Grafica de derivas por piso del edificio sin carga por techo verde vs derivas de carga por techo verde ajardinado (T2) de peso máximo, que arroja también el cambio máximo en las derivadas de todos los modelos estudiados. ....	91
Figura 21: Volúmenes de concreto para cada uno de los modelos estudiados .....	92
Figura 22: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde autorregulado (T1: Techo autorregulado).....	93
Figura 23: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde ajardinado (T2: Techo ajardinado).....	94



Figura 24: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde ecológico especial (T3: Ecológico especial).....	94
Figura 25: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo huerta (T4: Techo huerta) .....	95
Figura 26: Cantidad de acero para cada uno de los modelos estudiados .....	96
Figura 27: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde autorregulado (T1: Techo autorregulado).....	96
Figura 28: Diferencia de cantidad de acero entre estructura sin techo verde y techo verde ajardinado (T2: Techo ajardinado).....	97
Figura 29: Diferencia de cantidad de acero entre estructura sin techo verde y techo verde ecológico especial (T3: Ecológico especial).....	97
Figura 30: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo huerta (T4: Techo huerta) .....	98
Figura 31: Área de formaleta para cada uno de los modelos estudiados (T1: Techo autorregulado, T2: Techo ajardinado, T3: Ecológico especial, T4: Techo huerta).....	99
Figura 32: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo verde autorregulado (T1: Techo autorregulado).....	99
Figura 33: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo verde ajardinado (T2: Techo ajardinado).....	100
Figura 34: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo verde ecológico especial (T3: Ecológico especial).....	100
Figura 35: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo huerta (T4: Techo huerta) .....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación. Principales diferencias entre techos verdes intensivos y extensivos .....	43
Tabla 2: Dimensiones de columnas y refuerzo del edificio sin techo verde .....	58
Tabla 3: Combinaciones de carga utilizadas en el modelo SAP2000.....	60
Tabla 4: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico autorregulado. ....	60
Tabla 5: Cálculo de carga muerta y carga viva sobre el edificio sin techo verde sentido Y.....	61
Tabla 6: Cálculo de carga muerta y carga viva sobre el edificio sin techo verde sentido X.....	62
Tabla 7: Cálculo volumen de concreto en vigas y muros de ascensor para el edificio sin techo verde.....	63
Tabla 8: Cálculo volumen de concreto en vigas para el edificio sin techo verde .....	63
Tabla 9: Cálculo cantidad de acero en columnas y muros de ascensor para el edificio sin techo verde.....	64
Tabla 10: Cálculo cantidad de acero para vigas de la estructura con y sin carga por techo verde.....	64
Tabla 11: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que no presenta carga por techo verde.....	65
Tabla 12: Formaleta total para vigas en el edificio que no presenta carga por techo verde.....	65
Tabla 13: Magnitud de las cargas según el techo verde por la guía de techos verdes de Bogotá. ....	66
Tabla 14: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico autorregulado. ....	68
Tabla 15: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico autorregulado sobre el edificio en sentido Y .....	68
Tabla 16: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico autorregulado sobre el edificio en sentido X .....	69
Tabla 17: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico Ajardinado. ....	69
Tabla 18: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ajardinado sobre el edificio en sentido Y .....	70
Tabla 19: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ajardinado sobre el edificio en sentido X.....	71
Tabla 20: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico Ecológico Especial.....	71
Tabla 21: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ecológico especial sobre el edificio en sentido Y .....	72
Tabla 22: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ecológico especial sobre el edificio en sentido X .....	73
Tabla 23: Cálculo de cargas sobre vigas para Techo Huerta. ....	73

Tabla 24: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo huerta sobre el edificio en sentido Y....	74
Tabla 25: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo huerta sobre el edificio en sentido X....	75
Tabla 26: Dimensiones de concreto y cantidad de acero para los modelos cargados con techos verdes. (T1: Techo autorregulado, T2: Techo ajardinado, T3: Ecológico especial, T4: Techo huerta).....	76
Tabla 27: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde autorregulado.....	77
Tabla 28: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo verde autorregulado .....	77
<i>Tabla 29: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde autorregulado .....</i>	<i>78</i>
Tabla 30: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo verde autorregulado .....	78
Tabla 31: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo verde autorregulado .....	79
Tabla 32: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo verde autorregulado .....	79
Tabla 33: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ajardinado .....	80
Tabla 34: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo verde ajardinado	80
Tabla 35: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ajardinado.....	81
Tabla 36: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo verde ajardinado.....	81
Tabla 37: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo verde ajardinado.....	82
Tabla 38: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo verde ajardinado.....	82
Tabla 39: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ecológico especial.....	83
Tabla 40: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo verde ecológico especial.....	83
Tabla 41: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ecológico especial .....	84
Tabla 42: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo verde ecológico especial .....	84

Tabla 43: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo verde ecológico especial .....	85
Tabla 44: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo verde ecológico especial .....	85
Tabla 45: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo huerta.....	86
Tabla 46: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo huerta.....	86
Tabla 47: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo huerta .....	87
Tabla 48: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo huerta .....	87
Tabla 49: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo huerta .....	88
Tabla 50: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo huerta .....	88
Tabla 51: Porcentaje de incremento de PESO SÍSMICO EN LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS. ..	88
<i>Tabla 52: Resumen de derivas por piso de los edificios estudiados.....</i>	<i>89</i>
Tabla 53: Resumen de desplazamientos en X por piso de los edificios estudiados.....	90
Tabla 54: Resumen de desplazamientos en Y por piso de los edificios estudiados.....	90
Tabla 55: Costos directos de la estructura sin carga por techo verde .....	102
Tabla 56: Costos directos de la estructura con carga por techo verde autorregulado .....	102
Tabla 57: Costos directos de la estructura con carga por techo verde ajardinado.....	103
Tabla 58: Costos directos de la estructura con carga por techo verde ecológico especial .....	104
Tabla 59: Costos directos de la estructura con carga por techo huerta .....	104
Tabla 60: Tabla de relación de costos directos para modelos sin y con carga por techos verdes .....	105
Tabla 61: Relación porcentual de costos directos edificación convencional vs alternativas con techos verdes .....	106

## TABLA DE ANEXOS

- CARGAS SOBRE VIGAS .....(Anexo 1)
- COMPARACIÓN DE DERIVAS.....(Anexo 2)
- CANTIDADES DE OBRA, COSTOS Y APU .....(Anexo 3)
- PLANOS .....(Anexo 4)
  - PLANO 1 – 5 .....(EDIFICIO SIN TECHO VERDE)
  - PLANO 2 – 5 .....(EDIFICIO TECHO VERDE AUTORREGULADO T1)
  - PLANO 3 – 5 .....(EDIFICIO TECHO VERDE AJARDINADO T2)
  - PLANO 4 – 5 .....(EDIFICIO TECHO VERDE ECOLOGICO ESPECIAL T3)
  - PLANO 5 – 5 .....(EDIFICIO TECHO VERDE HUERTA T4)

## 1. INTRODUCCIÓN

Los techos verdes son vistos desde diferentes perspectivas como soluciones ecológicas, estéticas e ingenieriles, implementados cada vez más con el paso de los años alrededor del mundo. Como muestra de ellos, unos de los techos verdes más famosos fueron los “Jardines Colgantes de Babilonia”, construidos 500 años AC. Algunos autores mencionan que aunque los techos verdes representen un tipo diferente de habitad urbano, ahora estos sistemas son vistos como una ingeniería o como un reto horticultural, en lugar de verse solamente como un sistema ecológico (Oberndorfer, Lundholm, Bass, Coffman, Doshi, Dunnett, Gaffin, Kohler, Liu and Rowe, 2007). Los beneficios ambientales que proveen los techos verdes se derivan de su funcionamiento como ecosistemas independientes.

Los techos o cubiertas verdes fueron creados en el siglo XX en Alemania, donde la vegetación fue instalada en techos con el fin de reducir los daños ambientales causados por la radiación solar sobre las cubiertas de las estructuras. Tiempo después fueron empleados para prevenir incendios en las estructuras (Oberndorfer, Lundhom, et al., 2007). Esta idea es muy popular en Europa y América del norte debido a que los techos verdes pueden reducir el efecto de “heat-island” y aislar los edificios de temperaturas muy altas; así mismo ayudan a la disminución de costos de calefacción y de aire acondicionado. Además, son agradables y estéticos y pueden mejorar la calidad del aire y gestionar las aguas lluvias. En la actualidad, dado a todos los usos y ventajas de los techos verdes, los sistemas de regulación han desarrollado un plan en el que incentivan con premios a empresas que cumplan con los requisitos ambientales necesarios, lo cual es una

motivación adicional para la implementación de sistemas de techos verdes en edificios (Mirzaei, 2013).

Los techos verdes han sido utilizados tanto en climas cálidos como en climas fríos. Se ha considerado que en las zonas de temperaturas bajas, “calientan”, puesto que almacenan el calor de los ambientes interiores y en las zonas de temperaturas altas “enfrian”, ya que mantienen aislados los espacios interiores del clima cálido del exterior (Minke, 2011). De un modo natural la temperatura acumulada no sólo se almacena sino que también se absorbe. La eficacia de la acumulación de calor y la capacidad de aislación térmica de un techo, es fácilmente comprobable en la tradicional casa de terrones de turba de Islandia. Esta es habitada también en invierno sin calefacción artificial, de modo que solo el calor humano es suficiente para lograr una placentera temperatura ambiente (Minke, 2011). El techo constaba de 2 o 3 capas de suelo orgánico, apoyadas sobre ramas, cubiertas por gruesas capas de césped. A pesar de que la construcción del techo por su naturaleza no es impermeable, si su inclinación es suficiente no se filtra generalmente el agua de lluvia ni de la nieve al derretirse, porque la turba no absorbe agua cuando está seca. En una técnica similar fueron construidas hace aproximadamente 100 años las casas de terrones de césped de las poblaciones del norte de Estados Unidos y Canadá. El sistema constructivo empleado probablemente proceda del norte de Europa. Los gruesos muros entre 60 y 90 cm de ancho eran de terrones de césped de 10 cm de espesor que se colocaban sujetos en una pared de piedras y con la capa de césped hacia abajo (Minke, 2011).

El autor Minke (2011) afirma : *“El tradicional techo de pasto de Escandinavia tiene una inclinación de entre 30° y 45°C y consta de una capa gruesa de unos 20 cm de terrones de*

*césped, colocados sobre varias capas de corteza de abedul. Esta, por su alto contenido de tanino, es relativamente resistente a la descomposición y tradicionalmente era sellada con alquitrán para lograr un estrato resistente al pasaje de raíces y agua. Como el alquitrán de madera está clasificado como cancerígeno, esta solución no es recomendable. Además, la vida útil del techo es de aproximadamente 20 años.*” (p.8). Esta era la manera de impermeabilización para las cubiertas vegetales, las cuales debían tener cierta inclinación para evitar filtraciones de agua. Haciendo un rediseño de lo que serían los techos verdes actualmente, Oberndorfer, Lundhom, et al. (2007) relatan cómo en la década de los 70’s, la preocupación ambiental, sobre todo en las zonas urbanas, dio la oportunidad de incluir progresivamente un pensamiento ambientalista en la política y la tecnología en Alemania. La tecnología de los techos verdes fue rápidamente acogida por su amplia gama de beneficios ambientales, ecológicos e interdisciplinarios. La investigación condujo a las directrices del país a desarrollar el primer volumen de esta tecnología publicado en 1982. Muchas ciudades de Alemania se han acogido a los programas de incentivos para promover la tecnología de techos vegetales y mejorar los estándares ambientales. La ley de construcción ahora requiere la construcción de techos verdes en centros urbanos. Las bases jurídicas sobre la construcción de techos verdes han tenido un efecto importante en la implementación de esta nueva tecnología en toda Alemania. Este es un claro ejemplo de disciplina y responsabilidad ambiental que es lo que necesitamos en nuestro país para tener un ambiente más sano y que no cause problemas de salud a los habitantes de las áreas urbanas.



## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

A lo largo de los años la construcción en el mundo se ha venido mejorando debido al crecimiento de las nuevas tecnologías y métodos que mejoran el rendimiento de los diferentes proyectos no solo en la ingeniería sino también en diferentes áreas del conocimiento. Sin embargo también ha crecido la pérdida de algunos recursos del planeta, por lo que ha surgido la necesidad de investigar nuevas alternativas para frenar el deterioro de esos recursos, y una de esas alternativas en el ámbito de la construcción es el concepto de *Green Roof* o Techo Verde, que también tiene otros nombres como cubierta vegetada, terrazas verdes, entre otros.

En la actualidad se han estudiado e implementado los sistemas de techos verdes alrededor del mundo gracias a sus aportes ambientales y a la importancia que le han dado los sellos de certificación en el mundo como lo son: LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) versión 4.4, BREEAM y GREEN STAR. En el país se ha trabajado en la implementación del Sello Ambiental Colombiano para Edificaciones Sostenibles (SAC-ES) con el liderazgo del Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el ICONTEC además del apoyo del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) ([www.cccs.org.co](http://www.cccs.org.co)).

Además del impacto ambiental, también hay varios temas que se deben tener en cuenta a la hora del diseño de una edificación, como el costo que va a generar la implementación de un techo verde, el aporte del peso generado por el sistema y la hidráulica del mismo. Estos sistemas que se han querido introducir en los diferentes tipos de edificios tienen un grado de complejidad mayor

al que se podría esperar. Es por esto que el diseñador a cargo debe considerar primeramente si los techos verdes se utilizaran en una construcción nueva o si, por otro lado, serán estos usados en una adecuación. Partiendo de esta consideración, es preciso buscar la opción óptima que va a garantizar una construcción sostenible.(Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007) (Currie & Bass, 2008)(Osma Pinto & Plata, 2010)(Velazquez, 2005)

Existen dos sistemas de techos verdes que han tenido mayor registro en la literatura, los techos verdes con sistemas extensivos y los techos verdes con sistemas intensivos. En Colombia se ha tratado de adoptar sistemas que se encuentran inmersos entre estos dos grandes grupos, motivo por el cual se hace necesario examinar las diferentes incidencias que pueden tener en su implementación práctica para Bogotá. Actualmente, en la ciudad se trabaja bajo tres clasificaciones de techos verdes que son: según la tecnología empleada, según la clasificación primaria y según la clasificación secundaria. Dentro de la clasificación primaria están: techo verde autorregulado (T1), ajardinado (T2), ecológico especializado (T3) y huerta (T4). La clasificación secundaria, por otro lado, hace referencia al peso del techo, lo cual se relaciona directamente con el espesor del sustrato. Esta clasificación se divide en techos verdes livianos, moderados y robustos. (Gutiérrez, 2008)(Salgado, 2009)

El proceso constructivo juega un papel muy importante en la utilización de este tipo de sistemas puesto que de un buen proceso depende una buena adecuación o implementación de la cubierta a trabajar, así como el desempeño de la misma. La pendiente de la cubierta, los tipos de drenaje, estilos de instalación, normativas vigentes y durabilidad del sistema, son aspectos relacionados

con el proceso constructivo, mencionados en la bibliografía encontrada al respecto (Cavanaugh, 2008) (Kravitz, 2007) (Mirzaei, 2013).

Para poder determinar las diferencias en los costos directos de la estructura principal del edificio propuesto, es necesario reconocer los contrastes entre los cuatro tipos de sistemas planteados por la Guía de Techos Verdes en Bogotá, que radican principalmente en el espesor de sustrato, tipo de uso, tipo de plantas y sistemas constructivos. Para cada tipo de techos verdes, a partir de la clasificación primaria se desprende una clasificación secundaria que consiste en tres (3) grupos: liviano, moderado y robusto. Para este trabajo de grado se tomaron los pesos de los techos verdes robustos. En la guía se muestra de manera general la parte de diseño de todas las áreas a la hora de implementar un techo verde.

En Bogotá se han implementado techos verdes en diferentes tipos de edificaciones, sin embargo, muchos de ellos no se han pensado desde la etapa de diseño sino que se han llevado a cabo como una adecuación de la cubierta. El inconveniente que puede surgir con los procesos de adecuación, es que el diseño ha sido pensando sin tener en cuenta la afección de cargas y comportamiento estructural que el uso de techos verdes pueda generar. Estos efectos pueden o no ser significativos para el diseño, pero de cualquier manera debe ser una consideración que no se puede excluir del análisis.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 GENERAL

- Encontrar las modificaciones de la estructura principal y sus costos directos por la implementación de techos verdes en un edificio propuesto en la ciudad de Bogotá, de acuerdo a la clasificación primaria de la Secretaría Distrital de Ambiente de 2011.

### 1.2.2 ESPECÍFICOS

- Analizar la implementación comparativa de los 4 tipos de techo verde primario establecidos para Bogotá, en relación a sus incrementos de masa sísmica.
- Identificar los cambios que se puedan presentar en lo referente a la estructura principal del edificio propuesto con la implementación de techos verdes.
- Determinar el cambio en los costos directos de la estructura principal del edificio debido a la implementación de los 4 tipos de techo verde versus el mismo sin techo verde.

## 1.3 METODOLOGÍA

### 1.3.1 Estudio del estado del arte

El desarrollo de este trabajo partió de la búsqueda de información general relacionada con los sistemas de techos verdes a nivel mundial, en donde se encontró gran registro de la clasificación de techos verdes extensivos e intensivos. Los techos verdes extensivos son conocidos por su conformación de plantas resistentes con comportamiento independiente en el que no demandan de muchos cuidados de forma permanente. Los intensivos, por el contrario, son de más cuidado pues se caracterizan por tener mayor altura de capa vegetal, lo que los obliga a demandar más agua para que tengan un buen funcionamiento (Salgado, 2009) (Velázquez, 2005) (Oberndorfer, Lundhom, et al, 2007).

### 1.3.2 Identificación e investigación de los tipos de techo verde precisados en la Guía de Techos Verdes de Bogotá.

Después del estudio del estado del arte a nivel mundial, se realizó una búsqueda exhaustiva enfocada hacia el estudio de la utilización de sistemas de techos verdes en Colombia, lo cual nos situó en el abundante crecimiento de información con respecto al tema de sistemas de cubiertas verdes que existe en la ciudad de Bogotá, donde se encuentra ubicada la edificación a analizar. Para la capital del país, la alcaldía mayor desarrolló la Guía de Techos Verdes, siendo este el

documento que rige la implementación de techos verdes en Bogotá hasta el día de hoy. En la guía se especifican dos (2) tipos de clasificaciones de estos techos, la clasificación primaria y la secundaria. En la clasificación primaria tenemos los tipos: autorregulado, ajardinado, ecológico especial y huerta. Cada uno de estos tipos a su vez se clasifica de manera secundaria en livianos, moderados y robustos.

#### 1.3.4 Identificación de las diferencias para cargas unitarias que transmiten cada uno de los tipos de techo verde a la estructura principal

Para el tipo de techo verde autorregulado en su condición de carga crítica se tiene:

Los techos verdes robustos presentan algunos valores de referencia en cuanto a la altura de carpeta vegetal y el peso total por metro cuadrado. Para el techo verde autorregulado robusto, las especies vegetales tienen una altura máxima de 50 centímetros en condiciones ambientales extremas, y un peso total entre 120 y 150 kilogramos por metro cuadrado.

Para el tipo de techo verde ajardinado en su condición de carga crítica se tiene:

Para el techo verde ajardinado robusto, la guía no presenta ninguna restricción de altura de carpeta vegetal ni peso total, no obstante, una altura de suelo orgánico de 25 cm arroja en promedio una carga de 500 kg/m<sup>2</sup>, que para efectos de esta tesis lo estamos considerando como límite dado que no es usual desde el punto de vista estético y además para mostrar un peso mayor

a los otros tipos de techos verdes guardando la proporción del incremento en la carga por metro cargado.

Para el tipo de techo verde ecológico especial en su condición de carga crítica se tiene:

Para el techo verde ecológico especial, la guía indica una altura máxima de 2 metros de especies vegetales, con un peso total hasta de 450 kilogramos por metro cuadrado en condiciones saturadas, y en el caso del techo huerta robusto, la altura máxima se encuentra de 150 centímetros y un peso total de entre 250 y 350 kilogramos por metro cuadrado en estado saturado (Nieto Escalante, J Antonio, 2011).

Para el presente proyecto se seleccionaron los cuatro tipos de techos de clasificación primaria, que fueron estudiados como robustos, dado a que tienen la conformación de capas más gruesas, que combinadas con un alto grado de saturación, lo más posible era que generaran cambios un poco más evidentes en el diseño de la estructura, a diferencia de los sistemas livianos y moderados.

En Bogotá, actualmente los techos verdes son una tendencia que como se mencionaba al principio de este documento tienen un carácter estético pero sobre todo ambiental. La mayoría de edificios que hoy en día cuentan con un sistema de techo verde, no fueron concebidos para este propósito, por lo tanto, se generó la necesidad de estudiar la influencia de estos sistemas ecológicos en el desarrollo de un diseño estructural de un edificio.

### 1.3.5 Análisis y revisión del edificio con la Norma Sismo Resistente (NSR-10) sin techo verde

Se trabajó un modelo estructural de un edificio convencional de cuatro pisos y un semisótano en concreto reforzado - ubicado en Bogotá en una zona donde se presenta un tipo de suelo lacustre 300, según la clasificación de los suelos que surge a partir de la microzonificación sísmica de Bogotá en la Norma Sismo-resistente del 2010 (NSR-10) - en el que se tiene la planta arquitectónica y la propuesta estructural aporticada de la estructura principal. Para el desarrollo de este proyecto, se modeló la estructura principal para el dimensionamiento propuesto, al cual se le efectuó el estudio de cargas y diseño de elementos estructurales, observando cada una de las características arquitectónicas del mismo.

Para el análisis del modelo estructural, se partió de un proyecto base con un dimensionamiento de vigas y columnas basadas en los planos arquitectónicos, a partir de esto se realizó un modelo en SAP2000 VERSIÓN 15 de la Pontificia Universidad Javeriana, el cual fue dimensionado a partir de la arquitectura base, y seguido analizado bajo las cargas muertas y vivas de los diferentes componentes. Para cada piso se aplicó una carga muerta debido al diseño de una placa aligerada en una dirección del cual su diseño se encuentra en el ANEXO 3. Adicionalmente se realizó el avalúo de cargas con respecto a la mampostería compuesta por ladrillo hueco incluyendo el peso del pañete por ambas caras y los acabados previstos, este diseño también se encuentra consignado en el ANEXO 3.

### 1.3.6 Modelación del edificio para cada una de las alternativas de techos verdes



Después de la evaluación de estas condiciones iniciales, se planteó la adaptación de la estructura para el uso de techos verdes. Para cada una de las cargas definidas por la *Guía de Techos Verdes* de las alternativas de la clasificación primaria se realizó el modelo bajo las condiciones de carga de los techos verdes, donde se evidencio para cada condición, el aumento del desplazamiento en algunos pisos, y en consecuencia el cambió en las derivas.

