



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Coordinación de Riego y Drenaje Subcoordinación de Ingeniería de Riego

Proyecto interno RD1902.1

Informe Final

**EVALUACIÓN DE HORTICULTURA VERTICAL EN EL IMTA EN
APOYO A LA GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA A NIVEL DE
EDIFICACIONES EN ZONAS URBANAS**

Jorge Flores Velázquez

México 2019



2019
AÑO DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EMILIANO ZAPATA



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Director General

Dr. Adrián Pedroza Acuña

Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Carlos Fuentes Ruiz

Jefe de Proyecto

Dr. Jorge Flores Velázquez

Participantes del IMTA

Dr. Jorge Flores Velázquez

Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

M. I. Pablo Gallardo Almanza

M. C. Juan Manuel Angeles Hernández

M. I. Leticia Becerra Soriano (apoyo)

Apoyo Externo

M. C. Cruz Ernesto Aguilar





ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS EN ZONAS URBANAS, USO Y ADAPTABILIDAD.....	5
1.1 Tecnologías disruptivas	5
1.2 Tecnologías disruptivas en zonas urbanas	6
1.3 Luces artificiales de colores (LED)	7
1.3.1 Agricultura urbana	7
1.3.2 Fábrica de plantas	9
1.3.3 Vertical farm.....	12
1.4 Uso y adaptabilidad de sistemas disruptivos en zonas urbana.....	15
1.4.1 Agricultura “indoor”	18
2 MATERIAL VEGETAL	21





2.1 Plantas hortícolas de porte bajo 21

 2.1.1 Perejil..... 21

 2.1.2 Hierbabuena 24

 2.1.3 Tomillo..... 25

 2.1.4 Lechugas 25

 2.1.5 Lechuga Vulcan var. Vulcan..... 27

 2.1.6 Lechuga Orejona var. Parris Island..... 28

 2.1.7 Lechuga Italiana Var. Tropicana 28

 2.1.8 Fresa 29

 2.1.9 Ensaladas..... 30

 2.1.10 Aromáticas 34

 2.1.11 Albahaca 36

 2.1.12 Cilantro 38

3 COMPONENTES DE UN BIOSISTEMA VERTICAL HIDROPÓNICO 41

 3.1 Sistema de soporte en sistemas verticales 41

 3.2 Medio de cultivo para sistemas urbanos 41

 3.2.1 Sustratos naturales..... 44

 3.2.2 Sustratos artificiales 47

 3.2.3 Riego y solución nutritiva 49

 3.2.4 Hidroponía..... 50





- 3.2.5 Cultivos en estructuras modulares con sustrato..... 51
- 3.2.6 Cultivos verticales en sustratos..... 52
- 4 IMPLEMENTACIÓN DEL BIOSISTEMA GRANJA VERTICAL EN HIDROPONÍA 55**
 - 4.1 Vertical farm o granja vertical..... 55
 - 4.1.1 Implementación de una granja vertical 56
 - 4.1.2 Planteamiento y diseño de la granja vertical 57
 - 4.2 Elaboración de la granja vertical 58
 - 4.2.1 Inicio 58
 - 4.2.2 Estructura vertical portadora 59
 - 4.2.3 Sistema hidropónico en Zigzag..... 60
 - 4.2.4 Sistema hidropónico en líneas verticales (YEES) 62
 - 4.2.5 Sistema de producción en torres con sustrato (variantes) 64
 - 4.2.6 Sistema modular con sustrato (fresa) 65
 - 4.2.7 Colocación de especies vegetales 68
 - 4.2.8 Sistema en raíz flotante tipo balsa 69
 - 4.3 Instalación 71
 - 4.3.1 Descripción de los sistemas hidropónicos..... 73
 - 4.3.2 Riego..... 82
 - 4.3.3 Trasplante..... 89





5 MANUAL TEÓRICO REQUERIMIENTOS HÍDRICOS EN ZONAS URBANAS DEL BIOSISTEMA (ETO. PP Y COSECHA DE LLUVIA) 91

5.1 Requerimientos hídricos áreas verdes urbanas 91

 5.1.1 Requerimientos de riego 91

5.2 Estimación de la precipitación útil en zonas urbanas 104

 5.2.1 Clima 104

 5.2.2 Precipitación 105

 5.2.3 Tipos de precipitación 106

 5.2.4 Formas de precipitación 107

 5.2.5 Lluvia conducida por el viento 108

5.3 Cosecha de lluvia en zonas urbanas para producción hortícola 116

 5.3.1 Antecedentes 116

 5.3.2 Materiales y métodos 120

 5.3.3 Precipitación y agro meteorología 126

 5.3.4 Resultados y discusión 135

 5.3.5 Conclusiones 136

6 VIABILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA PARA IMPLANTAR CULTIVOS VERTICALES EN ZONAS URBANAS 139

6.1 Viabilidad técnica 139

 6.1.1 Demanda alimentaria en zonas urbanas 142

 6.1.2 Superficies cultivables en zonas urbanas 143





6.2 Viabilidad técnica para la implantación de granja vertical 147

 6.2.1 Métodos empleados en granjas verticales..... 147

 6.2.2 Requerimientos hídricos de los cultivos en zonas urbanas 148

 6.2.3 Fertilización 149

 6.2.4 Control de plagas y enfermedades..... 149

 6.2.5 Reposición de plantas muertas 150

7 CONCLUSIONES 151

8 REFERENCIAS 155





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Hidroponía vertical y luces LED (UTAH, 2019).....	7
Figura 1.2	Agricultura artificial	8
Figura 1.3	Agricultura urbana	9
Figura 1.4	Asimilación de nutrientes por las plantas	10
Figura 1.5	Plant Factory	12
Figura 1.6	Vertical Farm	15
Figura 1.7	Agricultura urbana	16
Figura 1.8	Beneficios del material vegetal como estabilizador térmico en zonas urbanas (Poza, 2017)	18
Figura 1.9	Sistema comercial mini fábrica de plantas.....	19
Figura 1.10	Hortalizas de porte bajo.....	20
Figura 2.1	Plantas cultivadas, susceptibles de adaptar a sistemas hidropónicos	21
Figura 2.2	Perejil.....	22
Figura 2.3	Perejil, características	23
Figura 2.4	Hierbabuena	24
Figura 2.5	Tomillo	25
Figura 2.6	Lechugas en sistemas verticales “indoor”	26
Figura 2.7	Lechuga Vulcan var. Vulcan.....	27
Figura 2.8	Lechuga Orejona var. Parris Island.....	28



Figura 2.9 Lechuga Italiana var. Tropicana 29

Figura 2.10 Fresa..... 30

Figura 2.11 Espinaca 31

Figura 2.12 Kale..... 33

Figura 2.13 Orégano..... 35

Figura 2.14 Cilantro 39

Figura 3.1 Componentes de un sistema urbano hidropónico..... 51

Figura 3.2 Membranas portantes..... 52

Figura 3.3 Lana de roca..... 53

Figura 4.1 Construcción de la estructura metálica 59

Figura 4.2 Planteamiento del sistema hidropónico..... 60

Figura 4.3 Construcción del sistema para hidroponía zigzag 61

Figura 4.4 Diseño y funcionamiento de la hidroponía TEE 61

Figura 4.5 Pared frontal del edificio de Riego y Drenaje 62

Figura 4.6 Líneas (torres) ensambladas, sistema vertical..... 63

Figura 4.7 Equidistancias del sistema hidropónico vertical 63

Figura 4.8 Panorama general de los sistemas 64

Figura 4.9 Torres con diámetros variables 65

Figura 4.10 Sistema modular con sustrato, cultivo de fresa 66

Figura 4.11 Sistema vertical a base de membranas 67

Figura 4.12 Sustrato para producción de plantas, mezcla de perlita y fibra de coco, con suelo 68

Figura 4.13 Sistema modular para producción con sustrato 69

Figura 4.14 Sistema hidropónico en raíz flotante, aproximación 70

Figura 4.15 Sistema hidropónico vertical en contenedor 70

Figura 4.16 Sistema hidropónico en raíz flotante 71

Figura 4.17 Muestra de una fábrica de plantas, en capas 73





Figura 4.18 Ensamble de los sistemas hidropónicos 73

Figura 4.19 Base de herrería, para soporte de los subsistemas hidropónicos 74

Figura 4.20 Instalación de la tubería de PVC..... 75

Figura 4.21 Instalación de la tubería de PVC, sistema de T's 76

Figura 4.22 Instalación de la tubería de PVC, sistema de Y's 76

Figura 4.23 Colocación de estructuras 77

Figura 4.24 Actualización de estructuras 78

Figura 4.25 Trasplante de fresa en el sistema modular con sustrato 79

Figura 4.26 Sistema de producción tipo balsa con raíz flotante..... 80

Figura 4.27 Adaptabilidad de sistemas verticales 81

Figura 4.28 Colocación de plantas germinadas 81

Figura 4.29 Colocación del sistema de riego a cada módulo..... 82

Figura 4.30 Vista inferior del panel solar 83

Figura 4.31 Bomba sumergible para recirculación con panel solar 84

Figura 4.32 Captación de la solución nutritiva para recirculación 85

Figura 4.33 Bomba horizontal para riego programado..... 86

Figura 4.34 Panel de control para programación del riego 87

Figura 4.35 Disposición de sistema de riego solar, eléctrico y estación meteorológica instaladas.. 88

Figura 4.36 Variables meteorológicas que registra la estación..... 89

Figura 4.37 Tipos de lechugas cultivadas 90

Figura 5.1 Jardín vertical Caixa Fórum, Madrid (Ayuso, 2016)..... 99

Figura 5.2 Precipitación media mensual, mm (período 1982-2009) 104

Figura 5.3 Precipitación media mensual, mm (período 1982-2009) 104

Figura 5.4 Tipos de precipitación..... 106

Figura 5.5 Formas de precipitación 108

Figura 5.6 Representación esquemática de la lluvia conducida por viento (Elizondo, 2009) 109





Figura 5.7 Dirección de los vientos para el período 2013-2018..... 112

Figura 5.8 Temporada de lluvias de junio a septiembre (período 2013-2018) 112

Figura 5.9 Dirección del viento, enero-abril..... 113

Figura 5.10 Dirección del viento, mayo-agosto 114

Figura 5.11 Dirección del viento, septiembre-diciembre 115

Figura 5.12 Ubicación del IMTA, Jiutepec, Morelos, México 121

Figura 5.13 Ubicación de los edificios A1 y 2, en el ortomosaico del IMTA..... 122

Figura 5.14 Metodología para determinar el volumen de escurrimiento, para captación de agua de lluvia en agricultura urbana 123

Figura 5.15 Imágenes del equipo: a) fuselaje, b) control, c) carga útil y d) zona de despegue..... 123

Figura 5.16 Ejemplo de comparación de longitudes: a) medición real y b) medición obtenida en el ortomosaico, mediante el VANT..... 124

Figura 5.17 Comparación entre las longitudes medidas y las obtenidas en el ortomosaico por el VANT: a) edificio A1 (Anexo 1) y b) Edificio 2 (Riego y Drenaje) 126

Figura 5.18 Precipitación media mensual en la estación meteorológica, período 1982-2019..... 128

Figura 5.19 Escurrimiento medio mensual para captación de agua de lluvia, en los edificios A1 y 2 135

Figura 6.1 Producción intensiva de Lechiga en Hidroponía (iGrow, 2019) 141

Figura 6.2 Cultivo Indoor, iGrow, 2019..... 144

Figura 6.3 Distribución poblacional (CONAPO, 2017) 145





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Propiedades de la turba (Fernández et al., 1998).....	46
Tabla 3.2	Propiedades de la lana de roca (Fernández et al., 1998).....	47
Tabla 3.3	Propiedades físicas/tamaño de las partículas, mm de diámetro (Fernández et al., 1998)	48
Tabla 5.1	Coeficiente de especie (Costelo, 1994)	101
Tabla 5.2	Coeficientes de densidad (Martín Rodríguez).....	102
Tabla 5.3	Coeficiente de microclima (Martín Rodríguez).....	103
Tabla 5.4	Coeficientes de especie, densidad y microclima para jardines (Costelo, 2000)	103
Tabla 5.5	Comparación entre las longitudes medidas y obtenidas en el ortomosaico para los edificios A1 y 2	125
Tabla 5.6	Coeficientes de escurrimiento para captación de agua de lluvia	132
Tabla 5.7	Asignación del coeficiente de escurrimiento a cada área de captación de agua de lluvia	133
Tabla 5.8	Volumen de escurrimiento mensual para el edificio A1 y 2	134
Tabla 6.1	Países del Mundo por número de habitantes, año 2019	143
Tabla 6.2	Superficie de las principales ciudades en CDMX (wikimedia, 2019)	146





INTRODUCCIÓN

El movimiento poblacional indica que la mayor parte de las personas están viviendo en las ciudades. Entre las consecuencias de este movimiento, es la explotación excesiva de los recursos naturales, un aumento acelerado de la demanda de recursos, además de un incremento de la contaminación atmosférica y del agua. La complicación para satisfacer esas necesidades presenta la disruptiva de buscar alternativas y crear ciudades sostenibles.

La utilización de la vegetación en la arquitectura, tiene una interesante influencia en las edificaciones por su capacidad para modificarla, no solo por cuestiones estéticas, sino más bien la intervención para hacerla funcional. La cualidad de la vegetación en las zonas urbanas ha quedado de manifiesto, debido principalmente a sus excelentes cualidades aislantes, fruto de la combinación de plantas junto con su capa de tierra, ya que, en los climas fríos, hace que se retenga el calor en el interior de la casa, en cambio en climas calurosos actúa de manera inversa dificultando la entrada de calor del exterior.

Actualmente, existen y se están implantando toda una serie de nuevos sistemas constructivos que facilitan y posibilitan el poder incorporar muchos otros tipos de plantas, no solo en las azoteas de forma horizontal; es posible usar las fachadas de edificios, paredes y muros mediante unas estructuras tridimensionales verticales como son los paneles y también los geo productos.

La tipología de construcción está ayudando a evolucionar el concepto y técnicamente la implantación de tecnologías disruptivas en edificaciones verticales, dando un giro a los sistemas más tradicionales. El crecimiento tecnológico en cuanto a la fabricación de jardines verticales viene motivado por la creciente consideración de la sociedad en cuanto a los espacios verdes y





la calidad ambiental de las ciudades; animado a su vez por el creciente empeoramiento de las condiciones ambientales que rodean a las ciudades debido a la enorme cantidad de contaminación existente como a la reducción de las áreas verdes de las ciudades.

Ya desde el 2014 se estima que las ciudades tenían la mayor población y en esta misma tendencia se encuentra la producción agrícola, con la misma tendencia en el consumo de energía, emisiones de CO₂. Los huertos urbanos sobre agricultura urbana vertical (AgUrVe) además evitan el consumo de recursos en el traslado de la parcela a la casa y lo disminuye de las parcelas en el medio rural a las ciudades.

En general, la producción de cultivos es una actividad que ha evolucionado de manera ininterrumpida desde su origen, de hecho, es quizá la actividad que más ha cambiado, manteniendo en común solo el hecho de la producción de alimentos. Semillas mejoradas, riego, la revolución verde hasta la integración de invernaderos en las cubiertas de edificios pretende beneficiar a la producción hortícola en sistemas urbanos desde una perspectiva ecología industrial, no sólo en el precio de venta del producto sino también en la potencial reducción del uso de recursos a través de la reutilización de flujos residuales, la captación de recursos locales y la absorción de CO₂ residual.

Esta conexión será utilizada para realzar la sostenibilidad del concepto en cuanto a la producción de vegetales de alta calidad, con bajo impacto ambiental y manteniendo el confort térmico en edificios con una menor demanda energética.

Lo más importante con la agricultura vertical, será trasladar una idea de los huertos a la ciudad consiguiendo así contrarrestar el índice de CO₂ en zonas urbanas muy distanciadas del campo en dos conceptos básicos:

1. Transporte de alimentos a la ciudad produciendo un ahorro de combustible y por tanto económico.
2. Absorción del CO₂ producido por la industria mediante la plantación de plantas purificadoras.





La agricultura vertical ha mostrado ventajas en la forma de producir y en la vista arquitectónica de las ciudades, por lo que la ciudad de México ofrece subvenciones a quien opte por sistemas de este tipo, así como una mejora en el abastecimiento de productos cercanos a la ciudad desde un punto de vista de producción. Al realizar estos desarrollos dentro del marco institucional se pueden conseguir una serie de ayuda que permita ejecutar dichos proyectos con alguna garantía en la producción de alimentos, así como una buena ejecución en la construcción paisajista de este tipo de “huertos de ciudad”.

En resumen, el objetivo general de este trabajo consiste en analizar desde el punto de vista tecnológico y de sostenibilidad condiciones para la adaptabilidad de sistemas de producción hortícola en sistemas urbanos a través de la integración de huertos verticales, que puedan adaptarse a las paredes de los edificios y aprovechando los mismos sistemas de la casa o departamento.

Este análisis pretende contribuir con la adaptabilidad de los tradicionales sistemas de producción a campo abierto, a los sistemas “indoor” que promueve el uso eficiente de los recursos, considerando el crecimiento económico, para que la cadena de producción se cambie a escala local y se reducirá radicalmente las necesidades de transporte.





1 TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS EN ZONAS URBANAS, USO Y ADAPTABILIDAD

1.1 Tecnologías disruptivas

Entre los 42 países de América Latina y el Caribe suman 595 millones de habitantes. A partir de 2010 esta población se ubica en zonas principalmente urbanas (ONU, 2012). Para 2040, 2 billones de personas estarán habitando las principales ciudades. La evolución de la gestión integrada de los recursos hídricos ha pasado (o está en ese proceso) del manejo de la cuenca a la gestión hídrica en la ciudad. La agricultura también está migrando a las ciudades sumando el intensivo consumo de recursos al consumo de la población.

En energía se estima un incremento del 35% en la demanda global. El uso de energía en los edificios residenciales y comerciales es responsable del 40%, aproximadamente del consumo total de energía y del 36% de las emisiones totales comunitarias de CO₂. Por tanto, los edificios pueden llegar a ser uno de los principales espacios en la carrera por un mejor uso de la energía y contra el Cambio Climático (Sánchez, 2015).

Un porcentaje similar será en el recurso hídrico. La gestión integrada de recursos hídricos "GIRH es un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, el suelo" y demás recursos para potenciar su uso "sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales". En la zona metropolitana de la ciudad de México habitan más de 22 millones de una población apostada en aproximadamente 8,000 km², lo que implica una densidad de habitantes de las más altas del mundo





que ha ido absorbiendo la zona rural por la urbana. Frente a ello, se han puesto en marcha tecnologías disruptivas con el fin de atender la transformación del sector.

La urbanización de la población se inició por una combinación de dos grandes circunstancias estructurales: por una parte, el proceso de industrialización y de modernización sociocultural de los países, cuyo espacio estuvo en las ciudades; y la segunda, el estancamiento productivo y social del campo y la aguda inequidad en el acceso a los recursos. Esta combinación provocó el agudizamiento de las brechas efectivas y de oportunidades entre ambos ámbitos, dando como resultado el deterioro del medio rural como forma de vida y detonador de la exponencial migración de su población (CELADE, 2012).