Luego de observar que bajo las cargas de techos verdes el edificio no cumplía con los lineamientos de la NSR-10 se realizó el diseño pertinente con el fin de garantizar el funcionamiento del edificio, esto llevo a la necesidad de aumentar las dimensiones de los elementos estructurales y la cantidad de acero de los mismos. Al obtener los nuevos diseños con las cargas impuestas por los cuatro tipos de techos verdes anteriormente mencionados, se realizó la comparación de la cantidad de concreto y acero de todas las columnas de los tipos de techos verdes.

Los cuatro tipos de techos verdes que fueron analizados son:

1. T1: Techo autorregulado.
2. T2: Techo ajardinado.
3. T3: Ecológico especial.
4. T4: Techo huerta.

### 1.3.7 Cuantificación y costeo comparativo del edificio propuesto con y sin la implementación de techos verdes

Para la cuantificación y costeo comparativo de la estructura principal del edificio sin techo verde y con las alternativas de techos verdes, se trajo el valor de las dimensiones de vigas y columnas finales obtenidas del diseño realizado donde se cumplieron con los requerimientos de diseño bajo las condiciones de carga de las alternativas de techos verdes, con el fin de sacar el valor exacto de cantidades tanto de volumen de concreto, peso del acero de refuerzo, como el área de formaleta.

Luego de sacar las cantidades de los elementos estructurales se realizó el análisis de precios unitarios de cada uno de estos componentes, es decir concreto para columnas, concreto para vigas, acero para columnas y vigas, y formaleta para las mismas. Dentro de los análisis de precios unitarios consignados en el ANEXO 3 se distinguen los precios de materiales, así como también el rendimiento de la cuadrilla a utilizar, todos estos coeficientes y valores de precios con relación a los materiales fueron sacados de un análisis estadístico por CONSTRUDATA (2014) y BIMSA (1991).

Al obtener los precios unitarios de los elementos estructurales se realizó el cálculo del costo total por piso con referencia a cada uno de los elementos que componen la estructura es decir, concreto, acero y formaleta para cada una de las alternativas de techos verdes, con el objetivo de poder comparar sustancialmente el valor total de la estructura principal de cada uno de los techos verdes.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ¿QUÉ ES UN TECHO VERDE?

Junto con los avances tecnológicos y el desarrollo urbano referente a la evolución de infraestructura, de los últimos tiempos, la sociedad ha tenido que pensar en maneras de contrarrestar el deterioro del medio ambiente. De alguna manera, es necesario adoptar una filosofía sostenible a la hora de planear un proyecto, con el fin de frenar y reparar el avance irresponsable de la explotación de los recursos que generan cambios en nuestro planeta (Osma Pinto & Plata, 2010).

Para entender el concepto de techo verde hay que familiarizarse con la frase “Building green”. Según la oficina federal del medio ambiente en Estados Unidos, se define la construcción verde como la práctica del ser humano por mejorar la eficiencia del uso de los recursos como la energía, el agua y los diferentes materiales utilizados para las construcciones y además reducir los impactos sobre la vida humana y el medio ambiente mediante la mejora de los diseños, estudios y operación (Velazquez, 2005).

Según Nieto Escalante (2011), a los techos verdes también se les conoce como techos bióticos, terrazas naturadas o vegetadas, y los definen como *“un sistema constructivo que permite mantener de manera sostenible un paisaje vegetal sobre la cubierta de un inmueble mediante una adecuada integración entre el inmueble intervenido, la vegetación escogida, el medio de crecimiento,...”* .(p.10)

Generalmente, las superficies de las azoteas de los edificios son de concreto y a veces están recubiertas de asfalto y otros derivados para impermeabilizar la placa superior. La radiación solar absorbida por el concreto y/o el asfalto, que es de color oscuro, aumenta la temperatura de la azotea y como consecuencia la temperatura del interior de la edificación. En los techos con colores claros este efecto es de menos intensidad, pero sin embargo esta no es una solución del todo efectiva para reducir significativamente las temperaturas. Una estrategia actualmente utilizada como aislamiento térmico en las azoteas es la vegetación, pues se ha demostrado su efectividad para refrescar la superficie del techo y el ambiente interior de la edificación. A esta aplicación sostenible se le denomina “Green roof” o “eco-roof” (Osma Pinto & Plata, 2010).

Para el autor Velázquez (2005), los techos verdes están contruidos con vegetación en lo alto de los edificios en las azoteas, también son llamados jardines del cielo o “ecoroofs”, además la referencia afirma que el mayor potencial de los techos verdes radica en su capacidad de cubrir las superficies con vida, respiración y el material vegetal permeable, además menciona que los techos verdes son saludables, sostenibles y tienen como principal objetivo disminuir los impactos del desarrollo en las ciudades.

## 2.2 VENTAJAS DE IMPLEMENTAR UN TECHO VERDE.

Esta nueva técnica puede traer muchos beneficios a nuestro modo de vida actual, se empieza a implementar formalmente hace más de 20 años y la idea es empezar a utilizarla en nuestro país y así darle un respiro al medio ambiente urbano de nuestras principales ciudades, una nueva tecnología que trae beneficios económicos y ambientales principalmente. La vida actual en la

ciudad trae consigo cambios ambientales, cambios climáticos, y cambios en la rutina de cada persona haciendo que el estilo de vida se vuelva malo para la sociedad; La construcción de edificios, vías, tráfico vehicular es una clara causa del por qué se están generando estos cambios. El concreto y el asfalto hacen que se produzca un calentamiento en la atmosfera generando partículas nocivas. Los edificios y ciudades actuales con superficies de concreto traen consigo problemas ambientales que perjudican el desarrollo de un buen ecosistema, nosotros como creadores de la vida urbana estamos afectando de manera directa e indirecta al funcionamiento regular del medio ambiente. Oberndorfer, Lundhom, et al., (2007) afirman que: *“Los techos pueden representar un 32% de las superficies horizontales en áreas de construcciones de altura y que son determinantes en la relación de energía entre edificio-aguas lluvias. La adición de vegetación y suelo a las superficies de los techos pueden reducir graves efectos negativos en los edificios y en los ecosistemas locales, así como pueden reducir el consumo de energía en los mismos edificios. Los techos o cubiertas verdes pueden ser al principio más costosos que una cubierta convencional, pero puede llegar a ser más económico a largo plazo gracias a la cantidad de electricidad que se puede llegar a ahorrar teniendo una cubierta verde; a su misma vez ayudando al medio ambiente a evitar un efecto “heat-island””*. (p.823)

Mientras que los techos vegetales son fácilmente identificables como techos verdes, es más complicado para los otros sistemas de cubierta. Los otros sistemas son aquellos que son superficies en concreto granito, o simplemente recubiertos con membranas impermeabilizantes. El sistema actual de indicadores cuantitativos de evaluación se centra en los "techos fríos", o los que tienen una superficie que es altamente reflectante y de emisión. La reflectividad, es la cantidad de luz solar que llega a la superficie total del techo y que es reflejada de nuevo a la

atmósfera, Los sistemas de techo frio utilizan ciertas membranas de color claro o revestimientos para lograr estas características (Cavanaugh, 2008).

Minke (2011) propone que los jardines, patios enjardinados y sobre todo techos y fachadas enjardinados, podrían mejorar notablemente el clima polucionado de las ciudades: el aire se purificaría, se reducirían considerablemente los remolinos de polvo, las variaciones de temperatura y los porcentajes de humedad disminuirían. *“Para lograr un clima urbano saludable, probablemente sería suficiente con enjardinar entre un 10 y un 20% de todas las superficies techadas de la ciudad, ya que un techo de césped sin podar tiene promediamente de 5 a 10 veces más superficie de hojas que la misma área en un parque abierto”* (p.9) Esto sería algo bueno en la medida que el clima fuera variable y se presentara una alta probabilidad de lluvias en una ciudad, es lo que nos expresa Oberndorfer, Lundhom, et al. (2007) que dice que las condiciones de una cubierta traen riesgos de supervivencia para las plantas y que ponen en riesgo su crecimiento. El estrés hídrico y las sequias extremas (generalmente en temperaturas elevadas), las intensidades de luz y las fuertes corrientes de viento aumentan el riesgo de daño físico a la vegetación y al suelo. Deberían hacerse adaptaciones para garantizar que la vegetación pueda sobrevivir a estas condiciones. Estas plantas deben tener características tolerantes al estrés, a las malformaciones, al crecimiento compacto, deben tener hojas resistentes a vientos fuertes, las adaptaciones deben garantizar el crecimiento de ramas, medidas de control frente a las sequias, deben tener un buena capacidad de almacenamiento de agua.

Las principales ventajas que brinda una cubierta verde son las siguientes según Minke (2011) son:

### ***Ventajas del techo verde***

- *Disminuyen las superficies pavimentadas.*
- *Producen oxígeno y absorben CO2.*
- *Filtran las partículas de polvo y suciedad del aire y absorben las partículas nocivas.*
- *Evitan el recalentamiento de los techos y con ello disminuyen los remolinos de polvo.*
- *Reducen las variaciones de temperatura del ciclo día - noche y disminuyen las variaciones de humedad en el aire.*
- *Tienen una larga vida útil si es correcta su ejecución.*
- *Surten efecto como aislamiento térmico.*
- *Protegen de los intensos rayos solares del verano a las habitaciones ubicadas bajo el techo.*
- *Reducen el pasaje de sonido del exterior.*
- *Valen como incombustibles y absorben la lluvia, por lo que alivian el sistema de alcantarillado.*
- *Las hierbas silvestres en el techo verde generan aromas agradables.*
- *San alojamiento a insectos y escarabajos.*
- *Son estéticos e influyen positivamente en el buen estado de ánimo y en la distensión de las personas.*

(p.9) (p.10)

Debido al excesivo incremento de las superficies selladas, surgen en las zonas de aglomeración urbana, influencias negativas en el agua domiciliaria, la calidad del aire y el microclima. El mal clima en nuestras grandes ciudades podría mejorarse esencialmente a través de un aumento de

superficies verdes, fundamentalmente enjardinando edificios y reduciendo las superficies pavimentadas. Enjardinados de 10 a 20 cm de altura de vegetación sobre aproximadamente 15 cm de sustrato equivalen de 5 a 10 veces más superficie de hojas que la misma área en un parque abierto (Minke, 2011).

### 2.2.1 Vida útil

La duración de todos los techos convencionales, sean éstos cubiertos con membranas, tejas o metal, es restringida por la influencia del tiempo: Calor, frío, lluvia, rayos ultravioleta, viento, así como los gases provenientes de las industrias que causan daños mecánicos y/o procesos de descomposición químicos o biológicos. El asfalto sobre las superficies, tiene que soportar en Europa, por ejemplo, a lo largo del año, variaciones en la temperatura de hasta 100°C (-20°C hasta +80°C). Si ese techo se enjardinara extensivamente, se reduciría la diferencia de temperatura aproximadamente a 30°C. A su vez, la capa impermeable del techo quedaría totalmente protegida de los rayos ultravioletas y al deterioro mecánico (Minke, 2011).

Cuando los sistemas vegetativos tienen un servicio de larga vida, tienen que ser reemplazados con menos frecuencia lo que significa que requieren menos materia prima para la producción y restauración de los mismos y los pocos residuos son dirigidos a rellenos sanitarios. Aunque la vida de servicio de un techo verde depende en gran medida de la calidad de los materiales, diseño e instalación, hay diferencias en durabilidad entre los sistemas populares que deben ser considerados (Cavanaugh, 2008). Así mismo, Cavanaugh (2008) dice: *“Los techos vegetativos correctamente instalados ofrecen durabilidad buena debido a que las plantas ofrecen protección a la membrana de los mismos techos. Muchos fabricantes afirman que sus productos tienen una*



*vida útil de 20 años o más. Este rendimiento, en combinación con otros beneficios que proporcionan, permite que los techos verdes sean considerados en buenos a largo plazo” (p.5).*

Individualmente las capas de membrana de los techos frescos, tales como PVC reflectante o membranas TPO, pueden sufrir una relativa pérdida de durabilidad en comparación con otros sistemas ya mencionados. Dependiendo de la variedad de membranas para los techos reflectantes con una sola capa se puede esperar que dure 5 años menos que una alternativa vegetal (Ducker Worldwide, 2004) .

### 2.2.2 Efecto de aislación térmica

Las características más importantes a tener en cuenta para la selección y mantenimiento del suelo según Osma Pinto & Plata (2010) son: *“conductividad térmica, capacidad de calor específico y densidad. Así mismo, las características prioritarias de la vegetación son: altura, área de la hoja, fracción de cobertura.” (p.112)*

A continuación, el autor Minke (2011) explica a qué se debe el efecto de aislación térmica gracias a los colchones de plantas sobre los techos:

- *El colchón de aire encerrado hace el efecto de una capa de aislante térmico. Cuanto más denso y grueso sea éste, mayor es el efecto. (p.16)*
- *Una parte de la radiación calórica de onda larga emitida por el edificio es reflejada por las hojas y otra parte absorbida. Es así que disminuye la pérdida de radiación de calor del edificio. (p.16)*

- *Una densa vegetación impide que el viento llegue a la superficie del sustrato. Como ahí casi no existe movimiento de aire, la pérdida de calor por efecto de viento se acerca a cero. Ya que en edificios viejos aislados, sin protección térmica mejorada, la pérdida de calor por convección (en particular por el viento) puede ser mayor al 50%, una densa capa de plantas lograría en estos casos el más eficaz ahorro de energía. (p.16)*
- *De mañana temprano, cuando la temperatura exterior es más baja, y por lo tanto la diferencia de temperatura y la pérdida de calor de los ambientes calientes hacia afuera es mayor, se forma rocío en la vegetación. La formación de rocío aumenta la temperatura en la capa de vegetación (porque en la condensación de 1 g de agua se liberan aproximadamente 530 calorías de calor). De modo que a través de esto la pérdida de calor transmitida nuevamente se reduce. (p.16)*
- *En zonas de climas fríos, en las que en invierno la tierra se congela, se produce una ventaja adicional: para la transformación de un gramo de agua a hielo se liberan aproximadamente 80 calorías, sin que la temperatura baje. Por consiguiente, se mantiene la tierra congelada durante largo tiempo a 0°C, incluso cuando la temperatura exterior es bastante más baja. Con una temperatura de +20°C (interior), de -20°C (exterior) y una temperatura de la tierra de 0°C disminuye la pérdida de calor por transmisión del techo, por lo tanto, alrededor de un 50%. Vale decir que el aislamiento térmico aumenta al doble respecto al mismo techo sin sustrato ni vegetación. Al derretirse el hielo se consumirá nuevamente la correspondiente energía de 80 cal/g de hielo para la re transformación del estado de agregación, ya que ésta es extraída del aire; surge entonces, a través de este efecto de ahorro latente, una ganancia de calor para el techo. (p.16)*

La temperatura del techo y la del interior cercano podría reducirse entre el 5 y el 10°C en el momento más caluroso del día, si hay un recubrimiento de césped sobre el concreto. Esto se lograría a pesar de que el césped no tiene un alto nivel de reflectancia y absorbería una cantidad de calor considerable, la cual no se acumularía en el concreto porque sería transferida al ambiente al evaporarse el agua contenida en el césped y el suelo orgánico. Razón por la cual, el flujo de calor hacia el concreto disminuirá de todas formas (Osma Pinto & Plata, 2010).

### 2.2.3 Aislación acústica

Se dice que las plantas reducen el ruido mediante la absorción (transformación de la energía sonora en energía de movimiento y calórica). Mediciones sobre un techo plano enjardinado de un hospital en Karlsruhe (Alemania) muestran que, en las fachadas ubicadas en las inmediaciones del jardín del techo, a consecuencia de la absorción y la reflexión disminuida, el ruido del tránsito baja alrededor de 2-3 dB. Por lo tanto son reducidas más pronunciadamente las frecuencias altas que se consideran especialmente molestas (Mürb 1981) (Minke, 2011).

Respaldando lo anterior, los autores Dunnet & Kingsbury (2004) dicen que en una de sus charlas con Charlie Miller se discutió que las superficies de los edificios en las zonas urbanas tienden a reflejar el sonido en lugar de absorberla. Algunas afirmaciones que se hacen sobre que los techos verdes, consideran que estos reducen el ruido de forma extravagante. Por ejemplo, se

ha afirmado que un techo verde con un capa de sustrato de 12 centímetros puede reducir el sonido de 40 dB, mientras que a 20 centímetros de capa está puede reducirlo de 46-50 dB. Sin embargo no hay estudios científicos que respalden estas afirmaciones. Investigadores alemanes han estudiado la reducción del ruido utilizando techos verdes en el aeropuerto de Frankfurt. Con 10 centímetros de techo verde se ha percibido que se reduce la transmisión de sonido en los edificios por un mínimo de 5 dB.

#### 2.2.4 Capacidad de retención del agua

En muchas grandes ciudades de Latinoamérica y Asia existe el peligro de que después de una lluvia torrencial las calles queden inundadas (...). Con respecto al tema del agua, Los autores Minke (2011) y a Dürr (1995) cuentan que un techo verde con 20 cm de sustrato de tierra y arcilla expandida puede almacenar 90 mm de agua (90 litros por m<sup>2</sup>).

Las zonas urbanas denominadas superficies duras, no porosas que contribuyen a la escorrentía, pueden sobre cargar la cantidad de aguas pluviales en las instalaciones existentes y causar desbordamientos de alcantarillado combinado en lagos y ríos. Las técnicas de control y gestión del agua lluvia convencionales incluyen embalses y lagunas, humedales artificiales, y filtros de arena. Los techos verdes almacenan el agua durante eventos de lluvia lo que retrasa la escorrentía

hasta después de una precipitación donde ésta puede volver a la atmosfera por medio de la evapotranspiración. (Oberndorfer, Lundhom, et al., 2007).

Minke (2011) dice: *“Por su poder de retención de agua, los techos verdes llevan a la disminución de los "altos picos de agua". Según la norma alemana DIN 1986, parte 2, el coeficiente de desagüe de aguas pluviales para superficies techadas enjardinadas con un mínimo de 10 cm de espesor, es de 0.3. Esto significa, que sólo el 30% de la lluvia caída desagua y el 70% queda retenida en el techo verde o se evapora. Para techos comunes con más de 30 de inclinación debe, sin embargo, contarse con un desagüe de pluviales del 100%.”* (p.20) Además el autor hace referencia a que los techos verdes, por medio del efecto de parachoques y retardo, ayudan considerablemente a los problemas de aguas lluvias en la ciudad ya que ayudan a mitigar la cantidad de agua en las redes de alcantarillado de la ciudad.

### 2.2.5 Polución y calidad del aire

El ambiente de una ciudad y su clima se ven afectados todos los días por los procesos industriales, empresariales y financieros de una ciudad. Las grandes fábricas industriales que generan emisiones de gases en grandes cantidades, la cantidad de automóviles en la ciudad son las principales causas de problemas ambientales y respiratorios en las personas. (Dunnet & Kingsbury, 2004).

La vegetación en áreas urbanas puede filtrar todas estas partículas nocivas para la salud; el mejoramiento del medio ambiente en una ciudad dependería solo de un 20% del total de una

zona urbana, si este 20% fueran cubiertas verdes o zonas de vegetación, la polución se reduciría notablemente, que podría limpiar el aire de una ciudad. (Dunnet & Kingsbury, 2004).

Por otro lado, los autores Oberndorfer, Lundhom, et al., (2007) consideran que los techos verdes extensivos tiene poco potencial para compensar las emisiones de carbono en las ciudad, los jardines de los techos intensivos que soportan una vegetación más leñosa podría contribuir de manera significativa, y haría el efecto de sumidero para el carbono. Los beneficios de la utilización de estos techos para mejorar la calidad del aire aún no han sido documentados a excepción de evaluaciones indirectas del impacto de ahorro de energía en las emisiones.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS TECHOS VERDES.

Los techos verdes se clasifican en dos grandes grupos que dependen del espesor de la capa vegetal, el medio de crecimiento y el tipo de capa vegetal utilizada, estos dos grupos son techos verdes extensivos y techos verdes intensivos. (Salgado, 2009) (Oberndorfer, Lundhom, et al., 2007) (Velazquez, 2005) (Minke, 2011). Sin embargo, para Salgado (2009), existe otro tipo de techo verde el cual tiene el nombre de híbrido y la referencia lo define como *“techo verde que permite mezclar variedades de plantas dentro del mismo espacio, obteniendo biodiversidad a un menor precio.”* (p.37)

### 2.3.1 Techos Verdes Extensivos

Para Salgado (2009) los techos verdes extensivos requieren de plantas de alta resistencia o nativas. Este autor coincide con Oberndorfer, Lundhom, et al. (2007) y Velazquez (2005) en que estos tipos de techos verdes no necesitan de riego constante ni tampoco podarlos o trasplantes y mencionan que la capa vegetal es baja es decir no sobre pasa los 20 cm de altura (*Figura 1*).

Los techos verdes extensivos son funcionales en cuanto a la administración de aguas lluvias, aislamiento térmico y protección contra el fuego, además de esto son ligeros, altamente porosos y baja materia orgánica (Oberndorfer, Lundhom, et al., 2007). Para Velázquez (2005), estos techos deben tener una capa vegetal resistente a las heladas, el viento y a fuertes olas de calor, así como también una capa vegetal de bajo espesor.

Los techos verdes extensivos deben ser implementados cuando el cliente decide que la circulación de personas en la cubierta debe ser limitada o casi nula para usos de recreación. En cuanto a la inclinación se recomienda que tenga una pendiente de al menos el 2%, debido a que los techos extensivos con pendiente nula generan problemas de drenaje (Velazquez, 2005).

En cuanto al aporte de cargas de estos techos verdes a la estructura, Oberndorfer, Lundhom, et al. (2007) menciona que el parámetro estándar en peso es de 70 – 170 kg/m<sup>2</sup> para espesores entre 2 y 20 cm. Para Minke, (2011), las cargas son similares, dado que se encuentran alrededor de los 160 kg/m<sup>2</sup> para espesores de hasta 15 cm. En cuanto a construcción, Minke (2011) recomienda: *“durante la construcción del enjardinado del techo debe evitarse muy especialmente sobre pasar puntualmente la capacidad de carga admisible...”*. (p.28)



*Figura 1: Variedad de especies de plantas en un techo verde extensivo típico.*

*Figura 1: Tomada de Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services, (c) pg. 826, Karen liu*

### 2.3.2 Techos Verdes Intensivos

Los techos verdes intensivos a diferencia de los extensivos las capas tienen mayor altura por lo que pueden implementar diferentes tipos de vegetación, sin embargo debido al grado de altura que tienen este tipo de techos requieren riego constante para garantizar que la vegetación cumpla su función a cabalidad (Salgado, 2009) (Velazquez, 2005) (Oberndorfer, Lundhom, et al., 2007) (Minke, 2011).

Para Oberndorfer, Lundhom, et al. (2007) los techos intensivos son funcionales y son más estéticos que los extensivos, debido a la variedad que se pueden implementar Salgado (2009), a diferencia de los extensivos estos techos requieren de una planificación más detallada para el diseño debido a que las cargas que aportan a la estructura son 290 a 970 kg/m<sup>2</sup> (Oberndorfer, Lundhom, et al., 2007).