Agricultura urbana, Fábrica de plantas, granjas verticales, muros y azoteas verdes, son solo algunas de las tecnologías que han surgido y de manera exponencial se han posicionado como alternativas de producción agrícola. La implementación de estas tecnologías indiscutiblemente pertenece a la cuarta generación de la agricultura, también llamada *big data*, donde todo está interconectado y puede ser operado y gestionado con ceros y unos. Pero, además, implica gestión del recurso mediante tratamiento de aguas residuales, reciclaje del agua, cosecha de lluvia y de gestión de la demanda. En este trabajo se expone la viabilidad en la implantación de estas tecnologías, sus ventajas y requerimientos desde el punto de vista hídrico.

1.2 Tecnologías disruptivas en zonas urbanas

Uno de los principales avances en el desarrollo del sector agrícola ha sido lograr un incremento en los rendimientos, con lo cual ha sido posible al re direccionar los objetivos de altas productividades por las propiedades del cultivo, desde luego sin dejar de lado el uso eficiente de los recursos.

Uno de los problemas del siglo XXI es la rapidez con que suceden las cosas y en consecuencia la mala alimentación de la población debido a la rapidez de la vida misma lo que deriva en poco tiempo para hacer una comida saludable; la reducción de la calidad de vida se asocia con el sedentarismo y la falta de tiempo para ejercitarse (Buzby, 2011), lo cual está siendo adaptado por la horticultura protegida como un reto.



Cabe destacar que, esta técnica no solo implica la producción de cultivos. Captación de CO₂, amortigua el ruido, disipa la contaminación, estabiliza el clima, por lo que la utilidad es vasta y los límites se encuentran en la creatividad de la población.

1.3 Luces artificiales de colores (LED)

Lograr que la planta misma en su fisiología incremente propiedades ha sido posible usando herramientas como el fertirriego o el uso de luces artificiales o LED que además que aporta soluciones al consumo de energía, provee de características específicas a los productos hortícolas como el tomate o lechuga.

El uso de luces artificiales ayuda a inducir crecimiento del cultivo en específicos momentos de su desarrollo y con ello manipular las características, como intensificar el follaje con el fin de atenuar la fotosíntesis en edad temprana.



Figura 1.1 Hidroponía vertical y luces LED (UTAH, 2019)

1.3.1 Agricultura urbana

El ininterrumpido crecimiento de las ciudades ha dado como resultado una reducción o en algunos casos la eliminación de zonas de cultivo. Buscando alternativas, se desarrolló la agricultura urbana, techos y paredes verdes. Esta tecnología

actualmente compite fuertemente con la protegida al menos en superficie.

Una de las ventajas de la horticultura urbana es la disposición de tecnologías que permiten cultivar y cosechar productos en un mismo espacio y poder disponer de ella de manera casi inmediata. Con la agricultura protegida surgieron formas artificiales de producción agrícola, que han alcanzado un máximo en la agricultura urbana.

Además, un aspecto que ha comenzado a marcar diferencias es la calidad del consumo, con productos cultivados de manera totalmente orgánica.



Figura 1.2 Agricultura artificial

La zona metropolitana de la hoy ciudad de México alberga más de 22 millones de habitantes apostados en aproximadamente 8,000 km², lo que implica una densidad de habitantes de las más altas del mundo que ha ido absorbiendo la zona rural por la urbana. Lo anterior prácticamente signa las bases para la implementación de la agricultura urbana casi de manera "per se", cuyo sistema ha de permitir la producción de entre 5 y 10 cultivos entre hortalizas, verduras y hasta medicinales de autoconsumo, en sistemas verticales, azoteas o balcones.

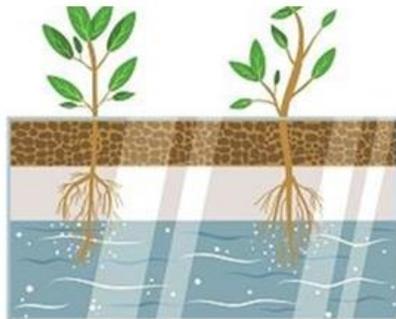


Figura 1.3 Agricultura urbana

1.3.2 Fábrica de plantas

La evolución de la agricultura se mantiene en constante crecimiento; el concepto de fábrica de plantas consiste en la producción de cultivos con el menor "gasto" de recursos. Esto es está siendo posible mediante el conocimiento específico de la fisiología de la planta y en consecuencia llevar a cabo un manejo exquisito de la misma. Por ejemplo, estudios realizados por el grupo de trabajo del Dr. Marcelis de la Universidad de Wageningen en Holanda han puesto en evidencia que las plantas cultivadas mantienen diferente condición física a lo largo del día y desde luego una marcada diferencia por ejemplo de temperatura entre el día y la noche (comunicación directa). Esto implica que los requerimientos también son diferentes. En términos prácticos, dicho grupo de investigación sostiene que, en el tomate, la mejor relación "fuente-sumidero" ocurre cuando el índice de área foliar (FAI, por sus siglas en inglés) es de 3.5.

HIDROPONÍA



AEROPONÍA

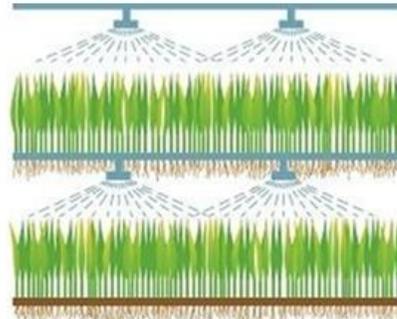


Figura 1.4 Asimilación de nutrientes por las plantas

Las nuevas tendencias en horticultura avanzan con pasos agigantados, las herramientas tecnológicas, el uso de microsensores, controladores, actuadores, luces artificiales, etc., son solo algunos de los proyectos que están siendo adecuados para que sean económicamente viables a cualquier usuario, mientras tanto, las nuevas generaciones de horticultores, deben estar conscientes que, si desean permanecer en este mercado, es conveniente:

- Desarrollar un alto nivel en el conocimiento fisiológico de la planta.
- Ser capaz de combinar la producción hortícola con los modelos matemáticos.
- Habilidades en el manejo del cultivo, de acuerdo a las variaciones geográficas o ambientales.
- Profundo conocimiento del manejo de las variables climáticas y capacidad de adaptación.

Plant factory es una instalación que ayuda a la producción constante de vegetales de alta calidad durante todo el año controlando artificialmente el entorno de cultivo (por ejemplo, luz, temperatura, humedad, concentración de dióxido de carbono y solución de cultivo), permitiendo a los productores planificar la producción.

Al controlar el entorno interno, las fábricas de plantas pueden producir verduras de dos a cuatro veces más rápido que con un cultivo típico al aire libre. Además, como se usan múltiples



estantes de cultivo, se facilita la producción masiva de vegetales en un espacio pequeño.

Ventajas

- Proporciona producción agrícola estable durante todo el año.
- Se puede establecer en casi cualquier lugar, por ejemplo, un parque industrial o una tienda vacía en un distrito comercial. No requiere grandes tierras de cultivo.
- Puede ser un uso eficiente de la tierra por cultivo de etapas múltiples.
- Para lograr una mayor productividad a través de la automatización y el cultivo múltiple.
- Los productos pueden ser uniformes en tamaño y forma, por lo que su procesamiento es muy sencillo.
- El contenido de un nutriente puede aumentar.
- La cosecha es segura porque no contiene pesticidas.

Las acciones necesarias para una mayor promoción son las siguientes.

- Disminuir el costo de las instalaciones y la energía.
- Establecimiento de tecnología de cultivo y desarrollo de recursos humanos.
- Desarrollo y expansión de variedades de cultivos que plantan.



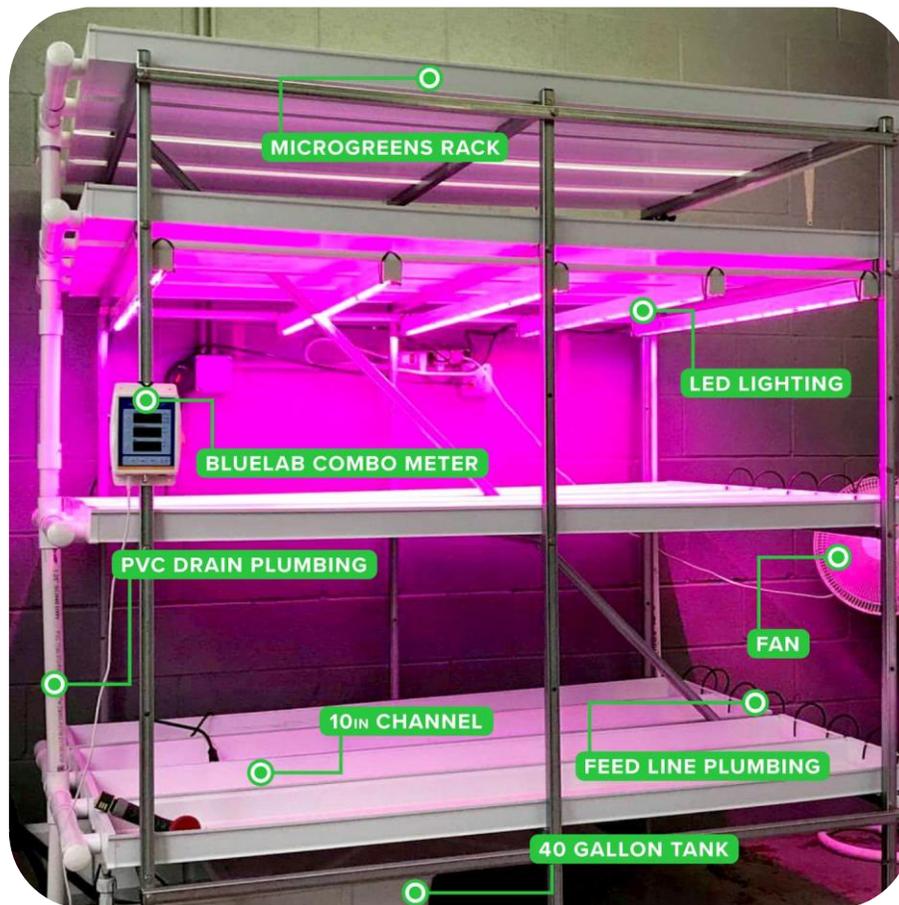


Figura 1.5 Plant Factory

1.3.3 Vertical farm

Las granjas verticales son aquellas granjas que se desarrollan en edificios o rascacielos acondicionados para que se pueda llevar a cabo la producción, ya sea como agricultura, acuicultura o ganadería en el interior de estos. El concepto de granjas verticales se ha explorado por décadas, pero hasta ahora es que se muestra económicamente viable. Empresas dedicadas a este negocio están germinando cosechas de productos que normalmente toman 30 días en el campo en períodos de 16 días, utilizando 95% menos agua, 50% menos fertilizante, cero pesticidas, herbicidas y fungicidas.

Al tener granjas verticales estas contribuyen a que los habitantes de la comunidad suplan todas sus necesidades alimenticias reutilizando infraestructuras acondicionadas con



tecnología de punta; utilizan luz artificial, control climatológico y redes sensoriales. En un futuro no muy lejano se espera que el consumidor se convierta entonces en el productor y el habitante del jardín.

Las ventajas de las granjas verticales son numerosas:

- Rendimientos elevados a lo largo del año (se pueden cosechar cantidades significativas de hortalizas sobre una superficie relativamente pequeña).
- Llegada a madurez de las hortalizas más rápida, permitiendo varias cosechas al año.
- Reducción del uso del agua.
- Ausencia de pesticidas y organismo genéticamente modificado (OGM).
- Ausencia de enfermedades debido a plagas ya que las plantas se cultivan fuera de suelo.
- Ausencia de maquinaria agrícola tradicional: tractores, pulverizadores, sembradoras..
- Reciclaje integral de los nutrientes que no fueron utilizados.

En forma establecida, una granja vertical estaría formada por los siguientes componentes:

- 1. Paneles solares.** La mayoría de las granjas verticales planteadas serían autoabastecibles mediante su propio sistema energético. Los paneles solares rotatorios en dirección del sol (seguidores solares) instalados en la parte alta del edificio son una de las posibilidades. Además serviría para mantener el interior de la granja fresco.
- 2. Turbina de viento espiral.** Una alternativa o un complemento es una espiral rotativa eólica. Estaría colocada también en la parte alta del edificio con el fin de generar energía eólica.
- 3. Paneles de cristal** Especiales para que el agua deslice lo mejor posible. De esta forma ensucia menos, permite mayor claridad y entrada de luz, y el agua que se recoge





para su tratamiento es mayor que si se quedara adherida, ya que se evaporaría.

4. **Sala de control** El edificio entero estaría controlado 24 horas por un equipo de especialistas.
5. **La arquitectura.** Con un diseño circular que permitiría aprovechar de forma más eficiente el espacio. Además, permite una máxima iluminación natural en el centro.
6. **Los cultivos** Los expertos estiman que un edificio de estas características podría proporcionar fruta, verdura, agua, pescado y carne para unas 50 mil personas. Toda una granja con cultivos y ganadería en un rascacielos.

No obstante, en términos urbanos, será posible la implantación de sistemas más elementales, iniciando el proceso con la producción de plantas de porte bajo, principalmente hortalizas y en áreas similares a la parte exterior del departamento, como lo mostrado en la Figura 1.6.





Figura 1.6 Vertical Farm

1.4 Uso y adaptabilidad de sistemas disruptivos en zonas urbana

Se trate de agricultura vertical, fábricas de plantas, agricultura urbana, cultivo en invernaderos o de cultivos en azoteas, es notoria la tendencia y el interés mundial por desarrollar una agricultura altamente productiva bajo un medio ambiente controlado (biosistemas). Bajo este campo de actuación destacan diversas opciones y alternativas novedosas, basadas en la innovación científica y tecnológica, con fines de autoconsumo, ornato, mejora ambiental, medicinal, usos recreativos y empresariales.

La agricultura urbana es la práctica agrícola y pecuaria en las ciudades, que por iniciativa de los productores afincados en las ciudades y sus alrededores; utilizan los mismos recursos locales, como mano de obra, espacios, agua y desechos sólidos orgánicos y químicos, así como servicios, con el fin de generar productos de autoconsumo y también destinados a la producción de alimentos para el autoconsumo y venta en el mercado.

Lo habitual es que la agricultura urbana esté destinada a la obtención de alimentos frescos. Al tener acceso inmediato a cultivos, quienes viven en las ciudades incrementan su seguridad alimentaria, ya que no dependen solo de las materias primas que llegan desde los campos.

Otro beneficio que aporta la agricultura urbana es que reduce el uso de energía y, por lo tanto, contribuye a minimizar la contaminación. Al no tener que trasladar los alimentos desde otras zonas, no se movilizan vehículos contaminantes con la carga correspondiente.



Figura 1.7 Agricultura urbana

La agricultura urbana puede ser definida como el cultivo de plantas y la cría de animales en el interior y en los alrededores



de las ciudades. La agricultura urbana y periurbana proporciona productos alimentarios de distintos tipos de cultivos (granos, raíces, hortalizas, hongos, frutas), animales (aves, conejos, cabras, ovejas, ganado vacuno, cerdos, cobayas, pescado, etc.) así como productos no alimentarios (plantas aromáticas y medicinales, plantas ornamentales, productos de los árboles).

En apoyo a la cría de animales en el interior y en los alrededores de las ciudades, la producción de forraje verde hidropónico es muy importante, es un alimento verde, de alta palatabilidad y de excelente valor nutritivo para cualquier animal. La producción de forraje verde hidropónico (FVH) consiste básicamente en germinar semillas de cereales a altas densidades de siembra y hacerlas crecer alrededor de 20 cm en un período de 6 a 12 días, siendo un excelente material en muchos sentidos para la nutrición de varias especies animales (Valdivia, 1997).

La agricultura urbana incluye la silvicultura - para producir frutas y leña.

Las hortalizas tienen un ciclo de producción corto, algunas se pueden recolectar a los 60 días de la siembra, lo cual se adecua a la agricultura urbana. Los huertos pueden ser hasta 15 veces más productivos que las fincas rurales. Un espacio de apenas un metro cuadrado puede proporcionar 20 kg de comida al año. Los horticultores urbanos gastan menos de transporte, envasado y almacenamiento, y pueden vender directamente e puestos de comida en la calle y en el mercado, Así obtienen más ingresos en vez de que vayan a parar a los intermediarios (FAO.org).

Las ventajas de la naturación o presencia de plantas en sistemas verticales y techos, impacta no solo en la estética de los edificios, sino que también contribuye con la regulación térmica, la captación hídrica y la posibilidad de su cosecha, disminución del ruido y problemas de contaminantes.



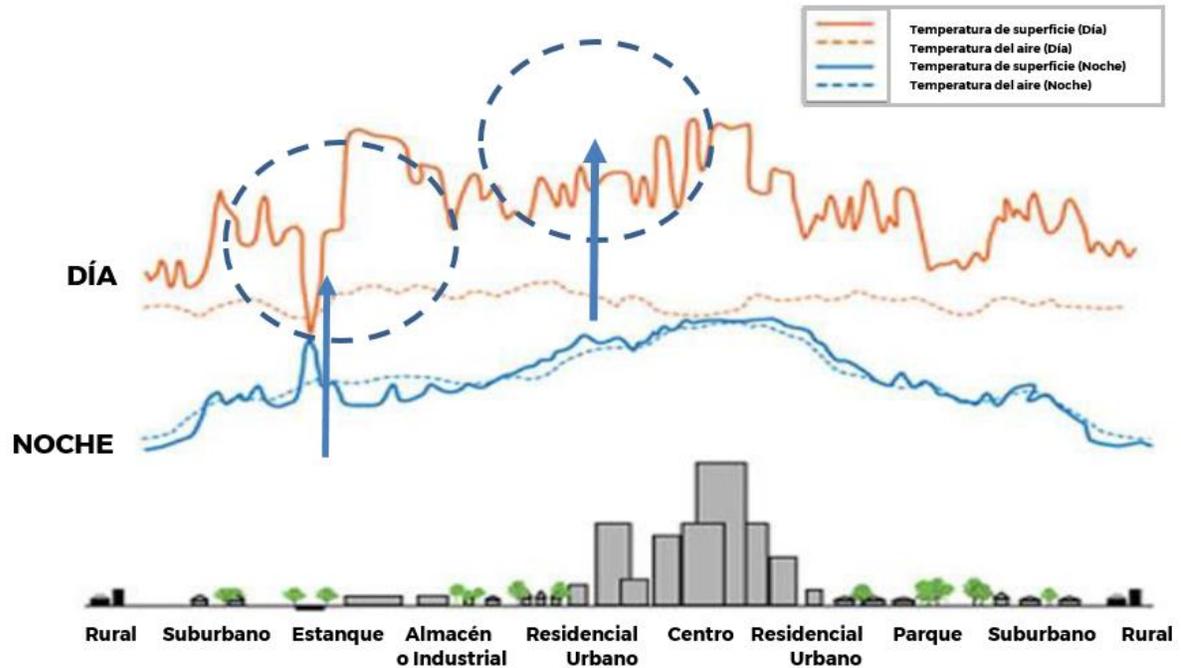


Figura 1.8 Beneficios del material vegetal como estabilizador térmico en zonas urbanas (Poza, 2017)

1.4.1 Agricultura “indoor”

La siguiente alternativa es la producción hortícola, cuyo procedimiento es similar, excepto que la selección de planta es una hortaliza generalmente de porte bajo, tales como lechuga, col, kale (col verde). En general existe una gran variedad de especies susceptibles de ser cultivadas en paredes y techos, los cuales pueden ser a cielo abierto o protegidos, o combinados.