*Figura 2: Ejemplos de techos verdes intensivos y techos verdes extensivos.*

La *Figura 2* muestra ejemplos de techos verdes intensivos (a, b) con un espesor de sustrato profundo, con mas tipo de vegetación y altos requerimientos de mantenimiento y de techos verdes intensivos (c) poca profundidad de sustrato, vegetación poco profunda y bajos requerimientos de mantenimiento. *Tomada de Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services, (a, b, c) pg. 824, Brad Rowe.*

Según Velázquez (2005) los techos intensivos se parecen a un jardín en la cubierta, y también coincide con Salgado (2009) en que se pueden implementar variedad de plantas vivaces, leñosas y superficies de césped. Complementando lo anterior, Velázquez (2005) plantea que la principal diferencia entre un jardín en la cubierta y un techo verde es que este último se aplica para todo el área de la cubierta garantizando la función de drenar el agua lluvia procedente de la precipitación sin ningún tipo de obstáculo, y en cuanto a las cargas, éstas se distribuyen de manera uniforme en toda la cubierta.

Este tipo de techos necesita cuidados especiales que generan costos mayores, y a diferencia de los extensivos, no se deben implementar en cubiertas inclinadas. En cuanto al espesor, éstos deben tener una altura de sustrato mayor a 30 cm (Minke, 2011). El espesor del sustrato según Velázquez (2005) va desde 15 cm hasta 457 cm dependiendo del tipo de vegetación empleado.

Tabla 1 Comparación entre techos verdes extensivos e intensivos		
Características	Techo verde Extensivo	Techo verde Intensivo
Propósito	Funcionales, administración de aguas lluvias, aislamiento térmico, protección contra fuego.	Funcional y estético; incrementa el espacio vivo.
Requerimientos estructurales	Dentro de los parámetros de soporte de peso estándar del techo; adicional 70 a 170 kg por metro cuadrado (Dunnett and Kingsbury 2004).	Planificación necesaria para el diseño o mejoramiento estructural necesario. Adiciona de 290 a 970 kg por metro cuadrado
Tipo de sustrato	Ligero; alta porosidad, poca materia orgánica.	Va de ligero a pesado; alta porosidad, poca materia orgánica.
Profundidad promedio del sustrato comunidades vegetales	2 a 20 cm Poco crecimiento de comunidades vegetales y musgos seleccionados por sus cualidades estrés de tolerancia (e.g., <i>Sedum</i> spp., <i>Sempervivum</i> spp.)	Sin limitaciones más que las impuestas por el sustrato como profundidad, clima, peso de la estructura y exposición, y facilidades de riego.
Mantenimiento del riego	Necesitan poco o ningún riego, muy poco mantenimiento o nada, podada o cortada de la vegetación si es necesario.	Requieren riego a menudo. Mismo mantenimiento que requiere un jardín a nivel del suelo.
Costo (sobre membrana impermeable) accesibilidad	De 10 a 30 dólares por pie cuadrado (entre 100 y 300 dólares por metro cuadrado). Generalmente funcional más que accesible, necesita accesibilidad básica para su mantenimiento.	20 dólares o más por pie cuadrado (200 dólares por metro cuadrado) accesible; consideraciones de ordenamiento territorial.

*Tabla 1: Comparación. Principales diferencias entre techos verdes intensivos y extensivos*

En la *Tabla 1* se muestra una idea de la diferencia de costos que puede llegar a representar la implementación de estos dos tipos de techos verdes. El precio de implementar un techo verde depende de la tecnología empleada, la vegetación y el espesor del sustrato. *Tomada de Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services, Table 1, pg. 825.*

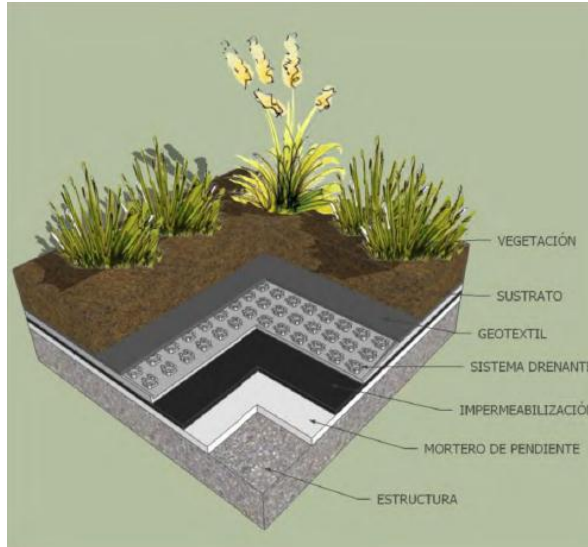
2.4 Componentes de techos verdes según la guía de techos verdes de Bogotá (Nieto Escalante, 2011)

En la guía de techos verdes de Bogotá, publicada en el 2011 por la secretaría distrital de ambiente exponen diferentes tipos techos verdes que se clasifican de acuerdo a la tecnología empleada, de acuerdo a su propósito y a su peso.

De acuerdo a la tecnología empleada los techos verdes son:

2.4.1 Multicapa monolíticos

Como su nombre lo indica son muchas capas puestas sobre el techo que previamente se ha impermeabilizado, y mantiene uniformidad sobre toda el área de la cubierta (*Figura 3*).



*Figura 3: Perfil de Techo Verde con tecnología: Multicapa Monolíticos*

Perfil de techo verde instalado con tecnología de sistemas multicapa monolítico. *Tomada de la guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg.56.*

#### 2.4.2 Multicapa elevados

A diferencia de los multicapa monolíticos las capas se apoyan sobre pedestales generando mayor altura en toda la estructura del techo verde (*Figura 4*).



*Figura 4: Perfil de Techo Verde con tecnología: Multicapa Elevados*

Perfil de techo verde instalado con tecnología de sistemas multicapa elevado. *Tomada de la guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg.57.*

#### 2.4.3 Sistemas tipo receptáculo

Son unidades individuales en forma de bandejas, materas, sacos o cajones que resguardan el medio de crecimiento, y la capa vegetal, también se apoyan sobre la cubierta ya impermeabilizada (*Figura 5*).

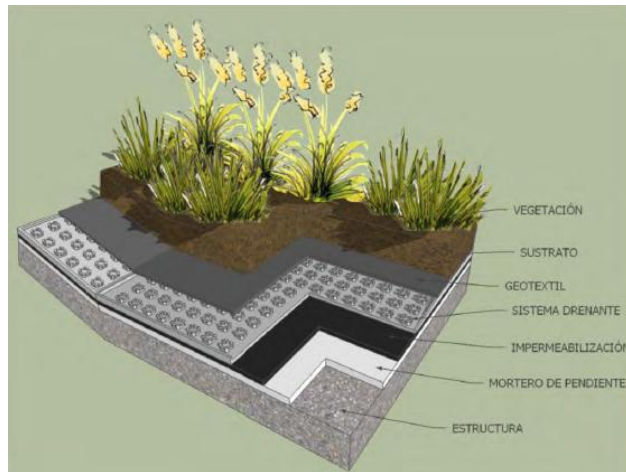


*Figura 5: Perfil de Techo Verde con tecnología: Sistemas tipo receptáculo*

Perfil de techo verde instalado con tecnología de sistemas tipo receptáculo. *Tomada de la guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg.58.*

#### 2.4.4 Monocapa

Se basan en tener solo una capa que abarca toda la estructura de un techo verde, es decir medio de crecimiento, capa vegetal etc. Regularmente los sistemas monocapa son tapetes pre sembrados anclados a la cubierta impermeabilizada (*Figura 6*).



*Figura 6: Perfil de Techo Verde con tecnología: Monocapa*

Perfil de techo verde instalado con tecnología monocapa. *Tomada de la guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg.59.*

#### 2.4.5 Sistemas aeropónicos

Estos sistemas a diferencia de los demás necesitan la nutrición por medio de riego continuo o vapor de las raíces expuestas, además estos tipos no tienen un medio de crecimiento como los anteriores que también hacen la parte de soporte, los aeropónicos necesitan un soporte adicional para la vegetación utilizada (*Figura 7*).



*Figura 7: Perfil de Techo Verde con tecnología: Sistemas aeropónicos*

Perfil de techo verde instalado con tecnología de sistemas aeropónicos. *Tomada de la guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg.60.*

## 2.5 Clasificación primaria de techos verdes según guía de techos verdes de Bogotá (Nieto Escalante, 2011)

El fin de este techo verde es favorecer las condiciones técnicas y fisiológicas insuperables para mantener la capa vegetal sobre la estructura intervenir.

- **Techo Verde autorregulado:** El techo verde autorregulado tiene la finalidad de aportar una cubierta verde a una estructura con el mínimo de inversión en materiales, dinero y peso. El paso de personas sobre este tipo de techo verde va a ser mínimo, solo para mantenimiento del mismo. El sistema debe ser muy liviano y en lo posible económico, para poder implementar y a adaptar vegetación especializada a las condiciones ambientales del sitio, de tal manera que no haya necesidad de realizar mantenimiento por riego adicional aparte del suministrado por la lluvia. El espesor del medio de crecimiento está entre 20mm y 120 mm (Nieto Escalante, 2011).
- **Techo Verde ajardinado:** El propósito de un techo verde ajardinado es que crear un espacio paisajístico transitable. Se emplea vegetación sin restricciones de tamaño y requieren de un espesor mayor de medio de crecimiento y mantenimiento seguido. Al ser transitables se les da un acabado de material

granular. El espesor del medio oscila entre 120 mm y 1500mm dependiendo de las especies vegetales. (Nieto Escalante, 2011).

- **Techos verdes ecológicos especializados:** El objetivo es mantener un paisaje biotopo especializado para conectarse con los elementos de la estructura ecológica principal. El peso máximo es de 450 Kg en estado saturado. La aprobación de este techo verde ecológico especial en un inmueble específico en Bogotá deberá ser abalado por el jardín botánico. (Nieto Escalante, 2011).
- **Techo huerta:** La finalidad de este techo huerta es la producción agrícola, para este fin se designan áreas de plantación y áreas de circulación que faciliten las actividades de siembra y recolección. Se deben implementar mecanismos de regulación ambiental (barreras de viento, corta soles, disipación de lluvia). Y tener siempre un sistema de riego de respaldo. (Nieto Escalante, 2011).

## 2.6 Clasificación secundaria de techos verdes según la guía de techos verdes de Bogotá

Esta clasificación hace alusión al grado de robustez o peso total de un techo verde y se debe tener en cuenta el peso total saturado. Todos los sistemas de clasificación primaria hacen parte de esta clasificación.

- **Techos verdes livianos:** Son sistemas que cumplen con los requisitos técnicos y propósitos de uso, utilizando tácticas para la reducción de peso total en estado de saturación.



- **Techos verdes moderados:** corresponde a una robustez intermedia con utilización de componentes y técnicas convencionales.
- **Techos verdes robustos:** Es un sistema de techo verde que tiene un peso representativo significativamente mayor a los moderados.



*Figura 8: Techo verde autorregulado, clasificación secundaria según sus cargas*

En la *Figura 8* se muestran las cargas que se aplican a este tipo de techo autorregulado según su clasificación secundaria. Tomada de *guía de techos verdes de Bogotá 2011*, pg. 17.

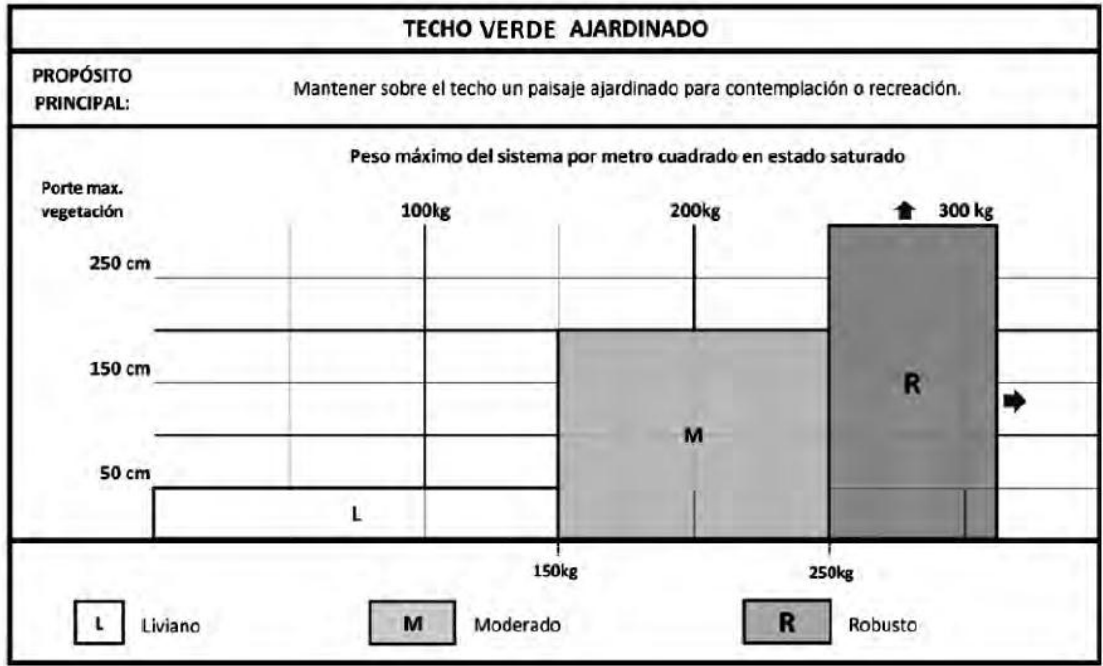


Figura 9: Techo verde ajardinado, clasificación secundaria según sus cargas

En la Figura 9 se muestran las cargas que se aplican a este tipo de techo ajardinado según su clasificación secundaria. Tomada de *guía de techos verdes de Bogotá 2011*, pg. 18.

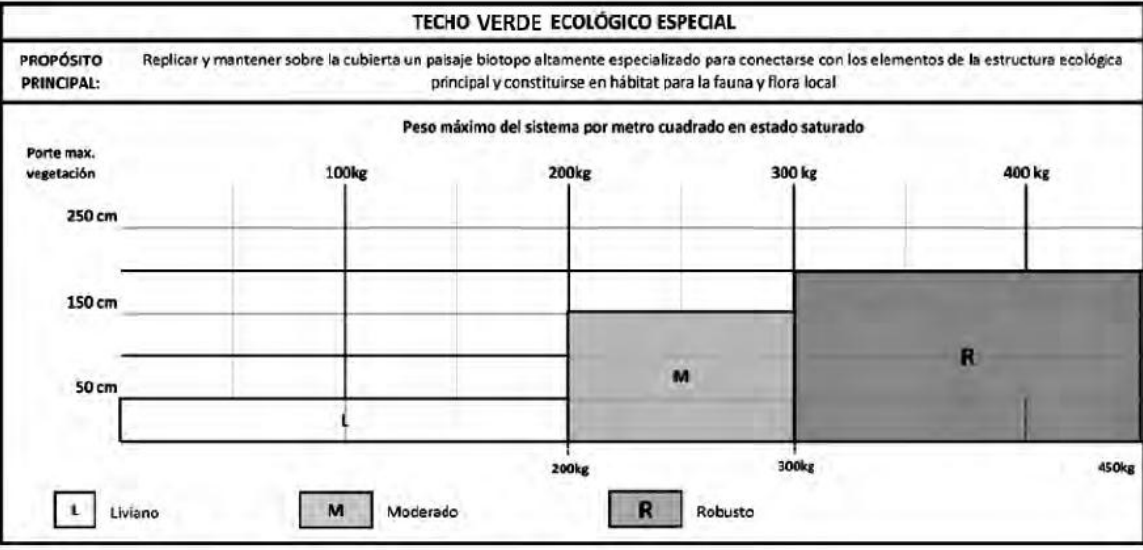
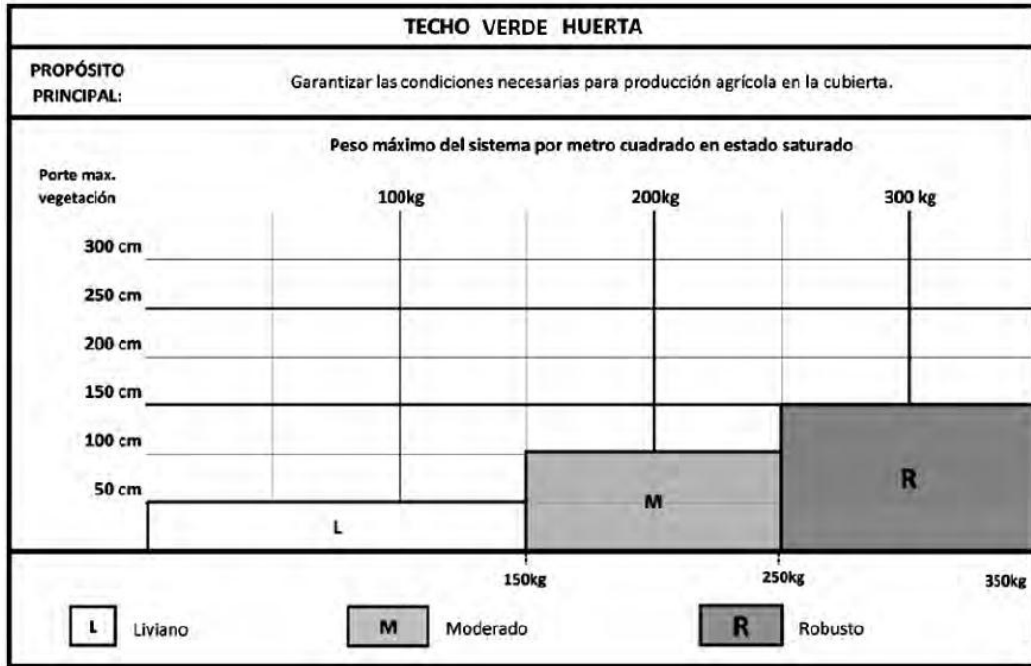


Figura 10: Techo verde ecológico especializado, clasificación secundaria según sus cargas

En la *Figura 10* se muestran las cargas que se aplican a este tipo de techo ecológico especializado según su clasificación secundaria. Tomada de *guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg. 18*.



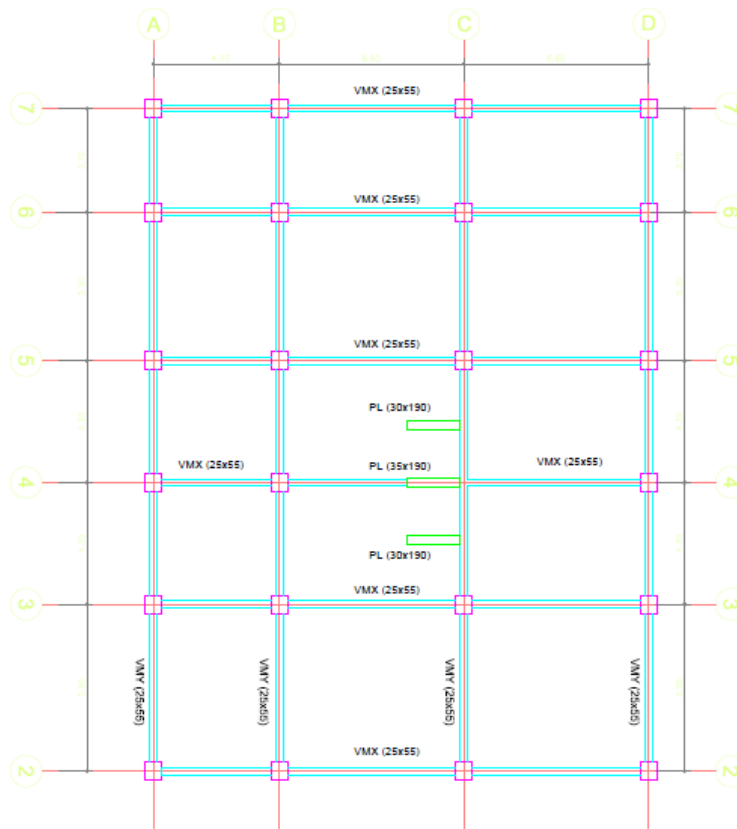
*Figura 11: Techo verde huerta, clasificación secundaria según sus cargas*

En la *Figura 11* se muestran las cargas que se aplican a este tipo de techo huerta según su clasificación secundaria. Tomada de *guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg. 19*.

### 3 ANÁLISIS DEL EDIFICIO

#### 3.1 ASPECTOS GENERALES

El edificio realizado es de geometría regular con 4 pisos y un semisótano (*Figuras 12, 13 y 14*), en el cual en su cubierta se le hará una inclusión de cargas debido a 4 diferentes tipos de techos verdes las cuales están normalizadas en la guía de techos verdes de Bogotá del año 2011. El edificio estudiado es una adaptación a un edificio existente. El edificio estará ubicado en un terreno tipo lacustre 300 para la ciudad de Bogotá. Los planos de todas las estructuras con diferentes cargas por techo verde se encontraran en el ANEXO 4. En los siguientes planos se da un vistazo a la estructura principal del edificio desde una vista en planta.