Smart Appliance	Monitor your plants, temperature, humidity, and water level via our mobile app for an optimized growing experience.
60 Plant Capacity	Grow up to 60 plants in a fraction of the space of a traditional garden.
Easy Cleaning	Our system uses high pressure aeroponics that actually cleans itself as it grows. The grow rings are easy to remove and dishwasher safe.
Plant Camera	Enable the camera in our app to check on your plants anywhere, anytime. Share with your friends and show off your green thumb.
LED Lighting	We use a full spectrum of LED lights to mimic the sun - enhancing the flavors in your food.
Efficiency	Our patented rotary aeroponics growing system consumes half the energy than other systems on the market today and it only requires 8 gallons of water per month.



Let's get Growing

Figura 1.9 Sistema comercial mini fábrica de plantas

El biosistema de la Figura 1.9 está diseñado para cultivar hortalizas de porte bajo, entre las que se pueden mencionar las siguientes:



Romaine Lettuce

Great for a nutritional salad or adding crisp flavor to a sandwich and is an excellent source of vitamin A, vitamin K, folate and molybdenum.



Spinach

Spinach is a superfood. It is packed full of nutrients and is low in calories. The dark leafy greens are excellent in salads, omelettes, or even smoothies.



Genovese Basil

Basil is excellent for enhancing the flavor on a pizza or omelette and is the main ingredient in pesto.



Cilantro

Cilantro is commonly used as a spice in cooking and is often added to salsa and sauces.



Arugula

Arugula is also known as rocket lettuce for its peppery flavour. Add to a mixed green salad for a 'kick'.



Red Russian Kale

The taste of Red Russian Kale can be surprisingly varied, from bitter or peppery to more plain and slightly sweet. Kale has many health benefits and is commonly used in mixed green salads or even baked into chips.



Cress

Fresh watercress is used as a salad green, sandwich filling, or dish garnish. The alternate leaves are pinnately compound with three to nine leaflets. Cress is genetically related to watercress and mustard, sharing their peppery, tangy flavor and aroma.



Mint

Mint has one of the highest antioxidant volumes of any food. The tender herb is great for adding flavor to a dish or tea to replace sugar.

A



Oregano

Mediterranean herb used for flavoring sauces, bread rolls, and meat marinades. Anti-bacterial properties help to fight infections and even treat MRSA.



Parsley

Parsley features a vibrant and delicious taste that can be added to almost any dish. This nutritional powerhouse contains vitamins A, B, C and K and the minerals iron and potassium.



Dill

A highly versatile herb that goes well with almost any dish, soup, dip or tea. Dill seeds are packed with calcium, fiber, and many other vitamins and nutrients.



Chive

As part of the onion family, Chive has a mild, grassy, onion like flavour. Use chives in garnishes, salads, egg mayonnaise sandwiches, vegetable stocks, soups, creamy sauces, potato dishes and omelettes. Add chives to your dish just before serving.



Thyme

Herb widely used for dietary, medicinal, and ornamental uses. The leaves can be sprinkled on poultry, meat, seafood, eggs, soups, and salads.



Blank

You get to pick the seeds for this blank pod. Experiment in your GroPod by planting flowers, fruits, or other

A

Figura 1.10 Hortalizas de porte bajo

2 MATERIAL VEGETAL

2.1 Plantas hortícolas de porte bajo

La variedad de especies que se cultivan en zonas urbanas, ha sido adaptada tanto a las necesidades alimentarias de la población como a las condiciones para su producción en espacios reducidos y requerimientos.



Figura 2.1 Plantas cultivadas, susceptibles de adaptar a sistemas hidropónicos

Entre las que más se ha extendido se encuentran las siguientes.

2.1.1 Perejil

Al principio, el follaje puede confundirse fácilmente con el cilantro. Sin embargo, su sabor es claramente perejil, y es

favorecido por su sabor profundo, que algunos dicen que se sostiene mejor en la cocina que el perejil rizado. Es popular en la cocina mediterránea y del Medio Oriente. Fáciles de picar, las hojas planas y nutritivas son ricas en hierro y en vitaminas A, C y E. Un alto contenido de clorofila también lo convierte en un edulcorante natural.



Figura 2.2 **Perejil**

- Tipo Biennial (la primera temporada crece y la segunda florece).
- Tiempo de siembra primavera, otoño.
- Características: las hojas verdes planas son fáciles de cortar.
- Luz Solar a sombra parcial.
- Suelo ligero y bien drenado.
- Espaciado de plantas de 15 a 18 pulgadas.
- Tamaño de la planta: 1 pie de altura.
- Uso del jardín Contenedores, parterres y hierbas.
- Uso culinario: guarnición, condimentos, ensaladas, limpiador de paladar.

Esta es una gran planta para contenedores, especialmente para otoño e invierno. Por supuesto, también puede usarlo en lechos de vegetales y hierbas. En una cama de flores, es un agradable compañero de hojas verdes para flores pequeñas como los pensamientos. También es más tolerante al clima cálido que el perejil rizado (que puede luchar durante el pico del verano) y es tolerante a las heladas.

Requisitos de luz: pleno sol a sombra parcial.

Plantación: Separe de 12 a 20 pulgadas, dependiendo del tipo. (Lea la etiqueta adhesiva que viene con la planta para obtener recomendaciones específicas de espaciado).

Requisitos del suelo: las plantas crecen mejor en suelos ricos y húmedos.

Requisitos de agua: Mantenga el suelo húmedo después de plantar hasta que las plantas estén bien enraizadas. Las plantas crecen mejor con la humedad adecuada. En contenedores, riegue siempre que el suelo esté seco.

Plan de lucha contra las heladas: las plantas establecidas pueden sobrevivir a unas pocas heladas duras (menos de 28° F). Use una manta de escarcha para proteger las plántulas recién plantadas de las heladas de finales de primavera o prolongar la temporada de crecimiento.



Familia	Apiaceae
Nombre científico	Petroselinum crispum
Nombre común	Perejil
Origen	Mediterráneo europeo oriental
Altura	15 cm
Diámetro	3-4 m

Figura 2.3 **Perejil, características**

Descripción: Planta herbácea bienal, aunque puede cultivarse también como anual. Forma una roseta empenachada de hojas muy divididas, alcanza los 15 cm de altura y posee tallos floríferos que pueden llegar a rebasar los 60 cm con pequeñas flores verde amarillentas.

- Riego: cada 10 días
- Plagas y enfermedades: pulgones septoriosis y cercosporiosis.

2.1.2 Hierbabuena



Familia	Lamiaceae
Nombre científico	Mentha sativa L
Nombre común	Hierbabuena
Origen	Europa
Altura	30 cm
Diámetro	10.5 cm

Figura 2.4 Hierbabuena

Descripción: La hierbabuena es una planta aromática y condimentaria, perfecta para aderezar ciertos platos gastronómicos y realizar agradables infusiones ya sea como planta individual o en acompañamiento con otras especies.

Riego: cada 10 días.

Plagas y enfermedades: pulgones, mosca blanca y roya.

2.1.3 Tomillo



Familia	Lamiaceae
Nombre científico	Thymus
Nombre común	Tomillo
Origen	Europa y Asia,
Altura	15 y 30 cm
Diámetro	11 a 13 cm

Figura 2.5 Tomillo

El tomillo es una de las plantas más conocida entre las especies, y su uso en la cocina es variado. Por lo general es fácil de adquirir ya que es usado en la mayoría de las comidas del mundo, para darle un gran sabor a las comidas, especialmente a las sopas y las carnes.

Se recomiendan frecuencias de riego de hasta 10 días.

2.1.4 Lechugas

El cultivo de lechuga es producido en prácticamente todo el mundo. Las mayores superficies son a campo abierto, pero en la última década se observa un incremento en invernadero y es el principal cultivo en el sistema conocido como "indoor" (Figura 2.6). Es una hortaliza de clima frío, con cierta tolerancia a heladas débiles en sus estados iniciales, pero cerca de la cosecha es susceptible a quemaduras de las hojas externas por heladas, quedando muy expuesta a ataques de enfermedades.



Figura 2.6 Lechugas en sistemas verticales “indoor”

La temperatura óptima de crecimiento está entre 15 y 18°C, prefiere temperaturas frescas para formar una cabeza más compacta; la mínima es de 12°C, bajo esta temperatura la planta no crece; y la máxima entre 18 y 24°C, temperaturas superiores producen deterioro de la lechuga por crear cabezas más sueltas y con tendencia a emisión de tallo floral o “subida”. Sin embargo, estas temperaturas son generales, cada tipo de lechuga, e inclusive variedad, tiene requerimientos propios de temperatura para su crecimiento.

Algunas de las variedades más cultivadas son como las siguientes.

2.1.5 Lechuga Vulcan var. Vulcan



Figura 2.7 Lechuga Vulcan var. Vulcan

Lechuga Vulcan var. Vulcan (de hojas crespas o rizadas). Poseen tintes rojizos, debido al contenido de antocianinas de sus hojas, estas son muy onduladas, tiernas y de gran sabor. Da color a las ensaladas y son muy llamativas a la vista del consumidor.

Son de Color rojo brillante sobre fondo verde pálido. Planta grande y vigorosa, ofrece mejor color que otras variedades de tipo de hojas rojas.

Se siembra en almacigo y se trasplanta de manera Indirecta al lugar donde se cultiva.