*Figura 12: Planta arquitectónica del edificio sin techo verde semi-sótano.*

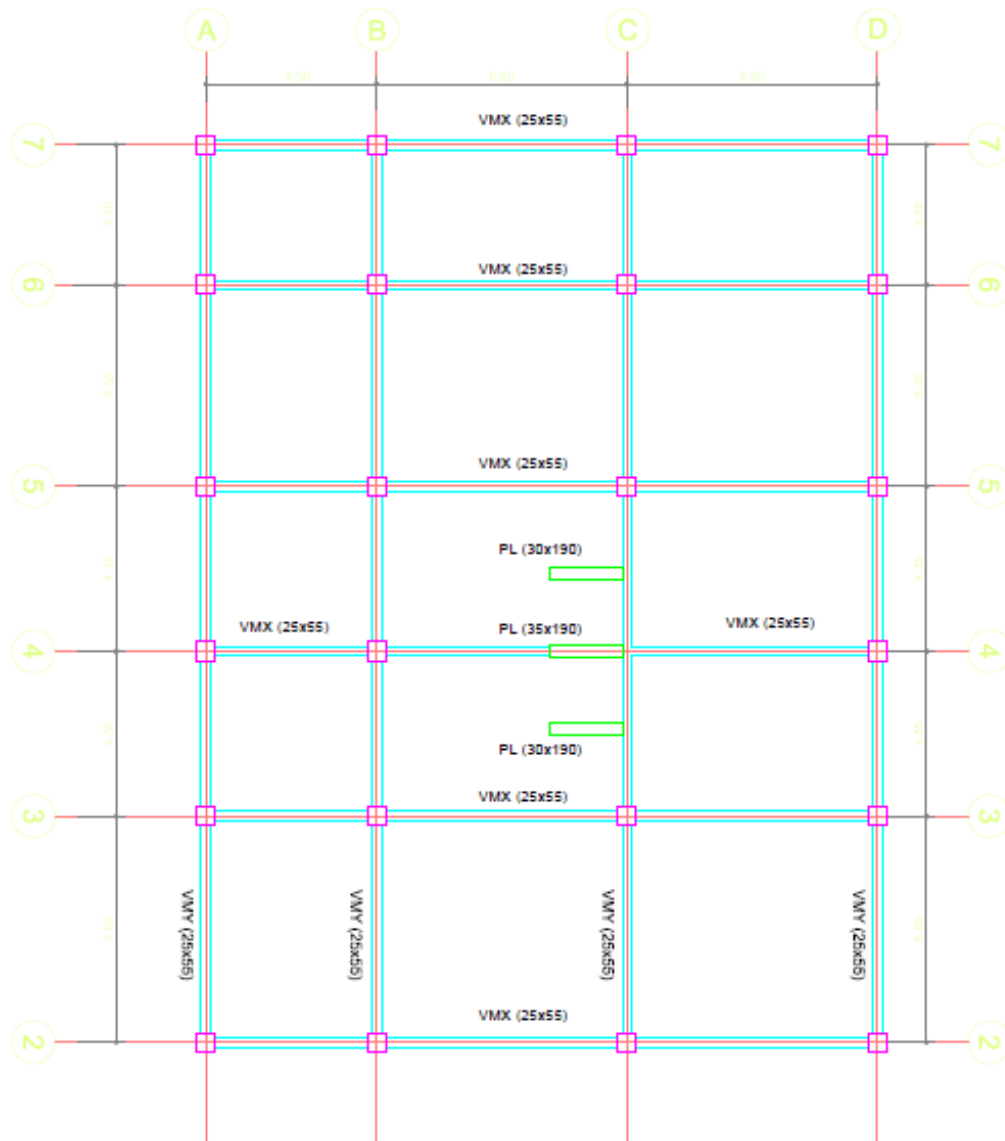


Figura 13: Planta arquitectónica del edificio sin techo verde pisos 1 y 2.

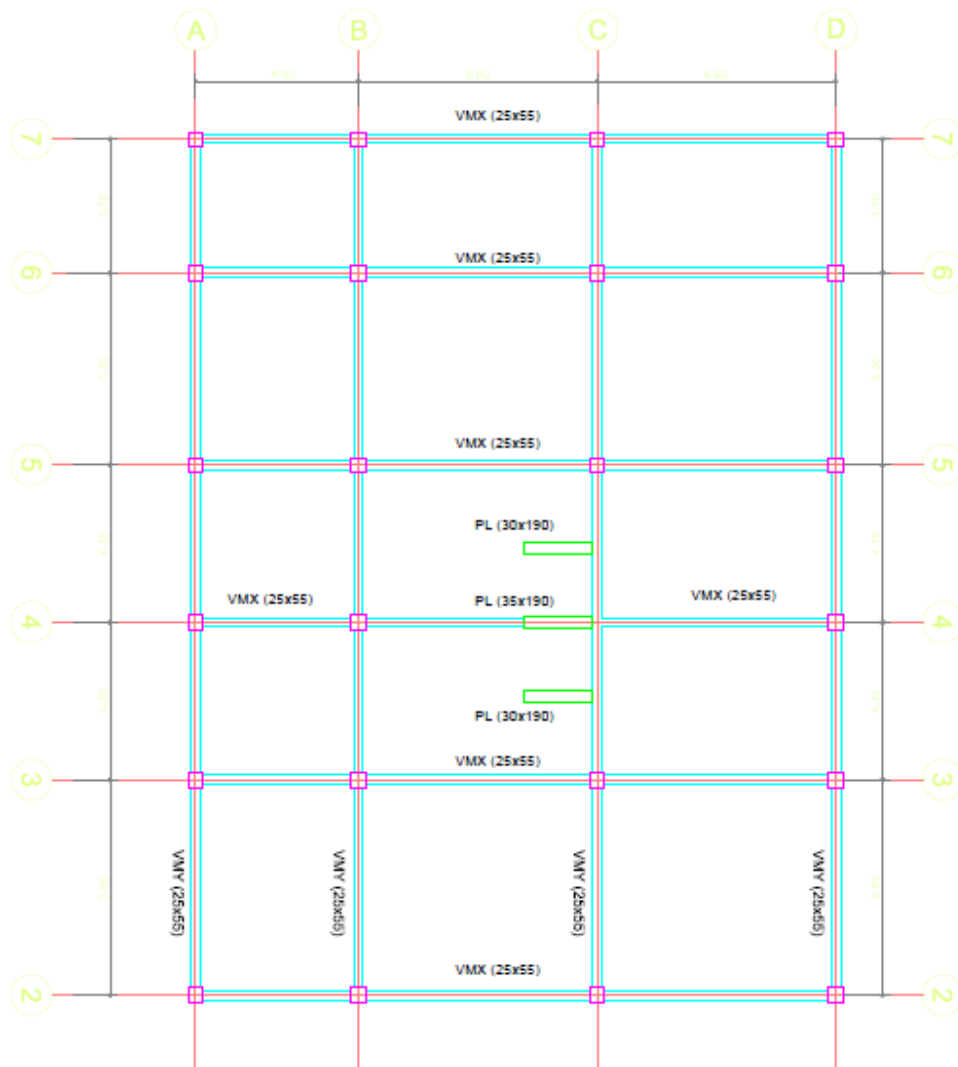


Figura 14: Planta arquitectónica del edificio sin techo verde pisos 3-4.

El edificio está ubicado en una zona de suelo tipo lacustre 300 en donde su coeficiente de aceleración horizontal pico efectivo ( $A_a$ ) es igual a 0.15, mientras que el coeficiente de velocidad horizontal pico efectiva ( $A_v$ ) un valor de 0.2. (Tomado de la NSR-10, Apéndice A-4).

El coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en periodos cortos ( $F_a$ ) y coeficiente de amplificación que afecta la zona de periodos intermedios ( $F_v$ ) se determinó según la NSR-10 que

los valores son  $F_a=1.05$  y  $F_v=2.9$ . El coeficiente de importancia (I) es de 1.0 por no ser de ocupación especial. (NSR-10, Capítulo A.2.5).

El periodo de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes ( $T_0$ ). (NSR-10, Capítulo A.2.6-6).

$$T_0 = 0.1 \frac{A_v F_v}{A_a F_a}$$

El Período de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo ( $T_c$ ). (NSR-10 Capítulo A.2.6-2)

$$T_C = 0.48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a}$$

El Período de vibración propio al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para períodos largos. ( $T_L$ ) (Capítulo A.2.6-4, NSR-10).

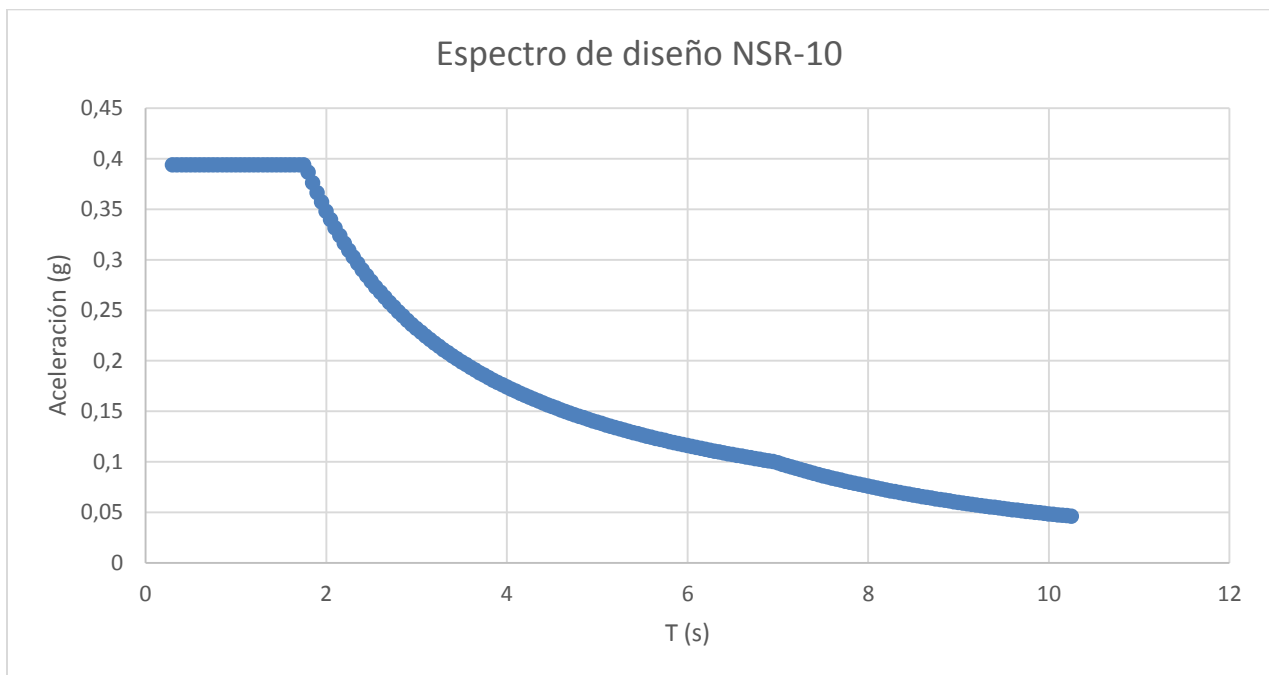
$$T_L = 2.4 F_v$$

Los resultados obtenidos fueron:

- Período inicial,  $T_0= 0.37$
- Período Corto,  $T_c= 1.77$
- Período Largo,  $T_l= 6.96$
- Máx. Aceleración en el espectro= 0.394

### 3.2 ESPECTRO DE DISEÑO

En la *Figura 15* se presenta el espectro de diseño de acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente.



*Figura 15: Espectro de diseño tipo lacustre 300*

### 3.3 MODELACIÓN DEL EDIFICIO

Durante la modelación del edificio en el programa SAP2000 V.15 se desarrollaron 4 modelos adicionales, es decir un modelo bajo las condiciones arquitectónicas de referencia previamente estudiado y diseñado para las condiciones establecidas por la norma. En todos los modelos se mantuvieron las características mecánicas de los materiales, sin embargo a cuatro (4) modelos se



les aplicaron diferentes cargas correspondientes a los techos verdes estudiados (autorregulado T1, ajardinado T2, ecológico especial T3 y huerta T4) y posteriormente se realizaron los cálculos pertinentes en cuanto a variación de la estructura principal, que corresponde al cambio en sus dimensiones de elementos estructurales. Seguido de esto al ver que con las cargas de techos verdes algunas derivas variaron se realizaron los diseños pertinentes para cumplir con los requerimientos de deriva establecidos por la norma.

### 3.3.1 Materiales

Durante la modelación del edificio se necesitó de la creación de 2 materiales esenciales, concreto y acero. Las características del concreto como su peso unitario y módulo de elasticidad se determinaron según las recomendaciones de la NSR-10 C.8.5.1, los valores introducidos en el programa fueron, para el peso unitario un valor de  $2100 \text{ Kg/m}^3$  y un módulo de elasticidad ( $E_c$ ) para el concreto de  $21 \text{ MPa}$ , el concreto se le asignó a las columnas, vigas y placas del modelo.

De igual manera se introdujeron los valores para el acero de refuerzo que van a llevar las columnas, las vigas y las placas de concreto; Módulo de elasticidad ( $E_c$ )  $200.000 \text{ MPa}$  y un peso unitario de  $7800 \text{ Kg/m}^3$ , recomendación de la NSR-10 C.8.5.2).

### 3.3.2 Elementos Estructurales

Las vigas, columnas y muros de concreto del modelo se diseñaron como elementos “frames”, se crearon 6 tipos de “frame” para los distintos tipos de columna, viga y placa que tiene el modelo.

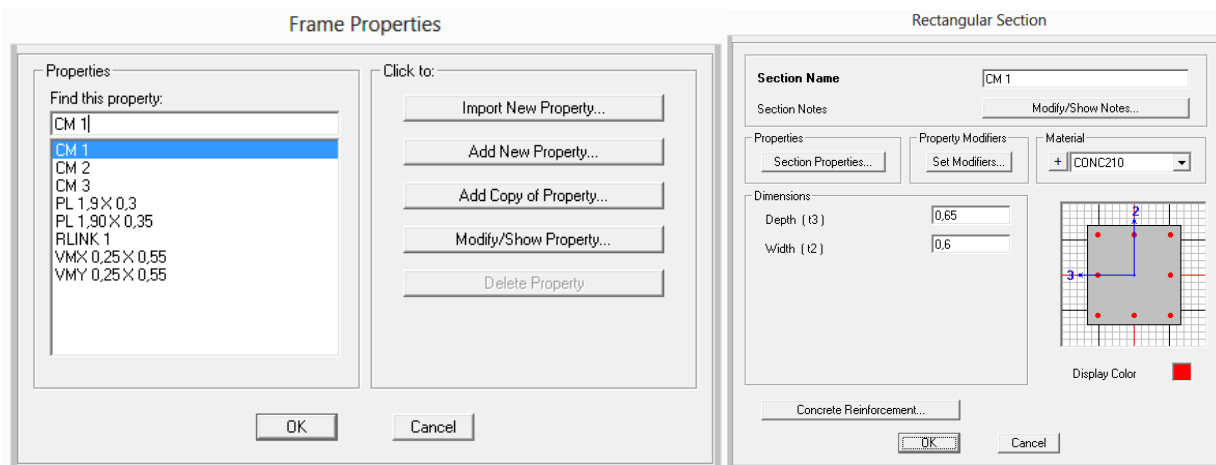


Figura 16: Frames utilizados en SAP2000 y Perfil columna de concreto introducido en SAP2000

A continuación en la *Tabla 2* se presentan los elementos estructurales principales del edificio que resultan del análisis y el diseño del modelo sin techo verde:

Edificio sin techo verde	CM 1 (m)	CM 2 (m)	CM 3 (m)	PL 1 (m)	PL 2 (m)	Vx (m)	Vy (m)
	refuerzo	refuerzo	refuerzo	refuerzo	refuerzo	refuerzo	refuerzo
	0,6x0,65	0,5x0,5	0,4x0,4	1,9x0,30	1,9x0,35	0,25x0,55	0,25x0,55
	8#9	10#6	8#6	18#7	14#8	10#7	10#7

Tabla 2: Dimensiones de columnas y refuerzo del edificio sin techo verde

DONDE:

**CM1:** Columnas del semisótano

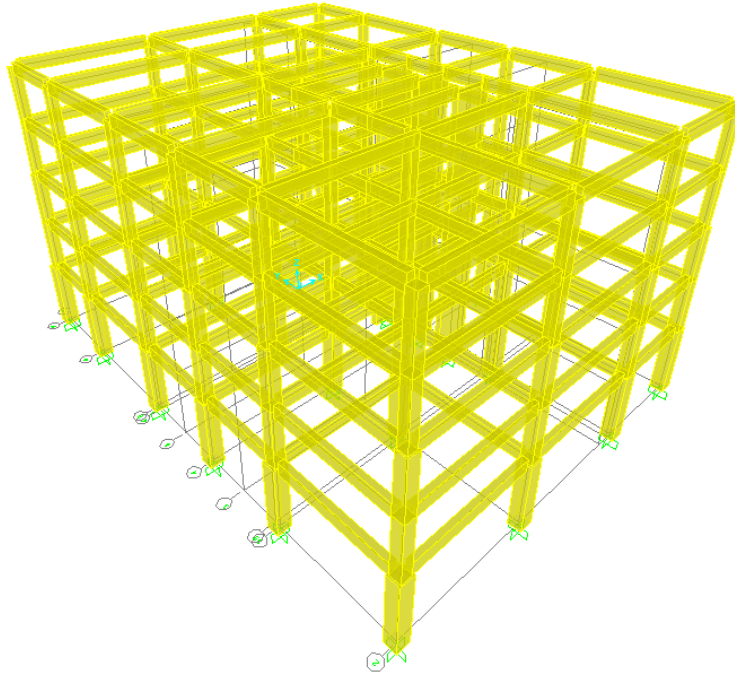
**CM2:** Columnas de los pisos 1 y 2

**CM3:** Columnas de los pisos 3 y 4

**Vy:** Vigas en sentido Y

**Vx:** Vigas en sentido X

**PL1 y PL2:** los muros de corte (tomados de la arquitectura en referencia).



*Figura 17: Modelo Estructural SAP2000 v15*

Se realizó el diseño bajo los lineamientos del programa utilizado SAP2000 v15 tomando la arquitectura de un proyecto existente (*Figura 17*), sin embargo se modificó en cuanto a sus dimensiones de elementos estructurales para las condiciones estudiadas bajo el cálculo de las cargas de carga muerta y viva del edificio.

### 3.3.3 Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga fueron determinadas a partir de las recomendaciones de la NSR-10

Capítulo B.2.4.2 - Combinaciones básicas como se muestra en *Tabla 3*.

Combinación 1	1.4 D + 1.4 CMTV
Combinación 2	1.2 D + 1.2 CMTV + 1.6 L + 1.6 CVTV
Combinación 3	1.2 D + 1.2 CMTV + 1.6 L + 1.6 CVTV + 1 Sx + 0.3 Sy
Combinación 4	1.2 D + 1.2 CMTV + 1.6 L + 1.6 CVTV - 1 Sx - 0.3 Sy
Combinación 5	1.2 D + 1.2 CMTV + 1.6 L + 1.6 CVTV + 1 Sy + 0.3 Sx
Combinación 6	1.2 D + 1.2 CMTV + 1.6 L + 1.6 CVTV - 1 Sy - 0.3 Sx
Combinación 7	1 D + 1 CMTV + 1 L + 1 CVTV + 1 Sx + 0.3 Sy
Combinación 8	1 D + 1 CMTV + 1 L + 1 CVTV + 1 Sy + 0.3 Sx
Combinación 9	1 D + 1 CMTV + 1 L + 1 CVTV

*Tabla 3: Combinaciones de carga utilizadas en el modelo SAP2000*

Estas combinaciones fueron ingresadas al modelo y eventualmente el modelo fue cargado (carga muerta, carga viva y cargas de sismo, todas por recomendación de la NSR-10). En la *Tabla 4* se presentan los valores de carga muerta, viva y mampostería obtenidos del diseño y de la NSR-10.

#### CALCULO DE CARGAS SOBRE VIGAS

CM POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m2) =	<b>629</b>
CV POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m2) =	<b>200</b>
CM POR ML DE MAMPOSTERÍA SIN FACTORIZAR (Kg/m) =	<b>182</b>

*Tabla 4: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico autorregulado.*

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
A (2 a 7)	1	3.3	2076	182	2258	660
	2	3.3	2076	182	2258	660
	3	3.3	2076	182	2258	660
	4	3.3	2076	182	2258	660
	5	3.3	1349	73	1422	240
B (2 a 7)	1	6.6	4151	182	4333	1320
	2	6.6	4151	182	4333	1320
	3	6.6	4151	182	4333	1320
	4	6.6	4151	182	4333	1320
	5	6.6	2698	73	2771	480
C (2 a 7)	1	5.55	3491	182	3673	1110
	2	5.55	3491	182	3673	1110
	3	5.55	3491	182	3673	1110
	4	5.55	3491	182	3673	1110
	5	5.55	2269	73	2342	404
D (2 a 7)	1	2.25	1415	182	1597	450
	2	2.25	1415	182	1597	450
	3	2.25	1415	182	1597	450
	4	2.25	1415	182	1597	450
	5	2.25	920	73	993	164

Tabla 5: Cálculo de carga muerta y carga viva sobre el edificio sin techo verde sentido Y

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
3 a 6	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
2	1	1	629	182	811	200
	2 a 4 (AB)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (BC)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (CD)	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
7	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73

*Tabla 6: Cálculo de carga muerta y carga viva sobre el edificio sin techo verde sentido X*

Una vez cargado el edificio se realizó el respectivo diseño de éste, para calcular la cantidad de acero, concreto y formaletas que se necesitaría para la construcción del edificio (*Tablas 5 y 6*).

Se realizó el dimensionamiento del edificio después de disponer las cargas en los modelos, dando como resultado tres (3) tipos de columnas, dos tipos de muro de corte (placa vertical) de ascensor que se tomaron como referencia de los planos arquitectónicos y una viga tipo para todos los modelos.

A continuación, en las *Tablas 7, 8 y 9* se presentan las cantidades de concreto, acero y formaleta estimados:

**Cantidades de concreto para el edificio que no presenta carga adicional por techo verde.**

<b>CANTIDADES DE CONCRETO EDIFICIO SIN TECHO VERDE: Para columnas</b>						
PISO	SECCION (cm)	AREA SECCIÓN (m2)	ALTURA DE PISO (m)	# COLUMNAS	Vol. Concreto (m3)	Peso (Ton)
S-Sótano	60X65	0.39	3.3	23	29.60	71.04
1	50X55	0.25	2.55	23	14.66	35.19
2	50X55	0.25	2.55	23	14.66	35.19
3	50X50	0.16	2.55	23	9.38	22.52
4	50X50	0.16	2.55	23	9.38	22.52
	PL1 190X35	0.57	13.5	-	15.39	36.94
	PL2 190X35	0.665	13.5	-	8.98	21.55
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>					102.06	244.95

*Tabla 7: Cálculo volumen de concreto en vigas y muros de ascensor para el edificio sin techo verde*

<b>CANTIDADES DE CONCRETO EDIFICIO SIN TECHO VERDE: Para Vigas</b>					
PISO	SECCION (cm)	AREA TOTAL (m2)	H viga (m)	Vol. Concreto (m3)	Peso (Ton)
S-Sótano	25x55	44.031	0.55	24.22	58.12
1	25x55	45.168	0.55	24.84	59.62
2	25x55	45.168	0.55	24.84	59.62
3	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
4	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>				124.58	

*Tabla 8: Cálculo volumen de concreto en vigas para el edificio sin techo verde*

### Cantidades de acero para el edificio que no presenta carga por techo verde

CANTIDADES DE ACERO EDIFICIO SIN TECHO VERDE: Para columnas									
Piso	Altura	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	W (kg)
S-Sótano	3.3	9	645	0.000645	0.00213	8	0.392	23	3074.41
1	2.55	6	284	0.000284	0.00072	10	0.167	23	1307.54
2	2.55	6	284	0.000284	0.00072	10	0.167	23	1307.54
3	2.55	6	284	0.000284	0.00072	8	0.133	23	1046.03
4	2.55	6	284	0.000284	0.00072	8	0.133	23	1046.03
PL 1	13.5	7	387	0.000387	0.00522	18	0.188	2	1476.44
PL 2	13.5	8	510	0.00051	0.00689	14	0.096	1	756.66
TOTAL W (kg)									10014.67

Tabla 9: Cálculo cantidad de acero en columnas y muros de ascensor para el edificio sin techo verde

Ya que el edificio tiene un solo tipo de vigas en toda la estructura se realizó el cálculo de acero para las mismas en toda la estructura como se indica en la *Tabla 10*.

CANTIDADES DE ACERO EDIFICIO SIN TECHO VERDE: Para Vigas									
Piso	L(m)	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
1	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
2	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
3	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
4	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
TOTAL W (kg)									27614.97

Tabla 10: Cálculo cantidad de acero para vigas de la estructura con y sin carga por techo verde



## Formaletas para el edificio que no presenta carga por techo verde

CANTIDADES DE FORMAleta EDIFICIO SIN TECHO VERDE: Para columnas y muros de corte						
PISO	Dimensiones		Altura piso	Área (formaleta) /Columna(m2)	# Columnas	Área total formaleta (m2)
#	B(m)	H(m)	(m)			
Semisótano	0.6	0.65	3.3	8.25	23	189.75
1	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
2	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
3	0.4	0.4	2.55	4.08	23	93.84
4	0.4	0.4	2.55	4.08	23	93.84
PL1	0.35	1.9	13.5	60.75	2	121.5
PL2	0.35	1.9	13.5	60.75	1	60.75
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)						794.28

*Tabla 11: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que no presenta carga por techo verde*

CANTIDADES FORMAleta EDIFICIO SIN TECHO VERDE: Para vigas				
PISO	Dimensiones		L-total/ piso	Área (formaleta) /Piso(m2)
#	B(m)	H(m)	(m)	
Semisótano	0.25	0.55	190	256.5
1	0.25	0.55	181.8	245.43
2	0.25	0.55	181.8	245.43
3	0.25	0.55	186.4	251.64
4	0.25	0.55	186.4	251.64
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)				1250.64

*Tabla 12: Formaleta total para vigas en el edificio que no presenta carga por techo verde*

Con estos cálculos iniciales procedimos a cargar el modelo inicial sin techo verde con las cuatro (4) diferentes cargas en su cubierta, correspondientes a las cargas de techo verde más críticas establecidas por la guía de techos verdes de Bogotá (Tablas 11 y 12).

Clasificación primaria	Clasificación secundaria		
	Liviano	Moderado	Robusto
Techo Biótico Ecológico	hasta 80 Kg/m <sup>2</sup>	más de 80 y hasta 120 Kg/m <sup>2</sup>	más de 120 y hasta 150 Kg/m <sup>2</sup>
Techo Biótico Ajardinado	hasta 150 Kg/m <sup>2</sup>	más de 150 y hasta 200 Kg/m <sup>2</sup>	más de 250 Kg/m <sup>2</sup>
Techo Biótico Ecológico Especial	hasta 200 Kg/m <sup>2</sup>	más de 200 y hasta 300 Kg/m <sup>2</sup>	más de 300 y hasta 450 Kg/m <sup>2</sup>
Techo Huerta	hasta 150 Kg/m <sup>2</sup>	más de 150 y hasta 250 Kg/m <sup>2</sup>	más de 250 y hasta 350 Kg/m <sup>2</sup>

*Tabla 13: Magnitud de las cargas según el techo verde por la guía de techos verdes de Bogotá.*

*Tomada de la guía de techos verdes de Bogotá 2011, pg.17.*

Para el análisis de cargas ejercidas por los sistemas de techos verdes según la clasificación primaria (T1 autorregulado, T2 ajardinado, T3 ecológico especial y T4 huerta), se tomaron los valores máximos de masa relacionados en la *Tabla 13*, es decir para el techo T1 autorregulado que hace referencia al techo biótico ecológico se tomó una carga máxima de 150 kg/m<sup>2</sup> que hace parte de todo el sistema de techo verde, es decir partes que lo componen y agua retenida o peso saturado del estrato. Debido a que la Guía de Techos Verdes no indica un límite de altura o de peso sobre el tipo de techo verde biótico ajardinado, se decidió tomar una carga de 500 kg/m<sup>2</sup> con el fin de mostrar la tendencia en cuanto a crecimiento de pesos de los techos verdes estudiados, siendo este último el más pesado de las cuatro alternativas. Para el techo T3 ecológico especial se tomó una carga de 450 kg/m<sup>2</sup> que lo compone el agua retenida y sus componentes, y por último para el techo T4 huerta se tomó un peso de 350 kg/m<sup>2</sup> siguiendo los mismos parámetros que lo componen.

Una vez se cargaron cada uno de los cuatro (4) nuevos modelos correspondientes a los 4 tipos de techos verdes con sus respectivas cargas, se hizo una verificación de derivas y se realizó una comparación de cada uno de estos nuevos diseños con el modelo inicial sin techo verde, para

hacer una revisión sobre como el techo verde afectaba los desplazamientos y las derivas del edificio; más adelante en el análisis de los resultados se presentara la comparación entre estos modelos.

Para cada uno de los modelos a los cuales se les hizo la inclusión de una nueva carga por techo verde, se hizo un nuevo diseño estructural y se vieron modificadas las dimensiones de las columnas, la cantidad acero y formaletas utilizadas, afectando los costos directos de cada edificación según su nueva cubierta verde.

Se cargaron los modelos con diferente tipo de carga por techo verde, la carga que sale en la guía de techo verde de Bogotá es únicamente la carga muerta en función del espesor del sustrato. Para la carga viva seguimos las recomendaciones de la NSR-10 carga viva para cubiertas con vegetación o enjardinadas (Tabla B.4.2.1-2, NSR-10) como se muestra en la *Figura 18*.

Cargas vivas mínimas en cubiertas

Tipo de cubierta	Carga uniforme (kN/m <sup>2</sup> ) m <sup>2</sup> de área en planta	Carga uniforme (kgf/m <sup>2</sup> ) m <sup>2</sup> de área en planta
Cubiertas, Azoteas y Terrazas	la misma del resto de la edificación (Nota-1)	la misma del resto de la edificación (Nota-1)
Cubiertas usadas para jardines de cubierta o para reuniones	5.00	500
Cubiertas inclinadas con más de 15° de pendiente en estructura metálica o de madera con imposibilidad física de verse sometidas a cargas superiores a la aquí estipulada	0.35	35
Cubiertas inclinadas con pendiente de 15° o menos en estructura metálica o de madera con imposibilidad física de verse sometidas a cargas superiores a la aquí estipulada	0.50	50

*Figura 18: Tabla B.4.2.1-2 tomada de la NSR-10, Titulo B.*

### 3.3.4 CÁLCULOS DE CARGAS PARA TECHOS VERDES

- Techo Biótico Ecológico (Autorregulado) **T1**

### CALCULO DE CARGAS SOBRE VIGAS

CM POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m2) =	<b>629</b>
CV POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m2) =	<b>200</b>
CM POR ML DE MAMPOSTERÍA SIN FACTORIZAR (Kg/m) =	<b>182</b>
<b>CM DE TECHO VERDE AUTORREGULADO (kg/m2)=</b>	<b>150</b>
<b>CV POR M2 EN CUBIERTA (Kg/m2) =</b>	<b>500</b>

*Tabla 14: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico autorregulado.*

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
A (2 a 7)	1	3.3	2076	182	2258	660
	2	3.3	2076	182	2258	660
	3	3.3	2076	182	2258	660
	4	3.3	2076	182	2258	660
	5	3.3	1349	73	1422	240
CARGA TECHO VERDE	TV	3.3	495		495	1650
B (2 a 7)	1	6.6	4151	182	4333	1320
	2	6.6	4151	182	4333	1320
	3	6.6	4151	182	4333	1320
	4	6.6	4151	182	4333	1320
	5	6.6	2698	73	2771	480
CARGA TECHO VERDE	TV	6.6	990		990	3300
C (2 a 7)	1	5.55	3491	182	3673	1110
	2	5.55	3491	182	3673	1110
	3	5.55	3491	182	3673	1110
	4	5.55	3491	182	3673	1110
	5	5.55	2269	73	2342	404
CARGA TECHO VERDE	TV	5.55	833		833	2775
D (2 a 7)	1	2.25	1415	182	1597	450
	2	2.25	1415	182	1597	450
	3	2.25	1415	182	1597	450
	4	2.25	1415	182	1597	450
	5	2.25	920	73	993	164
CARGA TECHO VERDE	TV	2.25	338		338	1125

*Tabla 15: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico autorregulado sobre el edificio en sentido Y*

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
3 a 6	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	150		150	500
2	1	1	629	182	811	200
	2 a 4 (AB)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (BC)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (CD)	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	150		150	500
7	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	150		150	500

Tabla 16: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico autorregulado sobre el edificio en sentido X

- Techo Biótico Ajardinado T2

#### CALCULO DE CARGAS SOBRE VIGAS

CM POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m <sup>2</sup> ) =	<b>629</b>
CV POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m <sup>2</sup> ) =	<b>200</b>
CM POR ML DE MAMPOSTERÍA SIN FACTORIZAR (Kg/m) =	<b>182</b>
<b>CM DE TECHO VERDE AJARDINADO (kg/m<sup>2</sup>)=</b>	<b>550</b>
<b>CV POR M2 EN CUBIERTA (Kg/m<sup>2</sup>) =</b>	<b>500</b>

Tabla 17: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico Ajardinado.

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
A (2 a 7)	1	3.3	2076	182	2258	660
	2	3.3	2076	182	2258	660
	3	3.3	2076	182	2258	660
	4	3.3	2076	182	2258	660
	5	3.3	1349	73	1422	240
CARGA TECHO VERDE	TV	3.3	1815		1815	1650
B (2 a 7)	1	6.6	4151	182	4333	1320
	2	6.6	4151	182	4333	1320
	3	6.6	4151	182	4333	1320
	4	6.6	4151	182	4333	1320
	5	6.6	2698	73	2771	480
CARGA TECHO VERDE	TV	6.6	3630		3630	3300
C (2 a 7)	1	5.55	3491	182	3673	1110
	2	5.55	3491	182	3673	1110
	3	5.55	3491	182	3673	1110
	4	5.55	3491	182	3673	1110
	5	5.55	2269	73	2342	404
CARGA TECHO VERDE	TV	5.55	3053		3053	2775
D (2 a 7)	1	2.25	1415	182	1597	450
	2	2.25	1415	182	1597	450
	3	2.25	1415	182	1597	450
	4	2.25	1415	182	1597	450
	5	2.25	920	73	993	164
CARGA TECHO VERDE	TV	2.25	1238		1238	1125

*Tabla 18: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ajardinado sobre el edificio en sentido Y*

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
3 a 6	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	550		550	500
2	1	1	629	182	811	200
	2 a 4 (AB)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (BC)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (CD)	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	550		550	500
7	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	550		550	500

Tabla 19: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ajardinado sobre el edificio en sentido X

- Techo Biótico Ecológico Especial T3

#### CALCULO DE CARGAS SOBRE VIGAS

CM POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m <sup>2</sup> ) =	<b>629</b>
CV POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m <sup>2</sup> ) =	<b>200</b>
CM POR ML DE MAMPOSTERÍA SIN FACTORIZAR (Kg/m) =	<b>182</b>
<b>CM DE TECHO VERDE ECOLOGICO ESPECIAL (kg/m<sup>2</sup>)=</b>	<b>450</b>
<b>CV POR M2 EN CUBIERTA (Kg/m<sup>2</sup>) =</b>	<b>500</b>

Tabla 20: Cálculo de cargas sobre vigas para techo biótico Ecológico Especial.

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
A (2 a 7)	1	3.3	2076	182	2258	660
	2	3.3	2076	182	2258	660
	3	3.3	2076	182	2258	660
	4	3.3	2076	182	2258	660
	5	3.3	1349	73	1422	240
CARGA TECHO VERDE	TV	3.3	1485		1485	1650
B (2 a 7)	1	6.6	4151	182	4333	1320
	2	6.6	4151	182	4333	1320
	3	6.6	4151	182	4333	1320
	4	6.6	4151	182	4333	1320
	5	6.6	2698	73	2771	480
CARGA TECHO VERDE	TV	6.6	2970		2970	3300
C (2 a 7)	1	5.55	3491	182	3673	1110
	2	5.55	3491	182	3673	1110
	3	5.55	3491	182	3673	1110
	4	5.55	3491	182	3673	1110
	5	5.55	2269	73	2342	404
CARGA TECHO VERDE	TV	5.55	2498		2498	2775
D (2 a 7)	1	2.25	1415	182	1597	450
	2	2.25	1415	182	1597	450
	3	2.25	1415	182	1597	450
	4	2.25	1415	182	1597	450
	5	2.25	920	73	993	164
CARGA TECHO VERDE	TV	2.25	1013		1013	1125

*Tabla 21: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ecológico especial sobre el edificio en sentido Y*



EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
3 a 6	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	450		450	500
2	1	1	629	182	811	200
	2 a 4 (AB)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (BC)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (CD)	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	450		450	500
7	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	450		450	500

Tabla 22: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo biótico ecológico especial sobre el edificio en sentido X

- Techo Huerta **T4**

**CALCULO DE CARGAS SOBRE VIGAS**

CM POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m <sup>2</sup> ) =	<b>629</b>
CV POR M2 EN PLACA SIN FACTORIZAR (Kg/m <sup>2</sup> ) =	<b>200</b>
CM POR ML DE MAMPOSTERÍA SIN FACTORIZAR (Kg/m) =	<b>182</b>
<b>CM DE TECHO VERDE ECOLOGICO ESPECIAL (kg/m<sup>2</sup>)=</b>	<b>350</b>
<b>CV POR M2 EN CUBIERTA (Kg/m<sup>2</sup>) =</b>	<b>500</b>

Tabla 23: Cálculo de cargas sobre vigas para Techo Huerta.

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
A (2 a 7)	1	3.3	2076	182	2258	660
	2	3.3	2076	182	2258	660
	3	3.3	2076	182	2258	660
	4	3.3	2076	182	2258	660
	5	3.3	1349	73	1422	240
CARGA TECHO VERDE	TV	3.3	1155		1155	1650
B (2 a 7)	1	6.6	4151	182	4333	1320
	2	6.6	4151	182	4333	1320
	3	6.6	4151	182	4333	1320
	4	6.6	4151	182	4333	1320
	5	6.6	2698	73	2771	480
CARGA TECHO VERDE	TV	6.6	2310		2310	3300
C (2 a 7)	1	5.55	3491	182	3673	1110
	2	5.55	3491	182	3673	1110
	3	5.55	3491	182	3673	1110
	4	5.55	3491	182	3673	1110
	5	5.55	2269	73	2342	404
CARGA TECHO VERDE	TV	5.55	1943		1943	2775
D (2 a 7)	1	2.25	1415	182	1597	450
	2	2.25	1415	182	1597	450
	3	2.25	1415	182	1597	450
	4	2.25	1415	182	1597	450
	5	2.25	920	73	993	164
CARGA TECHO VERDE	TV	2.25	788		788	1125

Tabla 24: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo huerta sobre el edificio en sentido Y

EJE	PISO	ANCHO TRIBUTARIO (m)	CM ADICIONAL en placa (Kg/m)	CM DE MAMPOSTERÍA SOBRE VIGA (Kg/m)	CM total (Kg/m)	CV total (Kg/m)
3 a 6	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	350		350	500
2	1	1	629	182	811	200
	2 a 4 (AB)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (BC)	1	629	182	811	200
	2 a 4 (CD)	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	350		350	500
7	1	1	629	182	811	200
	2	1	629	182	811	200
	3	1	629	182	811	200
	4	1	629	182	811	200
	5	1	409	73	482	73
CARGA TECHO VERDE	TV	1	350		350	500

*Tabla 25: Cálculo de carga muerta, carga viva y carga por techo huerta sobre el edificio en sentido X*

En las *Tablas 14 a 25*, para todos los tipos de techo verde de la clasificación primaria, se encuentran los cálculos de cargas sobre vigas, cálculos de carga muerta y carga viva en la dirección X y Y del edificio analizado con las diferentes cargas de techos verdes.

3.3.5 Dimensionamiento de columnas y acero de refuerzo para cada una de las condiciones de techo verde.

Una vez cargados todos los modelos, se verificaron derivas y desplazamientos en cada edificio, en la columna más crítica debido a la carga de techo verde. Seguido de esto, se hizo la revisión de acero para cada columna, viga y muro de concreto de ascensor del edificio, y se tuvo que hacer un nuevo diseño para ampliar la sección de las columnas o aumentar su refuerzo para que el diseño cumpliera los nuevos requerimientos debidos a las cargas de techos verdes.

Las nuevas dimensiones del análisis y diseño para los diferentes edificios con tipos de techo verde se encuentran consignadas en la *Tabla 26*.

	T1	T2	T3	T4
CM 1 refuerzo	0,6x0,65 12#7	0,65x0,65 16#6	0,6x0,7 10#9	0,65x0,65 16#6
CM 2 refuerzo	0,5x0,55 10#6	0,5x0,55 12#6	0,5x0,5 14#7	0,5x0,55 14#5
CM 3 refuerzo	0,5x0,5 16#5	0,5x0,5 12#7	0,45x0,45 12#8	0,5x0,5 18#5
PL 1 refuerzo	1,9x0,35 18#7	1,9x0,35 18#7	1,9x0,35 18#7	1,9x0,35 18#7
PL 2 refuerzo	1,9x0,35 14#8	1,9x0,35 14#8	1,9x0,35 14#8	1,9x0,35 14#8
Vx refuerzo	0,25x0,55 10#7	0,25x0,55 10#7	0,25x0,55 10#7	0,25x0,55 10#7
Vy refuerzo	0,25x0,55 10#7	0,25x0,55 10#7	0,25x0,55 10#7	0,25x0,55 10#7

*Tabla 26: Dimensiones de concreto y cantidad de acero para los modelos cargados con techos verdes. (T1: Techo autorregulado, T2: Techo ajardinado, T3: Ecológico especial, T4: Techo huerta)*

Una vez hecho el dimensionamiento de cada una de los elementos estructurales se hicieron los cálculos de cantidades de obra de la estructura principal por piso. A continuación, en las *Tablas 27 a 50* se presentan los cálculos correspondientes a las cantidades de obra sin techo verde y las 4 alternativas propuestas por la *Guía de techos verdes de Bogotá de 2011*:

### 3.4 TECHO VERDE AUTORREGULADO

En las *Tablas 27 a 32* se encuentran consignados los cálculos de cantidades de obra concernientes al techo verde autorregulado (T1)

#### Cálculo de volumen de concreto

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO VERDE AUTORREGULADO (T1): Para Columnas y Muros</b>						
PISO	SECCION (cm)	ÁREA SECCION (m <sup>2</sup> )	ATLTURA DE PISO	# COLUMNAS	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	Peso (Ton)
S-Sótano	60X65	0.39	3.3	23	29.60	71.04
1	50X55	0.275	2.55	23	16.13	38.71
2	50X55	0.275	2.55	23	16.13	38.71
3	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
4	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
	PL1 190X35	0.665	13.5	-	17.96	43.09
	PL2 190X35	0.665	13.5	-	8.98	21.55
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>					118.12	283.48

*Tabla 27: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde autorregulado*

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO VERDE AUTORREGULADO (T1): Para Vigas</b>					
PISO	SECCION (cm)	ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )	H viga (m)	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	w (Ton)
S-Sótano	25x55	44.031	0.55	24.22	58.12
1	25x55	44.931	0.55	24.71	59.31
2	25x55	44.931	0.55	24.71	59.31
3	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
4	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>				124.32	

*Tabla 28: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo verde autorregulado*

### Cálculo de cantidad de acero de refuerzo

CANTIDADES DE ACERO TECHO VERDE AUTORREGULADO (T1): Para Columnas y Muros									
Piso	Altura	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	3.3	7	387	0.000387	0.00128	12	0.352	23	2766.96
1	2.55	6	284	0.000284	0.00072	10	0.167	23	1307.54
2	2.55	6	284	0.000284	0.00072	10	0.167	23	1307.54
3	2.55	5	199	0.000199	0.00051	16	0.187	23	1465.92
4	2.55	5	199	0.000199	0.00051	16	0.187	23	1465.92
PL 1	13.5	7	387	0.000387	0.00522	18	0.188	2	1476.44
PL2	13.5	8	510	0.00051	0.00689	14	0.096	1	756.66
TOTAL W (kg)									10547.00

Tabla 29: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde autorregulado

CANTIDADES DE ACERO TECHO VERDE AUTORREGULADO (T1): Para Vigas									
Piso	L(m)	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volum en (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
1	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
2	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
3	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
4	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
TOTAL W (kg)									27614.97

Tabla 30: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo verde autorregulado

## Formaletas para el edificio que presentan carga por techo verde

CANTIDADES DE FORMALETA EDIFICIO CON TECHO AUTORREGULADO T1: Para columnas y muros de corte						
PISO	Dimensiones		Altura piso	Área (formaleta) /Columna(m2)	# Columnas	Área total formaleta (m2)
#	B(m)	H(m)	(m)			
Semisótano	0.6	0.65	3.3	8.25	23	189.75
1	0.5	0.55	2.55	5.355	23	123.165
2	0.5	0.55	2.55	5.355	23	123.165
3	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
4	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
PL1	0.35	1.9	13.5	60.75	2	121.5
PL2	0.35	1.9	13.5	60.75	1	60.75
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)						852.93

Tabla 31: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo verde autorregulado

CANTIDADES FORMALETA EDIFICIO CON AUTORREGULADO T1: Para vigas				
PISO	Dimensiones		L-total/ piso	Área (formaleta) /Piso(m2)
#	B(m)	H(m)	(m)	
Semisótano	0.25	0.55	190	256.5
1	0.25	0.55	180.8	244.08
2	0.25	0.55	180.8	244.08
3	0.25	0.55	181.8	245.43
4	0.25	0.55	181.8	245.43
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)				1235.52

Tabla 32: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo verde autorregulado

### 3.5 TECHO VERDE AJARDINADO

En las *Tablas 33 a 38* se encuentran consignados los cálculos de cantidades de obra concernientes al techo verde ajardinado (T2).