2.1.6 Lechuga Orejona var. Parris Island



Figura 2.8 Lechuga Orejona var. Parris Island

También conocida como lechuga romana, es sin duda, uno de los vegetales más amigables debido a su fresco sabor, facilidad para combinar con toda clase de verduras y su fácil acomodo con distintos sabores.

Características: Hojas muy largas, de color verde oscuro, con la superficie un poco rugosa y el nervio central muy pronunciado. Textura crujiente. Forma cogollos largos, de buen tamaño.

2.1.7 Lechuga Italiana Var. Tropicana

Utilizada para dar un toque original a tus ensaladas y platillos. Es una lechuga en forma de cono, que posee hojas rizadas, robustas y alargadas, las cuales se unen libremente en un tallo. Es una lechuga muy atractiva gracias a su forma y color característicos.

Características: ofrece una textura crujiente y un sabor intenso. Es uniforme y tiene amplia adaptación de climas, constantemente produce plantas pesadas con hojas de color verde medio obscuro y márgenes rizados, sus costillas son blandas y ayudan a minimizar el daño causado por el manejo de cosecha, de esta manera ayudan a mejorar la calidad; tienen buena tolerancia a Tip-burn (enfermedad común en lechugas) y a floración, no es recomendable para etapas de calor extremo.

Tipo de siembra recomendada: directa/indirecta.



Figura 2.9 Lechuga Italiana var. Tropicana

2.1.8 Fresa

Clima:

La fresa es un cultivo que se adapta muy bien a muchos tipos de climas. Su parte vegetativa es altamente resistente a heladas, llegando a soportar temperaturas de hasta -20°C , aunque los órganos florales quedan destruidos con valores algo inferiores a 0°C . Al mismo tiempo son capaces de sobrevivir a temperaturas estivales de 55°C . Los valores óptimos para fructificación adecuado se sitúan en torno a los $15-20^{\circ}\text{C}$ de media anual. Temperaturas por debajo de 12°C durante el cuajado dan lugar a frutos deformados por frío, en tanto que un tiempo muy caluroso puede originar una maduración y coloración del fruto muy rápida, lo cual le impide adquirir un tamaño adecuado para su comercialización. La pluviometría mínima requerida en secano se sitúa en torno a los 600 mm, en regadío es necesario aportar en nuestras latitudes del orden de 2,000 mm durante el ciclo del cultivo otoñal.

Suelo:

La influencia del suelo, su estructura física y contenido químico es una de las bases para el desarrollo del fresón. Éste prefiere suelos equilibrados, ricos en materia orgánica, aireados, bien drenados, pero con cierta capacidad de retención de agua. El equilibrio químico de los elementos nutritivos se considera más favorable que una riqueza elevada de los mismos. Niveles bajos

de patógenos son igualmente indispensables para el cultivo. La granulometría óptima de un suelo para el cultivo del fresón aproximadamente es: -50% de arena -20% de arcilla -15% de calizas -5% de materia orgánica

En definitiva, un suelo catalogado como arenoso o franco-arenoso y homogéneamente profundo se acercaría al ideal para nuestro cultivo. En cuanto a las características físico-químicas que debe reunir el suelo de un fresal se tiene: pH: la fresa soporta bien valores entre 6 y 7. Situándose el óptimo en torno a 6.5 e incluso menor. Materia orgánica: serían deseables niveles del 2 al 3%.



Figura 2.10 Fresa

2.1.9 Ensaladas

- **ESPINACA**



Figura 2.11 **Espinaca**

Esta variedad de espinacas verde oscuro ha destacado en muchas regiones, incluido el Norte. Es lento para atornillar y adecuado para la siembra de primavera, verano y otoño. Las plantas completas y verticales producen altos rendimientos de hojas grandes y triangulares que son ricas en la luteína fitonutriente. Tanto heladas como tolerantes al calor.

Requisitos de luz: pleno sol es ideal, pero las plantas rinden en sombra parcial. Proteja las plantas del fuerte sol de la tarde en las regiones más cálidas.

Plantación: Separe de 8 a 12 pulgadas, dependiendo del tipo. (Lea la etiqueta adhesiva que viene con la planta para obtener recomendaciones específicas de espaciado).

Requisitos del suelo: estos verdes necesitan un suelo bien drenado y rico en nutrientes. Modifique el suelo con compost, harina de sangre u otra materia orgánica antes de plantar. El suelo fértil ayuda a alimentar el desarrollo rápido y tierno de las hojas. El pH del suelo debe ser de 6.5 a 7.

Requisitos de agua: Mantenga el suelo constantemente húmedo durante la temporada de crecimiento. El suelo uniformemente húmedo es la clave del sabor tierno. Acolche el suelo para reducir la evaporación del agua y mantenga las hojas limpias de salpicaduras de suelo.



Plan de lucha contra las heladas: si bien las plantas establecidas toleran temperaturas tan bajas como las de los adolescentes hasta los 20 grados, es una buena idea proteger las plántulas recién plantadas de las heladas de finales de primavera o principios de otoño cubriendo las plantas con una manta de escarcha.

Problemas comunes: los escarabajos de las pulgas, los ácaros, las babosas y los pulgones son plagas a tener en cuenta. Las dos enfermedades más comunes son el mildiu (que puede aparecer durante el clima frío y húmedo) y la roya blanca (que causa manchas blancas en las hojas). Una vez que se forman las flores, el sabor de las hojas se vuelve amargo, por lo tanto, coseche inmediatamente.

Cosecha: coseche las hojas tan pronto como sean lo suficientemente grandes como para comer. Elija las hojas externas primero y permita que las hojas centrales se agranden para extender la cosecha.

Almacenamiento: Refrigere las hojas sin lavar en una bolsa de plástico seca en la gaveta hasta por 5 días.

- **KALE**

Esta bonita col rizada híbrida azul-verde es fácil de cultivar y te mantendrá abastecido durante meses. Productor vigoroso, con hojas que crecen exuberantemente en plantas compactas. Corte las hojas externas para que el centro pueda seguir creciendo. Una ligera helada hace que las hojas tengan un sabor más dulce.





Figura 2.12 Kale

Requisitos de luz: pleno sol es ideal, pero las plantas rinden en sombra parcial. Proteja las plantas del fuerte sol de la tarde en las regiones más cálidas.

Plantación: Separe de 12 a 24 pulgadas, dependiendo del tipo. (Lea la etiqueta adhesiva que viene con la planta para obtener recomendaciones específicas de espaciado).

Requisitos del suelo: estos verdes necesitan un suelo húmedo y rico en nutrientes. Modifique el suelo con 4 a 6 pulgadas de composta u otra materia orgánica antes de plantar. El pH del suelo debe ser de 6.5 a 6.8.

Requisitos de agua: Mantenga el suelo constantemente húmedo durante la temporada de crecimiento. Apunte de 1 a 1.5 pulgadas de agua por semana a través de la lluvia o el riego. Acolche el suelo para reducir la evaporación del agua y mantenga las hojas limpias de salpicaduras de suelo.

Plan de lucha contra las heladas: las plantas establecidas toleran las heladas duras (temperaturas inferiores a -2.22° C) y producen nuevas hojas durante todo el invierno en las zonas 7 a 10. Las hojas heladas tienen un sabor más dulce. Proteja las plántulas recién plantadas de las heladas de finales de primavera o principios de otoño cubriendo las plantas con una manta de escarcha.

Problemas comunes: Tenga cuidado con los gusanos de la col, los insectos arlequín, las babosas, los saltamontes y los



pulgones de la col. La col rizada es un cultivo de col, por lo que clubroot puede atacar a las plantas. Kale puede tardar en despegar en el jardín. Las plantaciones de primavera pueden persistir hasta que el suelo se caliente; los cultivos de otoño pueden estancarse un poco con el aire caliente.

Cosecha: Cosecha las hojas cuando miden hasta 10 pulgadas de largo. Las hojas más jóvenes y cortas tienen el sabor más suave. Elija las hojas inferiores primero, y la planta continuará produciendo nuevas hojas superiores.

Almacenamiento: Refrigere las hojas sin lavar en una toalla de papel ligeramente húmeda, metida en una bolsa de plástico muy flojamente cerrada y almacene hasta 5 días.

2.1.10 Aromáticas

Orégano picante y caliente

El orégano picante y caliente combina los rasgos de orégano de fácil crecimiento con el calor de un chile picante suave. Las hojas sabrosas son una gran adición a los platos mexicanos. Las plantas forman un montículo bien redondeado con múltiples tallos finales. Las hojas cuentan con un sabor tradicional de orégano, pero con mayor picante. Las plantas prosperan en cualquier suelo que esté bien drenado, siempre que no esté constantemente húmedo. En zonas más frías, las plantas mueren en el suelo en invierno y brotan en primavera. Coseche las hojas con frecuencia y utilícelas frescas o secas. Las plantas abren pequeñas flores rosadas a fines del verano que son las favoritas entre las abejas y las mariposas.





Figura 2.13 Orégano

Requisitos de luz: pleno sol a sombra parcial. Las plantas se benefician de la sombra de la tarde en las zonas más cálidas.

Plantación: espacio de 12 a 36 pulgadas de distancia. (Lea la etiqueta adhesiva que viene con la planta para obtener recomendaciones específicas de espaciado).

Requisitos del suelo: las plantas crecen mejor en suelos bien drenados, pero también pueden adaptarse a otros tipos de suelos.

Requisitos de agua: mantenga el suelo húmedo después de plantar hasta que las plantas estén bien enraizadas. Una vez establecidas, las plantas en los lechos pueden sobrevivir con la lluvia. En contenedores, riegue siempre que el suelo esté seco.