#### Cálculo de volumen de concreto

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO VERDE AJARDINADO (T2): Para Columnas y Muros</b>						
PISO	SECCION (cm)	ÁREA SECCION (m <sup>2</sup> )	ATLTURA DE PISO	# COLUMNAS	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	Peso (Ton)
S-Sótano	65X65	0.4225	3.3	23	32.07	76.96
1	50X55	0.275	2.55	23	16.13	38.71
2	50X55	0.275	2.55	23	16.13	38.71
3	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
4	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
	PL1 190X35	0.665	13.5	-	17.96	43.09
	PL2 190X35	0.665	13.5	-	8.98	21.55
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>					120.58	289.40

*Tabla 33: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ajardinado*

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO VERDE AJARDINADO (T2)-Para Vigas</b>					
PISO	SECCION (cm)	ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )	H viga (m)	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	w (Ton)
S-Sótano	25x55	43.818	0.55	24.10	57.84
1	25x55	44.931	0.55	24.71	59.31
2	25x55	44.931	0.55	24.71	59.31
3	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
4	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>				124.20	

*Tabla 34: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo verde ajardinado*



### Cálculo de cantidad de acero de refuerzo

CANTIDADES DE ACERO TECHO VERDE AJARDINADO (T2)-Para Columnas y Muros									
Piso	Altura	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	3.3	6	284	0.000284	0.00094	16	0.345	23	2707.38
1	2.55	6	284	0.000284	0.00072	12	0.200	23	1569.05
2	2.55	6	284	0.000284	0.00072	12	0.200	23	1569.05
3	2.55	7	387	0.000387	0.00099	12	0.272	23	2138.11
4	2.55	7	387	0.000387	0.00099	12	0.272	23	2138.11
PL 1	13.5	7	387	0.000387	0.00522	18	0.188	2	1476.44
PL2	13.5	8	510	0.00051	0.00689	14	0.096	1	756.66
TOTAL W (kg)									12354.81

Tabla 35: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ajardinado

CANTIDADES DE ACERO TECHO VERDE AJARDINADO (T2)- Para Vigas									
Piso	L(m)	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
1	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
2	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
3	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
4	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
TOTAL W (kg)									27614.97

Tabla 36: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo verde ajardinado

### Formaletas para el edificio que presentan carga por techo verde

CANTIDADES DE FORMAleta EDIFICIO CON TECHO AJARDINADO T2: Para columnas y muros de corte						
PISO	Dimensiones		Altura piso	Área (formaleta) /Columna(m2)	# Columnas	Área total formaleta (m2)
#	B(m)	H(m)	(m)			
Semisótano	0.65	0.65	3.3	8.58	23	197.34
1	0.5	0.55	2.55	5.355	23	123.165
2	0.5	0.55	2.55	5.355	23	123.165
3	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
4	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
PL1	0.35	1.9	13.5	60.75	2	121.5
PL2	0.35	1.9	13.5	60.75	1	60.75
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)						860.52

*Tabla 37: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo verde ajardinado*

CANTIDADES FORMAleta EDIFICIO CON AJARDINADO T2: Para vigas				
PISO	Dimensiones		L-total/ piso	Área (formaleta) /Piso(m2)
#	B(m)	H(m)	(m)	
Semisótano	0.25	0.55	176.1	237.735
1	0.25	0.55	180.8	244.08
2	0.25	0.55	180.8	244.08
3	0.25	0.55	181.8	245.43
4	0.25	0.55	181.8	245.43
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)				1216.755

*Tabla 38: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo verde ajardinado*

### 3.6 TECHO VERDE ECOLOGICO ESPECIAL

En las *Tablas 39 a 44* se encuentran consignados los cálculos de cantidades de obra concernientes al techo verde ecológico especial (T3).

#### Cálculo de volumen de concreto

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO ECOLÓGICO ESPECIAL (T3): Para Columnas y Muros</b>						
PISO	SECCION (cm)	AREA SECCION (m <sup>2</sup> )	ATLTURA DE PISO	# COLUMNAS	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	Peso (Ton)
S-Sótano	60X70	0.42	3.3	23	31.88	76.51
1	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
2	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
3	45X45	0.2025	2.55	23	11.88	28.50
4	45X45	0.2025	2.55	23	11.88	28.50
	PL1 190X35	0.665	13.5	-	17.96	43.09
	PL2 190X35	0.665	13.5	-	8.98	21.55
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>					111.89	268.53

*Tabla 39: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ecológico especial*

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO ECOLÓGICO ESPECIAL (T3)-Para Vigas</b>					
PISO	SECCION (cm)	ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )	H viga (m)	Vol. Concreto (m <sup>3</sup> )	Peso (Ton)
S-Sótano	25x55	44.031	0.55	24.22	58.12
1	25x55	45.168	0.55	24.84	59.62
2	25x55	45.168	0.55	24.84	59.62
3	25x55	45.618	0.55	25.09	60.22
4	25x55	45.618	0.55	25.09	60.22
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>				124.08	

*Tabla 40: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo verde ecológico especial*

### Cálculo de cantidad de acero de refuerzo

CANTIDADES DE ACERO TECHO ECOLOGICO ESPECIAL (T3)- Para Columnas Y Muros									
Piso	Altura	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	3.3	9	645	0.000645	0.00213	10	0.490	23	3843.01
1	2.55	7	387	0.000387	0.00099	14	0.318	23	2494.46
2	2.55	7	387	0.000387	0.00099	14	0.318	23	2494.46
3	2.55	8	510	0.00051	0.00130	12	0.359	23	2817.66
4	2.55	8	510	0.00051	0.00130	12	0.359	23	2817.66
PL 1	13.5	7	387	0.000387	0.00522	18	0.188	2	1476.44
PL2	13.5	8	510	0.00051	0.00689	14	0.096	1	756.66
TOTAL W (kg)									16700.36

Tabla 41: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo verde ecológico especial

CANTIDADES DE ACERO TECHO ECOLOGICO ESPECIAL (T3)- Vigas									
Piso	L(m)	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	w (kg)
S-Sótano	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
1	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
2	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
3	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
4	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
TOTAL W (kg)									27614.97

Tabla 42: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo verde ecológico especial

### Formaletas para el edificio que presentan carga por techo verde

CANTIDADES DE FORMALETA EDIFICIO CON TECHO ECOLÓGICO ESPECIAL T3: Para columnas y muros de corte						
PISO	Dimensiones		Altura piso (m)	Área (formaleta) /Columna(m2)	# Columnas	Área total formaleta (m2)
	#	B(m)				
Semisótano	0.6	0.7	3.3	8.58	23	197.34
1	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
2	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
3	0.45	0.45	2.55	4.59	23	105.57
4	0.45	0.45	2.55	4.59	23	105.57
PL1	0.35	1.9	13.5	60.75	2	121.5
PL2	0.35	1.9	13.5	60.75	1	60.75
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)						825.33

Tabla 43: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo verde ecológico especial

CANTIDADES FORMALETA EDIFICIO CON ECOLOGICO ESPECIAL T3: Para vigas				
PISO	Dimensiones		L-total/ piso (m)	Área (formaleta) /Piso(m2)
	#	B(m)		
Semisótano	0.25	0.55	176	237.6
1	0.25	0.55	181.8	245.43
2	0.25	0.55	181.8	245.43
3	0.25	0.55	183.7	247.995
4	0.25	0.55	183.7	247.995
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)				1224.45

Tabla 44: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo verde ecológico especial

### 3.7 TECHO HUERTA

En las *Tablas 45 a 50* se encuentran consignados los cálculos de cantidades de obra concernientes al techo verde huerta (T4).

En la *Tabla 51* se muestra un resumen del incremento en masa sísmica de las estructuras con cada tipo de techo verde comparadas con la estructura convencional.

#### Cálculo de volumen de concreto

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO HUERTA (T4): Para Columnas y Muros</b>						
PISO	SECCION (cm)	AREA SECCION (m2)	ATLTURA DE PISO	# COLUMNAS	Vol. Concreto (m3)	Peso (Ton)
S-Sótano	65X65	0.4225	3.3	23	32.07	76.96
1	50X55	0.275	2.55	23	16.13	38.71
2	50X55	0.275	2.55	23	16.13	38.71
3	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
4	50X50	0.25	2.55	23	14.66	35.19
	PL1 190X35	0.665	13.5	-	17.96	43.09
	PL2 190X35	0.665	13.5	-	8.98	21.55
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>					<b>120.58</b>	<b>289.40</b>

*Tabla 45: Cálculo de volumen de concreto para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo huerta*

<b>CANTIDADES DE CONCRETO TECHO HUERTA (T4)-Para Vigas</b>					
PISO	SECCION (cm)	AREA TOTAL (m2)	H viga (m)	Vol. Concreto (m3)	Peso (Ton)
S-Sótano	25x55	43.818	0.55	24.10	57.84
1	25x55	44.931	0.55	24.71	59.31
2	25x55	44.931	0.55	24.71	59.31
3	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
4	25x55	46.068	0.55	25.34	60.81
<b>VOLUMEN TOTAL EDIFICIO</b>				<b>124.20</b>	

*Tabla 46: Cálculo de volumen de concreto para vigas para edificio con carga de techo huerta*

### Cálculo de cantidad de acero de refuerzo

CANTIDADES DE ACERO HUERTA (T4)-Para Columnas y Muros									
Piso	Altura	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	Peso (kg)
S-Sótano	3.3	6	284	0.000284	0.00094	16	0.345	23	2707.38
1	2.55	5	199	0.000199	0.00051	14	0.163	23	1282.68
2	2.55	5	199	0.000199	0.00051	14	0.163	23	1282.68
3	2.55	5	199	0.000199	0.00051	18	0.210	23	1649.16
4	2.55	5	199	0.000199	0.00051	18	0.210	23	1649.16
PL 1	13.5	7	387	0.000387	0.00522	18	0.188	2	1476.44
PL2	13.5	8	510	0.00051	0.00689	14	0.096	1	756.66
TOTAL W (kg)									10804.17

Tabla 47: Cálculo de cantidad de acero de refuerzo para columnas y muros de ascensor para edificio con carga de techo huerta

CANTIDADES DE ACERO HUERTA (T4)- Para Vigas									
Piso	L(m)	Varilla (No)	Área Varilla (mm <sup>2</sup> )	Área Varilla (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	# Varillas	Volumen total	# Columnas	Peso (kg)
S-Sótano	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
1	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
2	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
3	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
4	181.8	7	387	0.000387	0.0704	10	0.704	23	5522.99
TOTAL W (kg)									27614.97

Tabla 48: Cálculo cantidad de acero de refuerzo para vigas para edificio con carga de techo huerta

### Formaletas para el edificio que presentan carga por techo verde

CANTIDADES DE FORMALETA EDIFICIO CON TECHO HUERTA T4: Para columnas y muros de corte						
PISO	Dimensiones		Altura piso	Área (formaleta) /Columna(m2)	# Columnas	Área total formaleta (m2)
#	B(m)	H(m)	(m)			
Semisótano	0.65	0.65	3.3	8.58	23	197.34
1	0.5	0.55	2.55	5.355	23	123.165
2	0.5	0.55	2.55	5.355	23	123.165
3	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
4	0.5	0.5	2.55	5.1	23	117.3
PL1	0.35	1.9	13.5	60.75	2	121.5
PL2	0.35	1.9	13.5	60.75	1	60.75
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)						860.52

Tabla 49: Formaleta total para columnas y muros de ascensor en el edificio que presenta carga por techo huerta

CANTIDADES FORMALETA EDIFICIO CON HUERTA T4: Para vigas				
PISO	Dimensiones		L-total/ piso	Área (formaleta) /Piso(m2)
#	B(m)	H(m)	(m)	
Semisótano	0.25	0.55	176.1	237.735
1	0.25	0.55	180.8	244.08
2	0.25	0.55	180.8	244.08
3	0.25	0.55	181.8	245.43
4	0.25	0.55	181.8	245.43
FORMALETA TOTAL PARA EDIFICIO (m2)				1216.755

Tabla 50: Formaleta total para vigas en el edificio que presenta carga por techo huerta

	CONVENCIONAL	T1	T2	T3	T4
ACERO (Ton)	10.01	10.55	12.35	16.70	10.80
CONCRETO (Ton)	186.47	218.84	224.76	203.90	224.76
SUSTRATO (Ton)	-	62.81	209.35	188.42	146.55
TOTAL (Ton)	196.48	229.39	237.12	220.60	235.56
% de incremento con respecto al edificio convencional		16.75	20.68	12.27	19.89

Tabla 51: Porcentaje de incremento de PESO SÍSMICO EN LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS.



## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Desplazamientos y derivas

Para la parte estructural del edificio se analizaron los desplazamientos de las columnas y elementos estructurales más críticos en el edificio sin techo verde, y posteriormente con las diferentes cargas de techos verdes con el fin de encontrar los desplazamientos por cada piso y realizar el cálculo de la deriva para observar el cambio con respecto a cada punto de la columna analizada del edificio con y sin techo verde.

Sin Techo verde		T1 (autorregulado)		T2 (ajardinado)		T3 (eco. Especial)		T4 (Huerta)	
DERIVA %	PISO	DERIVA %	PISO	DERIVA %	PISO	DERIVA %	PISO	DERIVA %	PISO
0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1
0.598	2	0.687	2	0.687	2	0.687	2	0.687	2
0.957	3	1.106	3	1.104	3	1.104	3	1.105	3
0.896	4	1.039	4	1.036	4	1.036	4	1.037	4
0.857	5	0.985	5	0.981	5	0.982	5	0.983	5
0.544	6	0.686	6	0.704	6	0.699	6	0.695	6

*Tabla 52: Resumen de derivas por piso de los edificios estudiados*

En la *Tabla 52* se presentan los resultados de las derivas calculadas por piso del edificio cargado con las alternativas de techos verdes, en el cual se evidencia que al adicionar una carga en la cubierta, algunos de los valores sobrepasan el límite permitido por la norma esto hace que sea necesario un nuevo diseño para cada alternativa de techo verde con el fin de cumplir los requerimientos mínimos, los resultados de estos diseños se presentan más adelante.

<b>Sin Techo verde</b>	<b>T1 (autorregulado)</b>	<b>T2 (ajardinado)</b>	<b>T3 (eco. Especial)</b>	<b>T4 (Huerta)</b>
Desplazamiento en X (m)	Desplazamiento en X (m)	Desplazamiento en X (m)	Desplazamiento en X (m)	Desplazamiento en X (m)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00467	0.00537	0.00537	0.00537	0.00537
0.01147	0.01315	0.01317	0.01317	0.01316
0.01886	0.02173	0.02180	0.02178	0.02177
0.02636	0.03090	0.03118	0.03111	0.03104
0.03305	0.03941	0.04009	0.03992	0.03975

*Tabla 53: Resumen de desplazamientos en X por piso de los edificios estudiados*

<b>Sin Techo verde</b>	<b>T1 (autorregulado)</b>	<b>T2 (ajardinado)</b>	<b>T3 (eco. Especial)</b>	<b>T4 (Huerta)</b>
Desplazamiento en Y (m)	Desplazamiento en Y (m)	Desplazamiento en Y (m)	Desplazamiento en Y (m)	Desplazamiento en Y (m)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.01918	0.02204	0.02202	0.02202	0.02203
0.04262	0.04916	0.04906	0.04908	0.04911
0.06423	0.07423	0.07401	0.07407	0.07412
0.08476	0.09762	0.09719	0.09730	0.09741
0.09691	0.11291	0.11278	0.11281	0.11284

*Tabla 54: Resumen de desplazamientos en Y por piso de los edificios estudiados*

Como se puede observar en las *Tablas 53 y 54* los desplazamientos por piso en el sentido X y Y no tienen un gran incremento en cuanto a los puntos críticos del edificio, sin embargo al calcular la deriva por piso de la forma establecida por la norma en la que se obtiene un valor porcentual en función de la altura del piso, realizando esto, en la *Tabla 51* se evidencia un cambio en los pisos 3 y 4 aumentando así a más del 1%, por lo que posteriormente para que las derivas cumplieran se hizo necesario el cambio de algunas secciones de las columnas y también la cantidad de acero de los elementos estructurales. En las *Figuras 19 y 20*, se muestran las gráficas obtenidas del cálculo de las derivas del edificio sin techo verde comparadas con las derivas del

mismo edificio al implementar un techo huerta y un techo ajardinado que acorresponden a los valores frontera de los 4 techos estudiados.

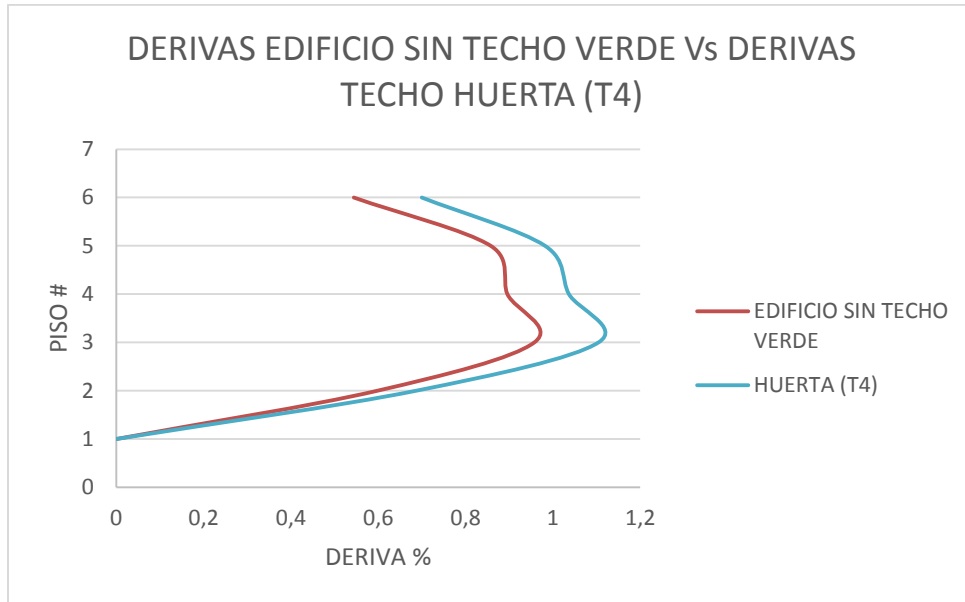


Figura 19: Grafica de derivas por piso del edificio sin carga por techo verde vs derivas de carga por techo huerta (T4) de peso mínimo, que arroja también el cambio mínimo en las derivas de todos los modelos estudiados.

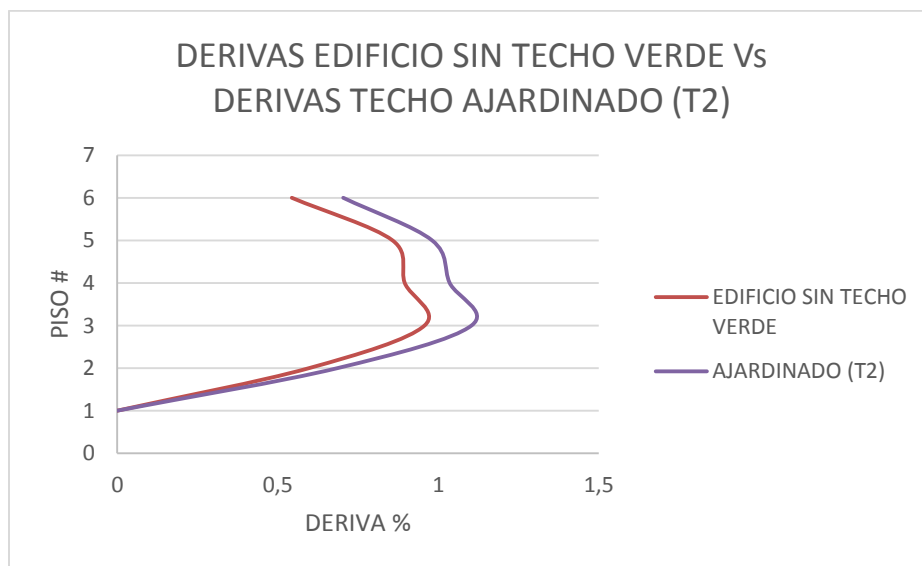
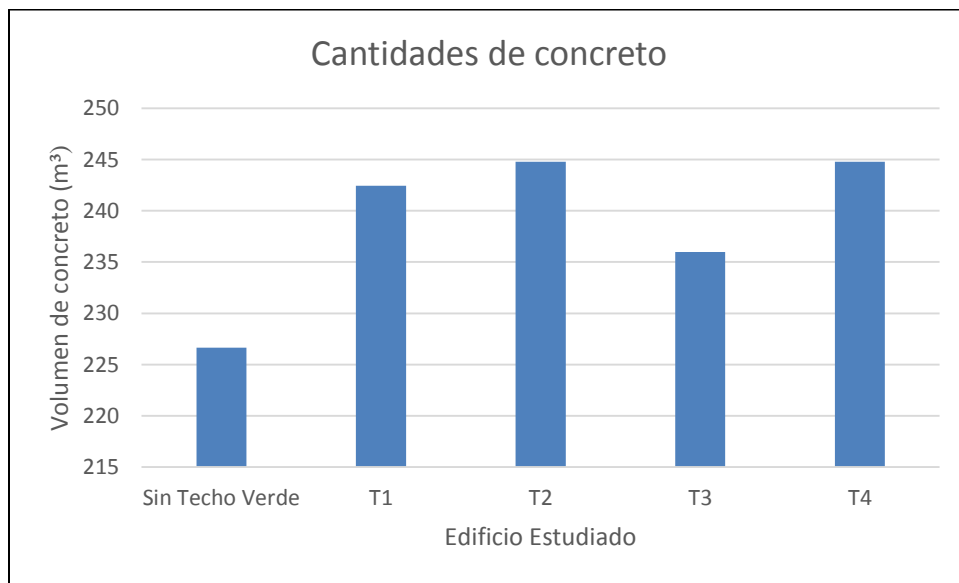


Figura 20: Grafica de derivas por piso del edificio sin carga por techo verde vs derivas de carga por techo verde ajardinado (T2) de peso máximo, que arroja también el cambio máximo en las derivas de todos los modelos estudiados.

## 4.2 Cantidades de concreto

Uno de los objetivos hace referencia a calcular los costos directos de la estructura principal de los edificios estudiados. Para ello se realizó el cálculo de las cantidades totales de concreto, acero y formaleta por cada edificio estudiado con y sin techo verde, para luego hacer una comparación y saber cuál es el cambio de aumento en materiales de cada uno de los edificios al implementar cada uno de los cuatro (4) diferentes tipos de techos verdes, a continuación en la *Figura 21* se presenta en cambio de cantidades de concreto de los edificios:

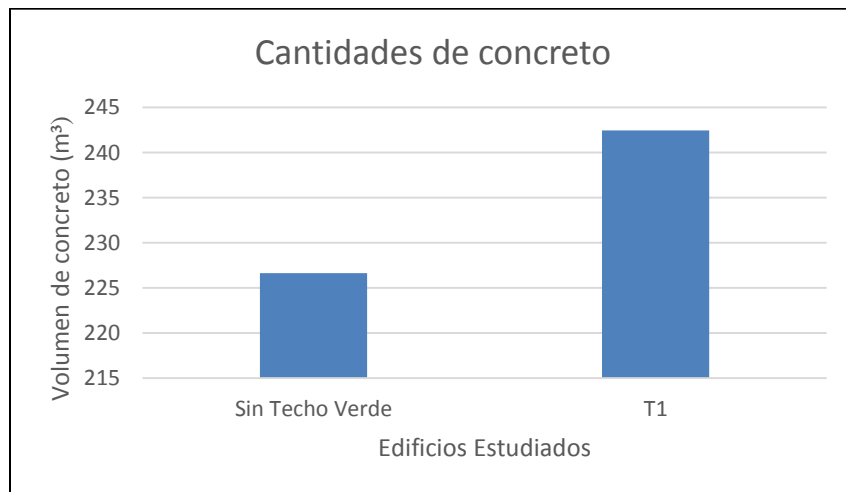


*Figura 21: Volúmenes de concreto para cada uno de los modelos estudiados*

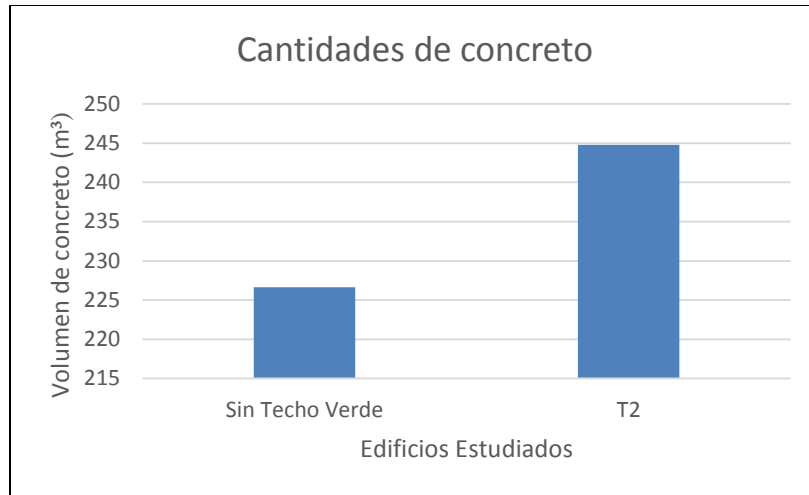
(T1: Techo autorregulado, T2: Techo ajardinado, T3: Ecológico especial, T4: Techo huerta)

Cada uno de los edificios, al implementarse una carga distinta sobre su cubierta generó cambios en las derivas y en los desplazamientos de la estructura. Esto hizo que se tuviera que modificar las dimensiones de las columnas, por consiguiente se reflejó un cambio en el acero de refuerzo y

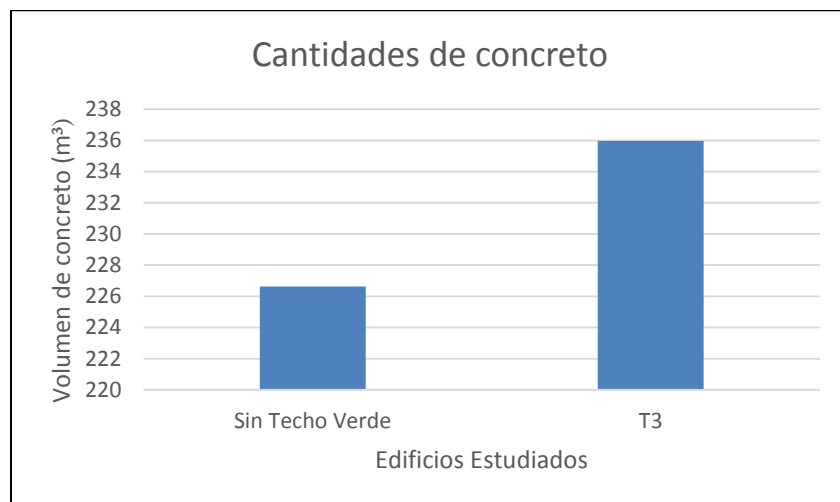
en las formaletas a utilizar. El edificio que presentó un menor cambio en volumen fue el edificio cargado con techo verde ecológico especial con una diferencia de 9.33 metros cúbicos de concreto (*Figura 24*), mientras que los edificios cargados con techo verde ajardinado (*Figura 23*) y techo huerta (*Figura 25*) fueron los que mayor cambio en la cantidad de concreto con una diferencia de 18.14 metros cúbicos de concreto cada uno, puede que estas dos estructuras con diferente carga tuvieran la misma cantidad de volumen de concreto pero se verá una diferencia más adelante con la cantidad de acero. Para el techo verde autorregulado la diferencia fue de 15.79 metros cúbicos de concreto (*Figura 22*).



*Figura 22: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde autorregulado (T1: Techo autorregulado)*



*Figura 23: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde ajardinado (T2: Techo ajardinado)*



*Figura 24: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde ecológico especial (T3: Ecológico especial)*

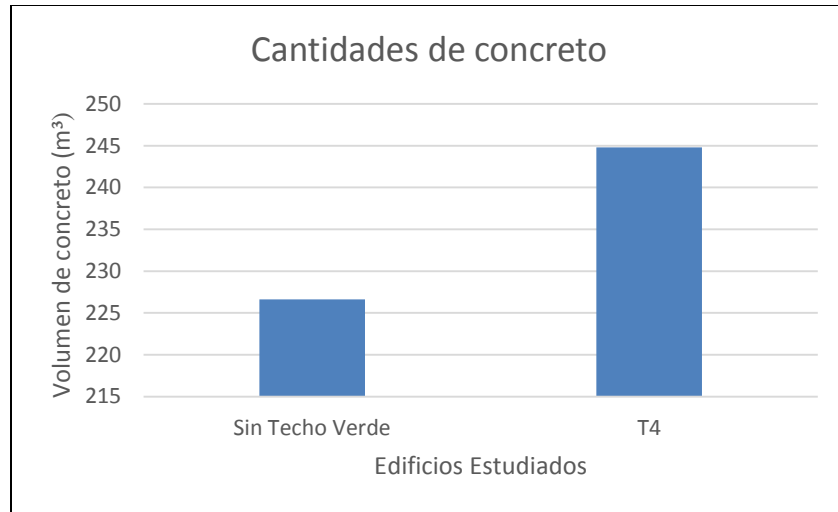
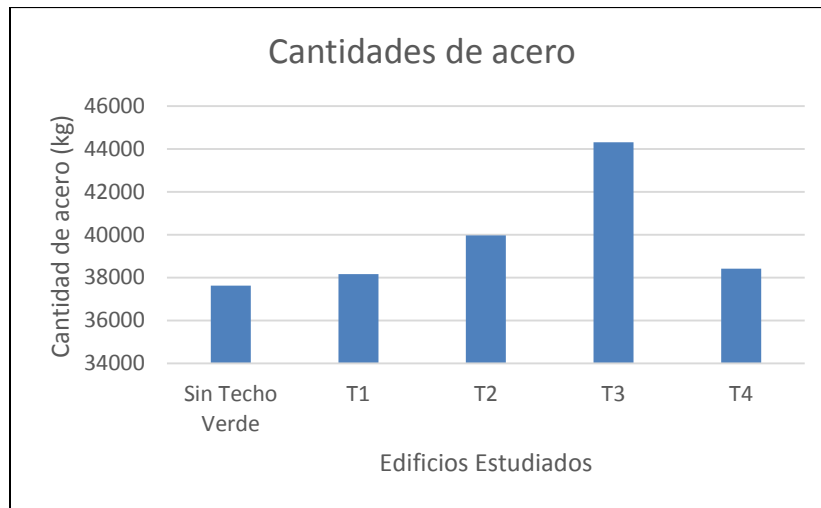


Figura 25: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo huerta (T4: Techo huerta)

#### 4.3 Cantidades de acero

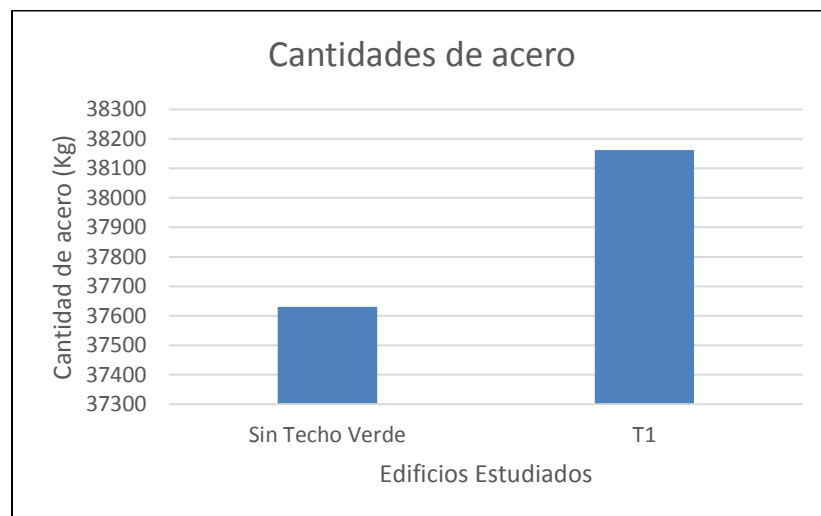
Las cantidades de acero se ven modificadas en el momento en el que el edificio recibe una carga extra por techo verde. Los modelos estudiados previamente modelados SAP2000 fueron diseñados por la cantidad de acero que necesitaban. La cantidad de acero en estos casos está muy ligada a la cantidad de concreto que lleva la estructura principal, es por eso que el modelo cargado con techo verde ecológico especial tiene mayor cantidad de acero con una diferencia de 6685.69 Kg de acero con respecto al modelo sin carga por techo verde (Figura 29), el modelo cargado con techo verde autorregulado fue el que presento menor diferencia de acero con 532.33 Kg más que el modelo sin carga por techo verde (Figura 27). El modelo cargado con techo huerta tuvo una diferencia de 789.51 Kg (Figura 30) y el modelo cargado con techo ajardinado con una diferencia de 2340.14 kg por encima de los modelos sin carga por techo verde (Figura 28).

En la *Figura 26* se puede apreciar la diferencia en cantidades de acero de los edificios cargados con los diferentes tipos de techos verdes frente al edificio convencional sin techo verde.



*Figura 26: Cantidad de acero para cada uno de los modelos estudiados*

(T1: Techo autorregulado, T2: Techo ajardinado, T3: Ecológico especial, T4: Techo huerta)



*Figura 27: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo verde autorregulado (T1: Techo autorregulado)*



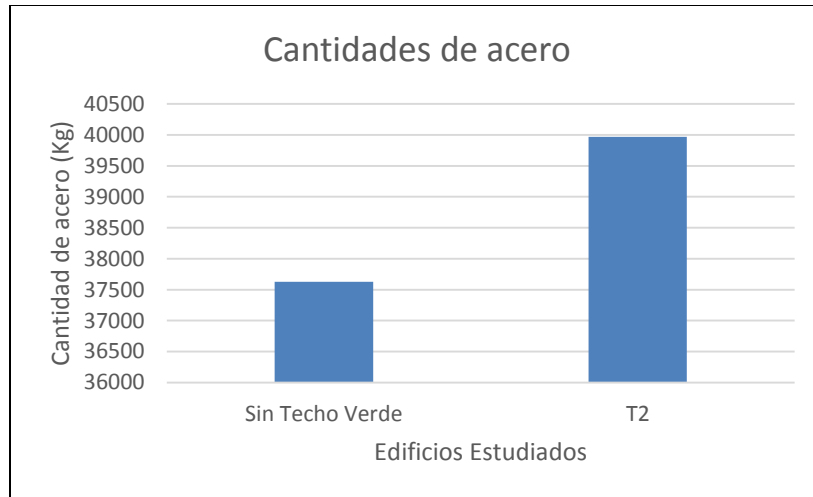


Figura 28: Diferencia de cantidad de acero entre estructura sin techo verde y techo verde ajardinado (T2: Techo ajardinado)

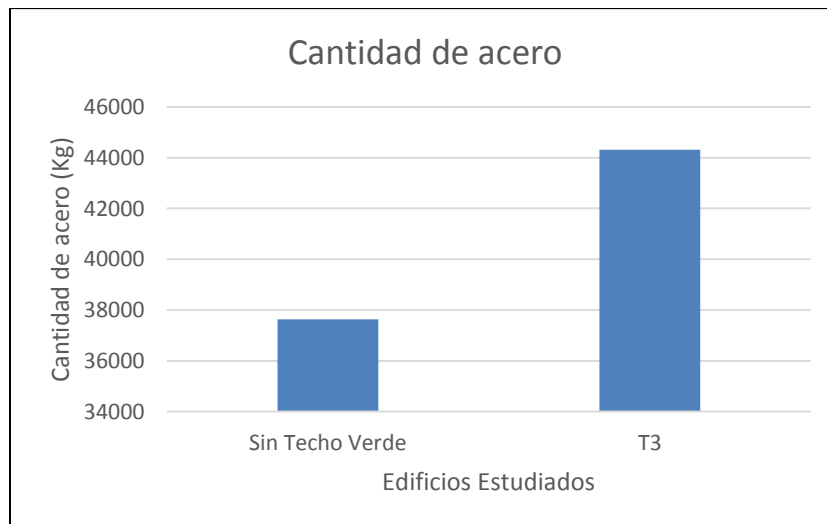
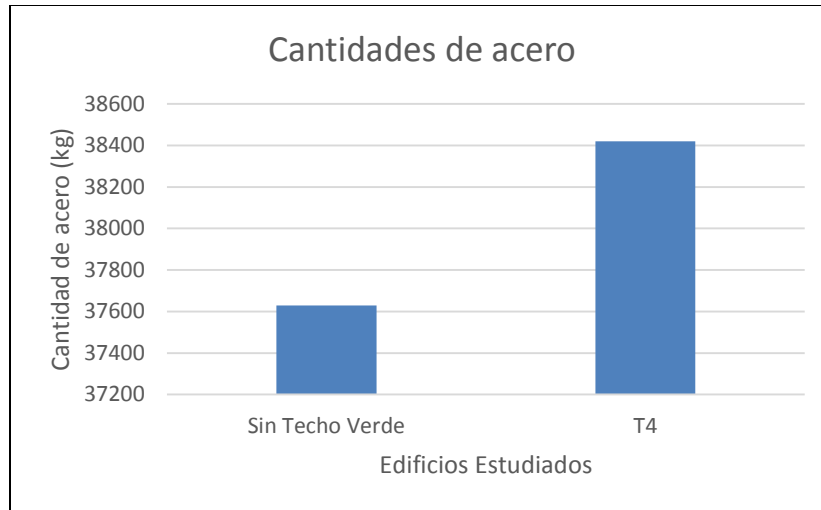


Figura 29: Diferencia de cantidad de acero entre estructura sin techo verde y techo verde ecológico especial (T3: Ecológico especial)



*Figura 30: Diferencia de volumen de concreto entre estructura sin techo verde y techo huerta (T4: Techo huerta)*

#### 4.4 Cantidades de formaleta

El área aferente de cada columna, muro de corte y cada viga es lo que va a determinar los metros cuadrados de formaleta que se va a necesitar. Por cada carga de techo verde adicional a los modelos, las columnas, muros de ascensor y vigas se vieron afectadas directamente, esto generó un cambio en el área de formaletas. Con este aumento surgen costos adicionales en la estructura, así como costos en la mano de obra en cada uno de los 3 materiales en estudio de este proyecto de grado, como lo son el concreto, el acero y la formaleta. En la *Figura 31* se evidencia las diferencias en metros cuadrados de formaleta para los cuatro tipos de techos verdes con respecto al edificio sin techo verde. Como se puede observar el modelo con menor área de formaleta con respecto al modelo sin carga por techo verde es de 6.91 metros cuadrados adicionales, este modelo es el cargado con techo verde ecológico especial (*Figura 34*), los modelos cargados con techo verde ajardinado (*Figura 33*) y techo huerta (*Figura 35*) tuvieron un incremento de 43.33 metros cuadrados más que el modelo sin carga por techo verde y el modelo de techo verde

autorregulado (Figura 32) presento una diferencia de 57.98 metros cuadrados por encima del modelo sin carga por techo verde. A continuación se presentan los resultados obtenidos de los diferentes cálculos:

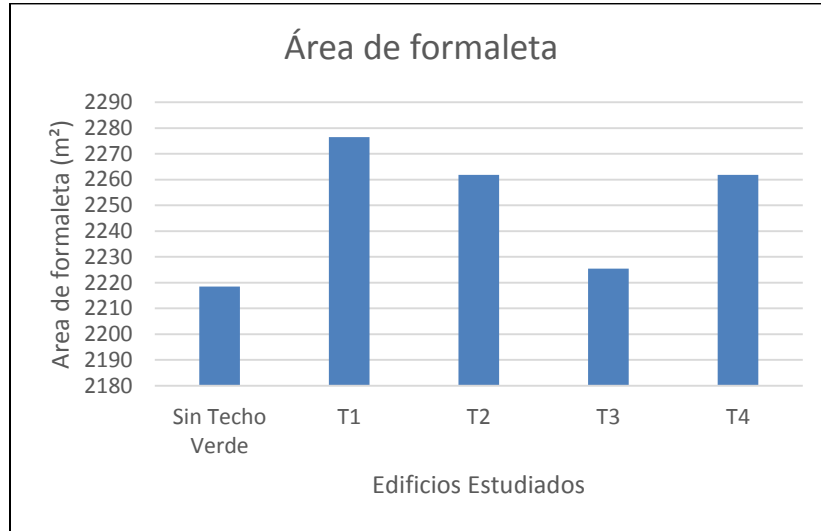


Figura 31: Área de formaleta para cada uno de los modelos estudiados (T1: Techo autorregulado, T2: Techo ajardinado, T3: Ecológico especial, T4: Techo huerta)

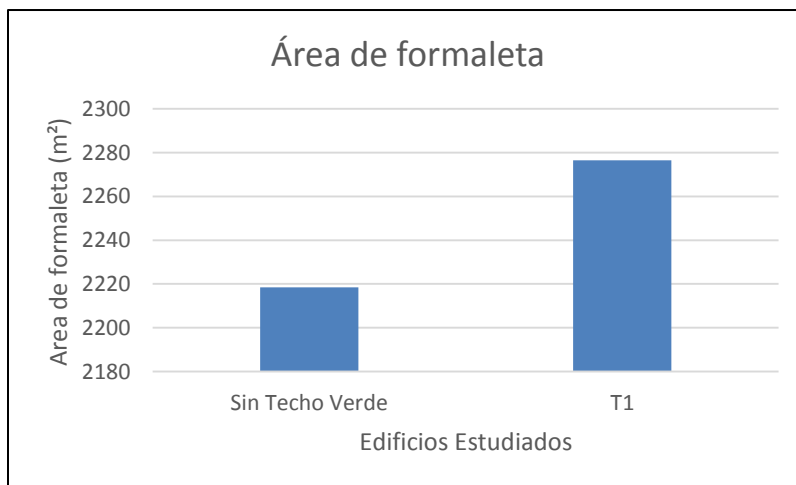


Figura 32: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo verde autorregulado (T1: Techo autorregulado)

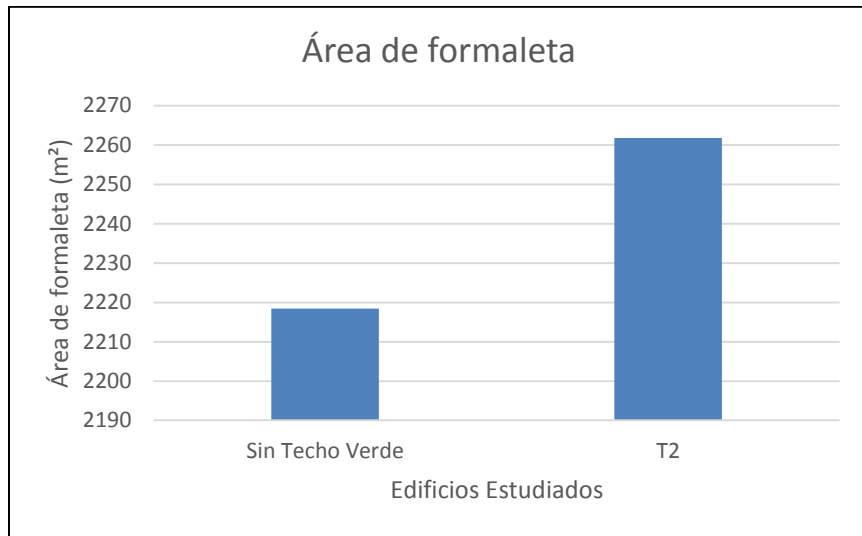


Figura 33: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo verde ajardinado (T2: Techo ajardinado)

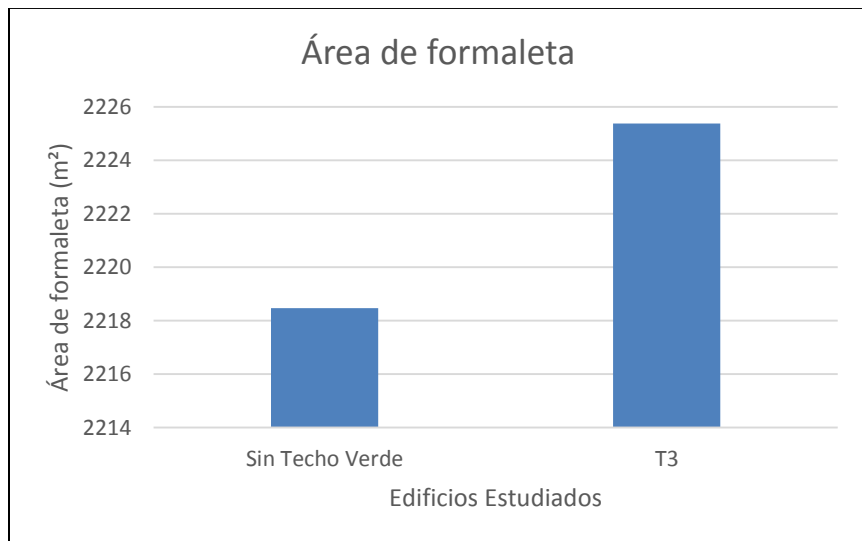
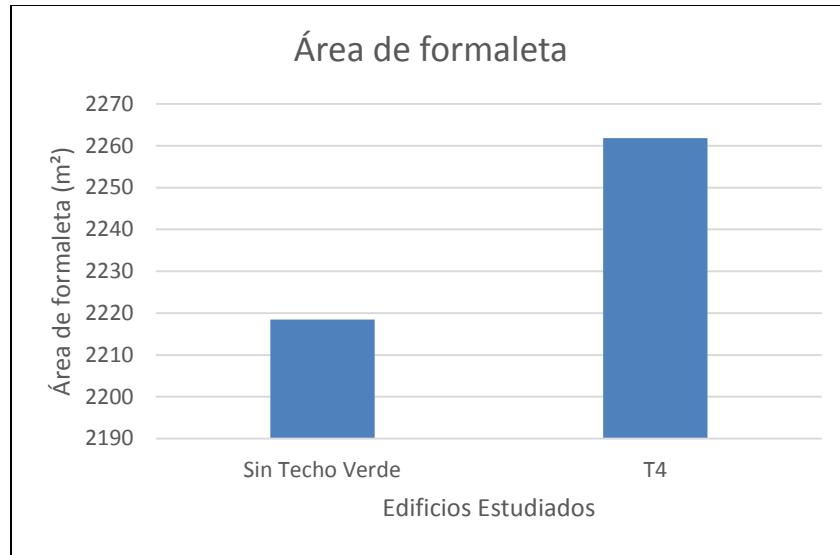


Figura 34: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo verde ecológico especial (T3: Ecológico especial)



*Figura 35: Diferencia de área de formaleta entre estructura sin techo verde y techo huerta (T4: Techo huerta)*

Como se pudo observar en las figuras anteriores del área de formaleta y cantidad de concreto para las columnas, el incremento es importante cuando hay una carga de techo verde debido a la sección de la nueva columna, además se observó que en cuanto aumenta la sección o disminuye la sección de la columna el área de formaleta para las vigas disminuye, y por esto el área de formaleta para los edificios con columnas menores, el área de formaleta para las vigas va a ser mayor.