Plan de lucha contra las heladas: el orégano es perenne en las zonas 5 a 10. Las plantas establecidas pueden sobrevivir a unas pocas heladas duras (menos de 28° F). Use una manta de escarcha para proteger las plántulas recién plantadas de las heladas de finales de primavera o prolongar la temporada de crecimiento.

Problemas comunes: pudrición de la raíz en suelos mal drenados, así como con los pulgones y los ácaros. Las raíces de orégano a lo largo de los tallos, lo que significa que pueden extenderse fácilmente más de lo que pretendía en el jardín.

Cosecha: Recoja las hojas en cualquier momento de la temporada de crecimiento, aunque el sabor es más intenso justo antes de que las plantas florezcan. Recorte tallos frondosos a la longitud que desee. No corte al ras con tierra; permita que queden una pulgada o dos de tallo. Los tallos producirán un nuevo crecimiento a partir de la base de las hojas restantes.

Almacenamiento: Mantenga los tallos de orégano en agua a temperatura ambiente para disfrutar de recortes frescos durante unos días. Para almacenar en su refrigerador, envuelva los tallos sin lavar en una toalla de papel apenas húmeda en una bolsa de plástico flojamente cerrada. Usar dentro de 7 a 10 días. Para un almacenamiento más prolongado (y un sabor más fuerte), seque las hojas.

2.1.11 Albahaca



Figura 1 Albahaca



También conocida como tulsí, la albahaca es un gran vegetal de hojas verdes con tallos púrpuras. Es una excelente planta en una maceta, requiere temperaturas cálidas, se usa en la pizza, espagueti, ensaladas, cocteles, etc.

Tipo: es anual.

Trasplante: después de la primavera.

Tipo de suelo: necesita fertilización, suelos bien drenados y húmedos. Requiere un pH de 6.0 a 7.0. Materia orgánica antes de plantar y fertilizar.

Luz: fotoperiodo largo, pero pueden crecer en malla sombra.

Espaciamiento: cada 20 cm.

Altura: hasta 30 cm.

Requerimientos hídricos: Mantener el suelo siempre húmedo sobre todo en las estaciones de crecimiento. Adicionar capas de acolchado para evitar la evaporación desde el suelo.

Luz y situación. - Prefiere el sol, aunque tolera la sombra. Es una planta amante de climas templados o cálidos. No soporta las heladas, por lo que es mejor plantarla en lugares con inviernos suaves.

Plan de lucha contra las heladas: la albahaca es muy sensible a las heladas y está dañada por temperaturas inferiores a 4.4° C. Use una manta de escarcha para proteger las plántulas recién plantadas de las heladas de fines de primavera o prolongar la temporada de crecimiento de otoño.

Problemas comunes: pellizque los capullos de las flores para evitar que las plantas salgan disparadas. Una vez que se forman las flores, el sabor de las hojas cambia. Plagas a tener en cuenta: pulgones, babosas, escarabajos japoneses y tijeretas. Las enfermedades fúngicas a veces ocurren en climas húmedos, y la pudrición de la raíz es común en suelos mal drenados.

Consejos de cultivo: pellizque o ponde las plantas de albahaca a medida que crecen para promover la ramificación





y la maleza. Nunca corte las partes leñosas de un tallo; las plantas no vuelven a brotar.

Cosecha: Recoja las hojas en cualquier momento de la temporada de crecimiento. Elija hojas individuales o corte tallos de hojas a la longitud que desee.

Almacenamiento: Corte los tallos de albahaca y colóquelos en agua como un ramo fresco. Durarán semanas, siempre que elimine las hojas debajo de la línea de flotación y cambie el agua regularmente. Nunca coloque albahaca en el refrigerador; El aire frío daña las hojas. Preserve la albahaca congelando o en vinagres de hierbas.

2.1.12 Cilantro

Sabor aromático, característico de la salsa que se sirve en los restaurantes mexicanos. Las hojas tienen una fragancia reconocible al instante que llena una habitación cuando las cortas. A veces llamado perejil chino, su aroma y sabor distintivos también es parte de los alimentos caribeños y asiáticos, que le dan sabor a recaito, salsas, curry, ensaladas, salsas picantes, mantecas de hierbas y adobos de carne. El cilantro parece perejil italiano de hoja plana, pero las hojas son más delgadas.

Crece en una roseta de hojas de tallo que están listas para la cosecha poco después de la siembra. Las hojas jóvenes tienen el mejor sabor, así que asegúrese de cosechar con frecuencia. Es una anual de rápido crecimiento, excepto en climas más suaves donde pasará el invierno. El cilantro crece alto y florece al final de su vida, generalmente después de que hace calor. Después de que florece, cosecha las semillas, que son lo que compras en frascos de especias como cilantro, otro ingrediente común en la cocina asiática. Puedes moler las semillas o usarlas enteras. Algunos jardineros también dejan caer las semillas para hacer nuevas plantas. El otoño es un buen momento para cultivar cilantro en climas templados, ya que las plantas son tolerantes





a las heladas y les encanta el clima fresco en otoño, invierno y principios de primavera.



Figura 2.14 **Cilantro**



3 COMPONENTES DE UN BIOSISTEMA VERTICAL HIDROPÓNICO

3.1 Sistema de soporte en sistemas verticales

La idea de un sistema vertical, es precisamente aprovechar las estructuras, edificio, paredes y demás construcciones para la colocación de las plantas. Aun cuando la pared sea la opción más económica para la construcción de un sistema vertical, puede ser por preferencia o necesidad, que se alternen otras formas de soporte de fierro o cancelería, o simplemente los sistemas de conducción de la solución nutritiva.

La hidroponía es parte de los sistemas de producción llamados *Cultivos sin Suelo*. En estos sistemas el medio de crecimiento y/o soporte de la planta está constituido por sustancias de diverso origen, orgánico o inorgánico, inertes o no inertes es decir con tasa variable de aportes a la nutrición mineral de las plantas.

3.2 Medio de cultivo para sistemas urbanos

Se refiere al espacio donde se contiene las raíces, originalmente se trataba del suelo natural donde la planta hacia su anclaje con las raíces para sostenerse y permanecer erguida; con el tiempo y en parte por necesidad y parte por conveniencia





tecnológica, se desarrollaron diversas formas de contener las raíces, desde sustratos hasta totalmente en una solución acuosa, o suspendida en el aire e irrigada frecuentemente.

Entre los sustratos existen sustancias como perlita, vermiculita o lana de roca, materiales que son consideradas propiamente inertes y donde la nutrición de la planta es estrictamente externa, a medios orgánicos realizados con mezclas que incluyen turbas o materiales orgánicos como corteza de árboles picada, cáscara de arroz etc. que interfieren en la nutrición mineral de las plantas. Seguidamente se presenta una lista de materiales que pueden ser empleados como sustratos (Burés, 1997).

El mejor medio de cultivo depende de numerosos factores como son el tipo de material vegetal con el que se trabaja (semillas, plantas, estacas, etc.), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego y fertilización, aspectos económicos, etc.

Para obtener buenos resultados durante la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requiere que el sustrato contenga ciertas características tales como:

a) características físicas

- Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible.
- Suficiente suministro de aire.
- Distribución del tamaño de las partículas que mantenga las condiciones anteriores.
- Baja densidad aparente.
- Elevada porosidad.
- Estructura estable, que impida la contracción (o hinchazón del medio).

b) características químicas

Baja o apreciable capacidad de intercambio catiónico, dependiendo de que la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente, respectivamente.





- Suficiente nivel de nutrientes asimilables.
- Baja salinidad.
- Elevada capacidad tampón y capacidad para mantener constante el pH.
- Mínima velocidad de descomposición.

c) Otras propiedades

- Libre de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos y sustancias fitotóxicas.
- Reproductividad y disponibilidad.
- Bajo coste.
- Fácil de mezclar.
- Fácil de desinfectar y estabilidad frente a la desinfección.
- Resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales.

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación, etc. De acuerdo con sus propiedades se espera que un sustrato sea:

- Sustratos químicamente inertes. Arena granítica o silícea, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expandida, lana de roca, etc.
- Sustratos químicamente activos. Turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales ligno-celulósicos, etc.

Las diferencias entre ambos vienen determinadas por la capacidad de intercambio catiónico o la capacidad de almacenamiento de nutrientes por parte del sustrato. Los sustratos químicamente inertes actúan como soporte de la planta, no interviniendo en el proceso de adsorción y fijación de los nutrientes, por lo que han de ser suministrados mediante la solución fertilizante. Los



sustratos químicamente activos sirven de soporte a la planta pero a su vez actúan como depósito de reserva de los nutrientes aportados mediante la fertilización. Almacenándolos o cediéndolos según las exigencias del vegetal (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

3.2.1 Sustratos naturales

A) Agua

Es común su empleo como portador de nutrientes, aunque también se puede emplear como sustrato.

B) Gravas

Suelen utilizarse las que poseen un diámetro entre 5 y 15 mm. Destacan las gravas de cuarzo, la piedra pómez y las que contienen menos de un 10% en carbonato cálcico. Su densidad aparente es de 1,500-1,800 kg/m³. Poseen una buena estabilidad estructural, su capacidad de retención del agua es baja si bien su porosidad es elevada (más del 40% del volumen). Su uso como sustrato puede durar varios años. Algunos tipos de gravas, como las de piedra pómez o de arena de río, deben lavarse antes de utilizarse. Existen algunas gravas sintéticas, como la vermiculita, obtenida por tratamiento térmico de pizarras (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

C) Arenas

Las que proporcionan los mejores resultados son las arenas de río. Su granulometría más adecuada oscila entre 0.5 y 2 mm de diámetro. Su densidad aparente es similar a la grava. Su capacidad de retención del agua es media (20% del peso y más del 35% del volumen); su capacidad de aireación disminuye con el tiempo a causa de la compactación; su capacidad de intercambio catiónico es nula. Es relativamente frecuente que su contenido en caliza alcance el 8-10%. Algunos tipos de arena deben lavarse previamente. Su pH varía entre 4 y 8. Su durabilidad es elevada.