Para costear las cantidades de obra calculadas anteriormente, se hizo el análisis de precios unitarios de los materiales usados como concreto, acero y formaleta. Los precios y rendimientos son tomados de (CONSTRUDATA, 2014) y de (BIMSA, 1991), a continuación en las *Tablas 55 a 59* se presentan los costos de los diferentes materiales que conforman la estructura principal de los edificios estudiados.

COSTOS DIRECTOS ESTRUCTURA PRINCIPAL-SIN TECHO VERDE					
ITEM	CONCEPTO	UN	CANT	VLR TOTAL	%
1	Concreto para columnas fc=210 kg/cm2	M3	102.062	\$ 45,387,481.71	16.18%
2	Concreto para vigas fc=210 kg/cm2	M3	124.577	\$ 55,715,543.41	19.86%
3	Acero de refuerzo G-60 para columnas	TON	10.01466	\$ 27,871,530.85	9.93%
4	Acero de refuerzo G-60 para vigas	TON	27.61496	\$ 76,854,452.33	27.40%
5	Formaleta en madera común para columnas	M2	794.28	\$ 29,019,385.17	10.34%
6	Formaleta en madera común para vigas	M2	1250.64	\$ 45,692,707.69	16.29%
VALOR TOTAL				\$ 280,541,101.17	100.00%

*Tabla 55: Costos directos de la estructura sin carga por techo verde*

COSTOS DIRECTOS ESTRUCTURA PRINCIPAL-AUTORREGULADO (T1)					
ITEM	CONCEPTO	UN	CANT	VLR TOTAL	%
1	Concreto para columnas fc=210 kg/cm2	M3	118.12	\$ 52,526,775.78	18.72%
2	Concreto para vigas fc=210 kg/cm2	M3	124.32	\$ 55,598,814.34	19.82%
3	Acero de refuerzo G-60 para columnas	TON	10.55	\$ 29,353,071.99	10.46%
4	Acero de refuerzo G-60 para vigas	TON	27.61	\$ 76,854,452.33	27.40%
5	Formaleta en madera común para columnas	M2	852.93	\$ 31,162,189.90	11.11%
6	Formaleta en madera común para vigas	M2	1235.52	\$ 45,140,291.54	16.09%
VALOR TOTAL				\$ 290,635,595.88	100.00%

*Tabla 56: Costos directos de la estructura con carga por techo verde autorregulado*

Como se puede observar en la *Tabla 56*, el porcentaje de incidencia de algunos materiales sobre el costo directo total de la estructura es mayor, en relación al porcentaje de incidencia de los materiales en el edificio convencional. Por ejemplo, como se muestra en la *Tabla 55*, el porcentaje de incidencia en cuanto al concreto de columnas en el edificio convencional es de 16,18%, y en el edificio autorregulado el porcentaje de incidencia en el concreto de columnas se

aumenta a 18,72%. De igual manera, el porcentaje de incidencia en el acero también se incrementó, variando de 9,93% hasta 10,46% en relación con el techo verde convencional y el techo verde autorregulo.

Por otro lado, para el techo verde ajardinado, en la *Tabla 57* se muestra que el porcentaje de incidencia en el concreto de columnas se aumenta a 19,11%, y en el acero de las mismas se aumenta a 12,26% con relación al edificio sin techo verde.

COSTOS DIRECTOS ESTRUCTURA PRINCIPAL-AJARDINADO (T2)					
ITEM	CONCEPTO	UN	CANT	VLR TOTAL	%
1	Concreto para columnas fc=210 kg/cm2	M3	120.58	\$ 53,623,863.02	19.11%
2	Concreto para vigas fc=210 kg/cm2	M3	124.20	\$ 55,546,040.28	19.80%
3	Acero de refuerzo G-60 para columnas	TON	12.35	\$ 34,384,339.37	12.26%
4	Acero de refuerzo G-60 para vigas	TON	27.61	\$ 76,854,452.33	27.40%
5	Formaleta en madera común para columnas	M2	860.52	\$ 31,439,494.04	11.21%
6	Formaleta en madera común para vigas	M2	1216.76	\$ 44,454,703.63	15.85%
VALOR TOTAL				\$ 296,302,892.67	100.00%

*Tabla 57: Costos directos de la estructura con carga por techo verde ajardinado*

COSTOS DIRECTOS ESTRUCTURA PRINCIPAL-ECOLÓGICO ESPECIAL (T3)					
ITEM	CONCEPTO	UN	CANT	VLR TOTAL	%
1	Concreto para columnas fc=210 kg/cm2	M3	111.89	\$ 49,757,597.75	17.74%
2	Concreto para vigas fc=210 kg/cm2	M3	124.08	\$ 55,494,160.70	19.78%
3	Acero de refuerzo G-60 para columnas	TON	16.70	\$ 46,478,322.68	16.57%
4	Acero de refuerzo G-60 para vigas	TON	27.61	\$ 76,854,452.33	27.40%
5	Formaleta en madera común para columnas	M2	825.33	\$ 30,153,811.20	10.75%
6	Formaleta en madera común para vigas	M2	1224.45	\$ 44,735,844.00	15.95%
VALOR TOTAL				\$ 303,474,188.65	100.00%

*Tabla 58: Costos directos de la estructura con carga por techo verde ecológico especial*

El techo verde ecológico especial presenta un valor de incidencia en el concreto de columnas de 17,74 % y para el acero de refuerzo de éstas encontramos un valor de 16,57% como se puede observar en la

*Tabla 58.*

COSTOS DIRECTOS ESTRUCTURA PRINCIPAL-HUERTA (T4)					
ITEM	CONCEPTO	UN	CANT	VLR TOTAL	%
1	Concreto para columnas fc=210 kg/cm2	M3	120.58	\$ 53,623,863.02	19.11%
2	Concreto para vigas fc=210 kg/cm2	M3	124.20	\$ 55,546,040.28	19.80%
3	Acero de refuerzo G-60 para columnas	TON	10.80	\$ 30,068,321.77	10.72%
4	Acero de refuerzo G-60 para vigas	TON	27.61	\$ 76,854,452.33	27.40%
5	Formaleta en madera común para columnas	M2	860.52	\$ 31,439,494.04	11.21%
6	Formaleta en madera común para vigas	M2	1216.76	\$ 44,454,703.63	15.85%
VALOR TOTAL				\$ 291,986,875.08	100.00%

*Tabla 59: Costos directos de la estructura con carga por techo huerta*

En la *Tabla 59* correspondiente a los valores del techo huerta también se presentan incrementos en los porcentajes de incidencia con respecto al edificio sin techo verde. Para este caso, el concreto de columnas presenta un porcentaje de incidencia del 19,11%, y el acero presenta un valor de 10,72%.



RESUMEN DE COSTOS DIRECTOS ED. CONVENCIONAL VS ED. CON ALTERNATIVAS DE TECHOS VERDES					
CONCEPTO	ED. CONVENCIONAL	AUTORREGULADO (T1)	AJARDINADO (T2)	EC. ESPECIAL (T3)	HUERTA (T4)
Concreto para columnas fc=210 kg/cm3	\$ 45,387,481.71	\$ 52,526,775.78	\$53,623,863.02	\$ 49,757,597.75	\$53,623,863.02
Concreto para vigas fc=210 kg/cm3	\$ 55,715,543.41	\$ 55,598,814.34	\$55,546,040.28	\$55,494,160.70	\$55,546,040.28
Acero de refuerzo FG G-60 para columnas	\$ 27,871,530.85	\$ 29,353,071.99	\$34,384,339.37	\$46,478,322.68	\$30,068,321.77
Acero de refuerzo FG G-60 para vigas	\$ 76,854,452.33	\$ 76,854,452.33	\$76,854,452.33	\$76,854,452.33	\$76,854,452.33
Formaleta en madera común para columnas	\$ 29,019,385.17	\$ 31,162,189.90	\$31,439,494.04	\$ 30,153,811.20	\$31,439,494.04
Formaleta en madera común para vigas	\$ 45,692,707.69	\$ 45,140,291.54	\$44,454,703.63	\$44,735,844.00	\$44,454,703.63
<b>COSTO TOTAL DIRECTO ESTRUCTURA PRINCIPAL</b>	<b>\$280,541,101.17</b>	<b>\$ 290,635,595.88</b>	<b>\$296,302,892.6</b>	<b>\$303,474,188.65</b>	<b>\$291,986,875.1</b>

*Tabla 60: Tabla de relación de costos directos para modelos sin y con carga por techos verdes*

**NOTA: El análisis de precios unitarios de los materiales de la estructura principal se encuentran en el ANEXO 3.**

En la *Tabla 60* se presenta la relación de costos de las alternativas de techo verde con el edificio con cubierta convencional. De acuerdo a esto, los costos en relación al acero y concreto de las vigas no presentan cambios debido a que las cantidades tampoco cambiaron, gracias a que en el análisis estructural el incremento en cuanto a volumen se realizó sobre las columnas. En cuanto al precio del concreto, la relación que mayor se presenta es la de los techos ajardinados y huerta, con 1.18, es decir el valor se incrementa un 18 % con relación al edificio sin techo verde.

Para el acero de columnas, el costo del techo ecológico especial es el más significativo con una relación de 1.67 con respecto al edificio con cubierta convencional, y en cuanto a la formaleta el costo varía entre 5% y 11% de incremento con relación al edificio sin cubierta verde. Para las vigas las relaciones obtenidas son bastante similares debido a que las dimensiones de las vigas para los cuatro edificios son las mismas (*Tabla 61*).

RELACIÓN DE PORCENTAJES COSTOS DIRECTOS ENTRE EDIFICACION CONVENCIONAL SIN TECHO VERDE CON EDIFICIOS CON TECHOS VERDES				
CONCEPTO	AUTORREGULADO (T1)	AJARDINADO (T2)	EC. ESPECIAL (T3)	HUERTA (T4)
Concreto $f_c=210$ kg/cm <sup>3</sup>	1.16	1.18	1.10	1.18
Acero de refuerzo G-60	1.05	1.23	1.67	1.08
Formaleta en madera común	1.07	1.08	1.04	1.08

*Tabla 61: Relación porcentual de costos directos edificación convencional vs alternativas con techos verdes*

## CONCLUSIONES

- Al realizar el análisis de resultados obtenidos por el estudio de las edificaciones con implementación de los cuatros sistemas de techos verdes, referentes a la clasificación primaria (Autorregulado T1, ajardinado T2, ecológico especial T3, huerta T4 de la Guía de Techos verdes de Bogotá), se encontró que en efecto se presenta un incremento en la masa de la edificación, debido al aporte de las cargas impuestas por el sustrato, que al mismo tiempo genera aumento en la cantidad de concreto, acero y formaleta de los elementos estructurales principales (columnas, vigas y muros placa del ascensor) como se puede apreciar en la *Tabla 51*.
- El sistema de techo verde implementado que más aportó en peso a la estructura original fue el de techo Ajardinado, seguido del autorregulado, luego el de huerta y finalmente el ecológico especial. Los porcentajes de incremento en masa con respecto al edificio original, varían entre un rango aproximado del diez al veinte por ciento, siendo el máximo valor de 20.68 % correspondiente al sistema de techo ajardinado (ver *Tabla 51*).
- Como consecuencia de la implementación de techos verdes en la edificación analizada, se realizaron cambios en el diseño estructural con el fin de garantizar el cumplimiento de los desplazamientos permitidos por la Norma Sismo Resistente (NSR-10) vigente en Bogotá, debido a que al incrementar el peso sobre la cubierta de la estructura, la sección original de las columnas de la edificación dejaban de ser suficientes para cumplir con el requisito

de cumplimiento del desplazamiento máximo, lo cual se evidenciaba en el desplazamiento relativo (deriva), limitado al 1%, llegando a incrementarse hasta en 0.2% por el efecto de las cargas de los techos verdes. Para cumplir con la Norma se aumentó la sección de las columnas, lo cual generó un cambio en la cantidad de concreto y acero de refuerzo.

- Al llevar a cabo el análisis de costos directos para la estructura con implementación de techos verdes, se demostró que el costo tiene un aumento generado en mayor medida por el uso de más materiales para la construcción de las columnas. Así como en comparación con los costos de la estructura principal sin techo verde, se obtuvo un valor máximo de 18% y un valor mayor mínimo de 10% en cuanto a los costos del concreto, para los tipos de techo verde analizados. Para los costos del acero se presentó un valor mínimo de 5% y un valor máximo de 67 %, y para el costo total de la formaleta se presentaron valores frontera de 4% y 8% en relación a los tipos de techos analizados.
- La implementación de sistemas de techos verdes en un edificio es altamente rentable, debido a que el valor comercial por metro cuadrado de un edificio se incrementará gracias a los aportes estéticos y beneficios ambientales que estos sistemas pueden generar sin una inversión excesiva en la estructura de un edificio de concreto reforzado.

## RECOMENDACIONES

- La Guía de Techos Verdes de Bogotá 2011 es un documento de gran validez, no solo para efectos de este trabajo de grado sino también para los constructores que decidan

implementar un techo verde, gracias a que en esta guía muestran lineamientos de diseño en las diferentes áreas. Sin embargo, se recomienda incluir la relación de costos directos de la estructura principal para dar un punto de partida a los diferentes constructores que deseen implementar un techo verde en edificios típicos de Bogotá y Colombia.

- El presente trabajo de grado es el punto de partida para la realización de otros trabajos de grado con relación a la implementación de techos verdes en Bogotá. Se recomienda continuar el trabajo realizando el análisis sobre el costo-beneficio de implementar diferentes tipos de techos verdes en edificios típicos de Bogotá y Colombia tanto residenciales como oficinas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, C., & Reitherman, R. (1987). *Configuración y diseño sísmico de edificios*. México: Limusa S.A.
- Bazan, E., & Meli, R. (2010). *Diseño sísmico de edificaciones*. México: Limusa S.A.
- BIMSA. (1991, April). Análisis de costos de materiales para construcción. México. BIMSA Reports, S.A.
- Cadavid, M. de J. (2008). *Contabilidad de costos*. Fundación Universitaria Luis amigó, Medellín, Colombia. Retrieved from <http://www.funlam.edu.co/administracion.modulo/NIVEL-03/ContabilidadDeCostos.pdf>
- Cavanaugh, L. M. (2008). Redefining the Green Roof. *Journal of Architectural Engineering*, *Virginia, USA*, 14(1), 4–6. doi:10.1061/(ASCE)1076-0431(2008)14:1(4)
- CONSTRUDATA. (2014, March). MANO DE OBRA, 170. Colombia.
- Currie, B. A., & Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 11(4), 409–422. USA. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11252-008-0054-y>
- Ducker Worldwide. (2004). Life Cycle Analysis of Low Slope Roof Systems. USA.
- Dunnet, N., & Kingsbury, N. (2004). *PLANTING GREEN ROOFS AND LIVING WALLS*. Sheffield, Inglaterra: Timber Press.
- Gallego Silva, M., & Sarria Molina, A. (2010). *El concreto y los terremotos, conceptos, comportamientos, patología y rehabilitación* (Segunda Edición.). Colombia: ASOCRETO S.A.

- Gutiérrez, R. A. I. (2008). Techos vivos extensivos: una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. *Alarife: Revista de Arquitectura*, (16), 21–.
- Kravitz, R. (2007). new green roof provides basis for extensive study. *Environmental Design + Construction*, 10(4), S6,S8,S10–S12. USA.
- Minke, G. (2011). *Techos verdes - Planificación, Ejecución y Consejos Practicos*. (Eco Habitar.). Alemania: FIN DE SIGLO. Retrieved from [http://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/TechosVerdes\\_Pantalla.pdf](http://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/TechosVerdes_Pantalla.pdf)
- Mirzaei, R. (2013). Green Roof and Strategic Performance. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, 7(2), 473–479. IRAN.
- Nieto Escalante, J. antonio. (2011). GUÍA DE TECHOS VERDES EN BOGOTÁ.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *Bioscience*, 57(10), 823–833. CANADA.
- Oberndorfer, E., Lundhom, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. Retrieved from <http://bioscience.oxfordjournals.org/>
- Osma Pinto, G. A., & Plata, G. O. (2010). DESARROLLO SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES. (Spanish). *UIS Ingenierías*, 9(1), 103–121. México.
- Salgado, M. (2009). Azoteas verdes: un oasis en la ciudad. (Spanish). *Contenido*, (547), 34–39. México.
- Suárez Salazar. (1971). *Costo y tiempo en edificación* (Tercera Edición.). México: Limusa S.A.
- Velazquez, L. S. (2005). Organic greenroof architecture: Sustainable design for the new millennium. *Environmental Quality Management*, 14(4), 73–85. doi:10.1002/tqem.20059

ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES  
(Licencia de uso)

Bogotá, D.C., 16 de junio de 2014

Señores  
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.  
Pontificia Universidad Javeriana  
Cuidad

Los suscritos:

DANIEL OSWALDO CHÁVEZ SUÁREZ , con C.C. No 1018441313

DIEGO FELIPE CAMPOS HERRERA , con C.C. No 1019047013

, con C.C. No

En mí (nuestra) calidad de autor (es) exclusivo (s) de la obra titulada:

**VARIACIÓN DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL Y SUS COSTOS DIRECTOS EN UN EDIFICIO**

**CONVENCIONAL DE 5 PISOS CON LAS ALTERNATIVAS DE TECHO VERDE REGULADOS POR LA**

**ALCALDÍA** (por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)

Tesis doctoral  Trabajo de grado  Premio o distinción: Si  No

cual:

presentado y aprobado en el año 2014 , por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	X	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	X	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	X	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	X	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	X	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de



acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

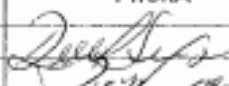
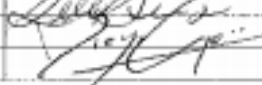
Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

**NOTA: Información Confidencial:**

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si  No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
DANIEL OSWALDO CHÁVEZ SUÁREZ	1018441313	
DIEGO FELIPE CAMPOS HERRERA	1019047013	

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERÍA CIVIL

ANEXO 3  
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.  
DESCRIPCION DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO  
FORMULARIO

<b>TITULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO</b>						
"VARIACION DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL Y SUS COSTOS DIRECTOS EN UN EDIFICIO CONVENCIONAL DE 5 PISOS CON LAS ALTERNATIVAS DE UN TECHO VERDE REGULADOS POR LA ALCALDIA"						
<b>SUBTITULO, SI LO TIENE</b>						
<b>AUTOR O AUTORES</b>						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
CAMPOS HERRERA			DIEGO FELIPE			
CHAVEZ SUAREZ			DANIEL OSWALDO			
<b>DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO</b>						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
GOMEZ VILLASANTE			DAVID			
<b>FACULTAD</b>						
INGENIERIA						
<b>PROGRAMA ACADEMICO</b>						
Tipo de programa ( seleccione con "x" )						
Pregrado	Especialización	Maestria	Doctorado			
X						
<b>Nombre del programa académico</b>						
INGENIERÍA CIVIL						
<b>Nombres y apellidos del director del programa académico</b>						
MARIA PATRICIA LEÓN NEIRA						
<b>TRABAJO PARA OPTAR AL TITULO DE:</b>						
INGENIERO CIVIL						
<b>PREMIO O DISTINCION (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):</b>						
<b>CIUDAD</b>		<b>AÑO DE PRESENTACION DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO</b>			<b>NUMERO DE PAGINAS</b>	
BOGOTA		2014			111	
<b>TIPO DE ILUSTRACIONES ( seleccione con "x" )</b>						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		X	X			
<b>SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO</b>						
Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.						
<b>MATERIAL ACOMPAÑANTE</b>						
<b>TIPO</b>	<b>DURACION (minutos)</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>FORMATO</b>			
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?	
Vídeo						
Audio						
Multimedia						
Producción electrónica						
Otro Cuál?						

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS	
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo <a href="mailto:biblioteca@javeriana.edu.co">biblioteca@javeriana.edu.co</a>, donde se les orientará).</i>	
ESPAÑOL	INGLÉS
TECHOS VERDES	GREEN ROOFS
TECHOS ECOLÓGICOS	ECO-ROOFS
CANTIDADES DE OBRA	WORK QUANTITIES
COSTOS DIRECTOS	DIRECT COSTS
BENEFICIOS AMBIENTALES	ENVIRONMENTAL BENEFITS
SOLUCIONES ECOLÓGICAS	ECOLOGICAL SOLUTIONS
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)	
<p><b>Resumen</b></p> <p>La implementación de techos verdes surgió a nivel mundial como una solución ecológica al deterioro ambiental producido por el crecimiento de la infraestructura urbana. Hasta ahora, esta solución ha sido planteada como una adecuación de las cubiertas en algunos edificios. Sin embargo, la implementación de techos verdes debería pensarse desde la etapa de diseño ya que esta tecnología implica cargas adicionales sobre la cubierta, lo cual puede generar un aumento en la masa sísmica de la estructura principal. Se realizó un modelo estructural de un edificio convencional de cinco pisos ubicado en Bogotá, al cual se le aplicaron las cargas generadas por la implementación de cuatro tipos de techos verdes de la clasificación primaria, regulados por la Alcaldía Mayor de Bogotá. Al analizar el modelo, se encontró que las dimensiones originales de los elementos estructurales, como lo son vigas, columnas y muros de corte debían incrementar, pues la edificación ya no cumplía con los lineamientos de diseño establecidos por la NSR10. Una vez aumentadas las dimensiones de los elementos, se calcularon las cantidades de obra de acero, concreto y formaleta. El incremento de estos materiales, generó una elevación en el costo directo de la estructura en relación al costo total del edificio convencional. Pese a las consecuencias estructurales y económicas del uso de alternativas verdes, se concluyó que la implementación de estas es altamente rentable y conveniente, ya que la inversión se ve reflejada en el valor comercial por metro cuadrado del edificio y en los múltiples beneficios ambientales.</p> <p><b>Abstract</b></p> <p>The implementation of green roofs emerged around the world as an ecological solution to environmental degradation caused by the development of urban infrastructure. Hitherto, this solution has been raised as an adaptation to the original roofs of some buildings. However, the implementation of green roofs must be thought from the design stage since this kind of technology implies additional loads on the cover of the structure, and these loads could generate an increase in seismic mass of the primary structure. It was performed a structural model of a five-story building located in Bogota, which was loaded with four kinds of green roofs of the primary classification established by "Alcaldía Mayor de Bogota". After analyzing the model, it was found that the original dimensions of structural elements as beams, columns and shear walls should increase because they did not meet with the design guidelines of the "NSR10". Once the dimensions of the elements were changed, the quantities of steel, concrete and formwork were calculated. The rise of the amount of those building materials resulted in the rise of direct costs of the main structure relative to the total costs of the conventional building. Despite the structural and economic consequences of the use of green alternatives, the implementation of eco roofs is highly profitable and convenient as investment is reflected in the market value per square meter of the building and the multiple environmental benefits.</p>	