Es bastante frecuente su mezcla con turba, como sustrato de enraizamiento y de cultivo en contenedores (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

D) Tierra Volcánica

Son materiales de origen volcánico que se utilizan sin someterlos a ningún tipo de tratamiento, proceso o manipulación. Están compuestos de sílice, alúmina y óxidos de hierro. También contiene calcio, magnesio, fósforo y algunos oligoelementos. Las granulometrías son muy variables al igual que sus propiedades físicas. El pH de las tierras volcánicas es ligeramente ácido con tendencias a la neutralidad. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es tan baja que debe considerarse como nulo. Destaca su buena aireación, la inercia química y la estabilidad de su estructura. Tiene una baja capacidad de retención de agua, el material es poco homogéneo y de difícil manejo (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

E) Turbas

Las turbas son materiales de origen vegetal, de propiedades físicas y químicas variables en función de su origen. Se pueden clasificar en dos grupos: turbas rubias y negras. Las turbas rubias tienen un mayor contenido en materia orgánica y están menos descompuestas, las turbas negras están más mineralizadas teniendo un menor contenido en materia orgánica (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

Es más frecuente el uso de turbas rubias en cultivo sin suelo, debido a que las negras tienen una aireación deficiente y unos contenidos elevados en sales solubles. Las turbias rubias tiene un buen nivel de retención de agua y de aireación, pero muy variable en cuanto a su composición ya que depende de su origen. La inestabilidad de su estructura y su alta capacidad de intercambio catiónico interfiere en la nutrición vegetal, presentan un pH que oscila entre 3.5 y 8.5. Se emplea en la



producción ornamental y de plántulas hortícolas en semilleros (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

Tabla 3.1 Propiedades de la turba (Fernández et al., 1998)

Propiedades	Turbas rubias	Turbas negras
Densidad aparente (gr/cm ³)	0.06 - 0,1	0.3 - 0.5
Densidad real (gr/cm ³)	1.35	1.65 - 1.85
Espacio poroso (%)	94 o más	80 - 84
Capacidad de absorción de agua (gr/100 gr m.s.)	1.049	287
Aire (% volumen)	29	7.6
Agua fácilmente disponible (% volumen)	33.5	24
Agua de reserva (% volumen)	6.5	4.7
Agua difícilmente disponible (% volumen)	25.3	47.7
CIC (meq/100 gr)	110 - 130	250 o más

F) Corteza de Pino

Se pueden emplear cortezas de diversas especies vegetales, aunque la más empleada es la de pino, que procede básicamente de la industria maderera. Al ser un material de origen natural posee una gran variabilidad. Las cortezas se emplean en estado fresco (material crudo) o comportadas. Las cortezas crudas pueden provocar problemas de deficiencia de nitrógeno y de citotoxicidad. Las propiedades físicas dependen del tamaño de sus partículas, y se recomienda que el 20-40% de dichas partículas sean con un tamaño inferior a los 0.8 mm. Es un sustrato ligero, con una densidad aparente de 0.1 a 0.45 g/cm³. La porosidad total es superior al 80-85%, la capacidad de retención de agua es de baja a media, siendo su capacidad de aireación muy elevada. El pH varía de medianamente ácido a neutro. La CIC es de 55 meq/100 g (infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

G) Fibra de Coco

Este producto se obtiene de fibras de coco. Tiene una capacidad de retención de agua de hasta 3 o 4 veces su peso, un pH ligeramente ácido (6.3-6.5) y una densidad aparente de 200 kg/m³. Su porosidad es bastante buena y debe ser lavada antes de su uso debido al alto contenido de sales que posee.

3.2.2 Sustratos artificiales

A) Lana de roca

Es un material obtenido a partir de la fundición industrial a más de 1,600°C de una mezcla de rocas basálticas, calcáreas y carbón de coke. Finalmente al producto obtenido se le da una estructura fibrosa, se prensa, endurece y se corta en la forma deseada. En su composición química entran componentes como sílice y óxidos de aluminio, calcio, magnesio, hierro, etc.

Es considerado como un sustrato inerte, con una CIC casi nula y un pH ligeramente alcalino, fácil de controlar. Tiene una estructura homogénea, un buen equilibrio entre agua y aire, pero presenta una degradación de su estructura, lo que condiciona que su empleo no sobrepase los 3 años.

Es un material con una gran porosidad y que retiene mucha agua, pero muy débilmente, lo que condiciona una disposición muy horizontal de las tablas para que el agua se distribuya uniformemente por todo el sustrato (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

Tabla 3.2 Propiedades de la lana de roca (Fernández et al., 1998)

Propiedades de la lana de roca (Fernández et al. 1998)	
Densidad aparente (gr/cm ³)	0.09
Espacio poroso (%)	96.7
Material sólido (% volumen)	3.3
Aire (% volumen)	14.9
Agua fácilmente disponible + agua de reserva (% volumen)	77.8
Agua difícilmente disponible (% volumen)	4

B) Perlita

Material obtenido como consecuencia de un tratamiento térmico a unos 1,000-1,200°C de una roca silíceo volcánica del grupo de las riolitas. Se presenta en partículas blancas cuyas dimensiones varían entre 1.5 y 6 mm, con una densidad baja, en general inferior a los 100 kg/m³. Posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad; su CIC es prácticamente nula (1.5-2.5 meq/100 g); su durabilidad está limitada al tipo de cultivo, pudiendo llegar a los 5-6 años. Su pH está cercano a la neutralidad (7-7.5) y se utiliza a veces, mezclada con otros sustratos como turba, arena, etc. (infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

Tabla 3.3 Propiedades físicas/tamaño de las partículas, mm de diámetro (Fernández et al., 1998)

Propiedades físicas	Propiedades de la perlita		
	Tamaño de las partículas (mm de diámetro)		
	0-15 (Tipo B-6)	0-5 (Tipo B-12)	3-5 (Tipo A-13)
Densidad aparente (Kg/m ³)	50-60	105-125	100-120
Espacio poroso (%)	97.8	94	94.7
Material sólido (% volumen)	2.2	6	5.3
Aire (% volumen)	24.4	37.2	65.7
Agua fácilmente disponible (% volumen)	37.6	24.6	6.9
Agua de reserva (% volumen)	8.5	6.7	2.7
Agua difícilmente disponible (% volumen)	27.3	25.5	19.4

C) Vermiculita

Se obtiene por la exfoliación de un tipo de micas sometido a temperaturas superiores a los 800°C. Su densidad aparente es de 90 a 140 kg/m³, presentándose en escamas de 5-10 mm. Puede retener 350 litros de agua por metro cúbico y posee buena capacidad de aireación, aunque con el tiempo tiende a compactarse. Posee una elevada CIC (80-120 meq/l). Puede contener hasta un 8% de potasio asimilable y hasta un 12% de magnesio asimilable. Su pH es próximo a la neutralidad (7-7.2) (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

D) Arcilla Expandida



Se obtiene tras el tratamiento de módulos arcillosos a más de 100°C, formándose como unas bolas de corteza dura y un diámetro, comprendido entre 2 y 10 mm. La densidad aparente es de 400 kg/m³ y posee una baja capacidad de retención de agua y una buena capacidad de aireación. Su CIC es prácticamente nula (2-5 meq/l). Su pH está comprendido entre 5 y 7. Con relativa frecuencia se mezcla con turba, para la elaboración de sustratos (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

E) Poliestireno Expandido

Es un plástico troceado en flóculos de 4-12 mm, de color blanco. Su densidad es muy baja, inferior a 50 Kg/m³. Posee poca capacidad de retención de agua y una buena posibilidad de aireación. Su pH es ligeramente superior a 6. Suele utilizarse mezclado con otros sustratos como la turba, para mejorar la capacidad de aireación (infoagro/industria-auxiliar/sustrato).

3.2.3 Riego y solución nutritiva

El riego es la parte fundamental para mantener un cultivo; se reconocen tres tipos de fertilización para las plantas, hídrica, gaseosa y mineral. El agua es el primer fertilizante que las plantas requieren para su desarrollo, el dióxido de carbono es el elemento base para activar la fotosíntesis, y si se pretende lograr máximos rendimientos, la fertilización mineral será la responsable de eso.

El sistema de riego, consiste en una serie de tuberías para conducir el agua. En términos tradicionales un sistema de riego debe contemplar, la fuente, el sistema de bombeo, el sistema de filtrado, el sistema de conducción, el sistema de seguridad y los emisores. En sistemas urbanos y en especial en sistemas verticales, quizá algunos de estos componentes pueden obviarse, como podría ser el sistema de filtrado y el emisor que puede ser directamente la tubería de conducción

Independientemente del tipo de sustrato que se haya seleccionado, es necesario alimentar a las plantas. Existe en el mercado una gran diversidad de fuentes de nutrición para las plantas, en





forma de fertilizantes. En sistemas verticales, y en general agricultura urbana se ha extendido el aporte de la fertilización mineral en el riego. Por lo que se han desarrollado técnicas para cubrir ambos procesos -riego y nutrición- al mismo tiempo, como los que se mencionan en el 3.3.1 y subsecuentes.

3.2.4 Hidroponía

La hidroponía es una técnica de cultivo sin suelo, que consiste en mantener las raíces de las plantas siempre en contacto con el agua. Lo novedoso de la técnica es que el agua contiene los minerales necesarios para que la planta además de estar hidratado y mantenerse turgente, está absorbiendo iones que permiten el desarrollo potencial de la planta, incrementando el valor de las cosechas (Figura 3.1).



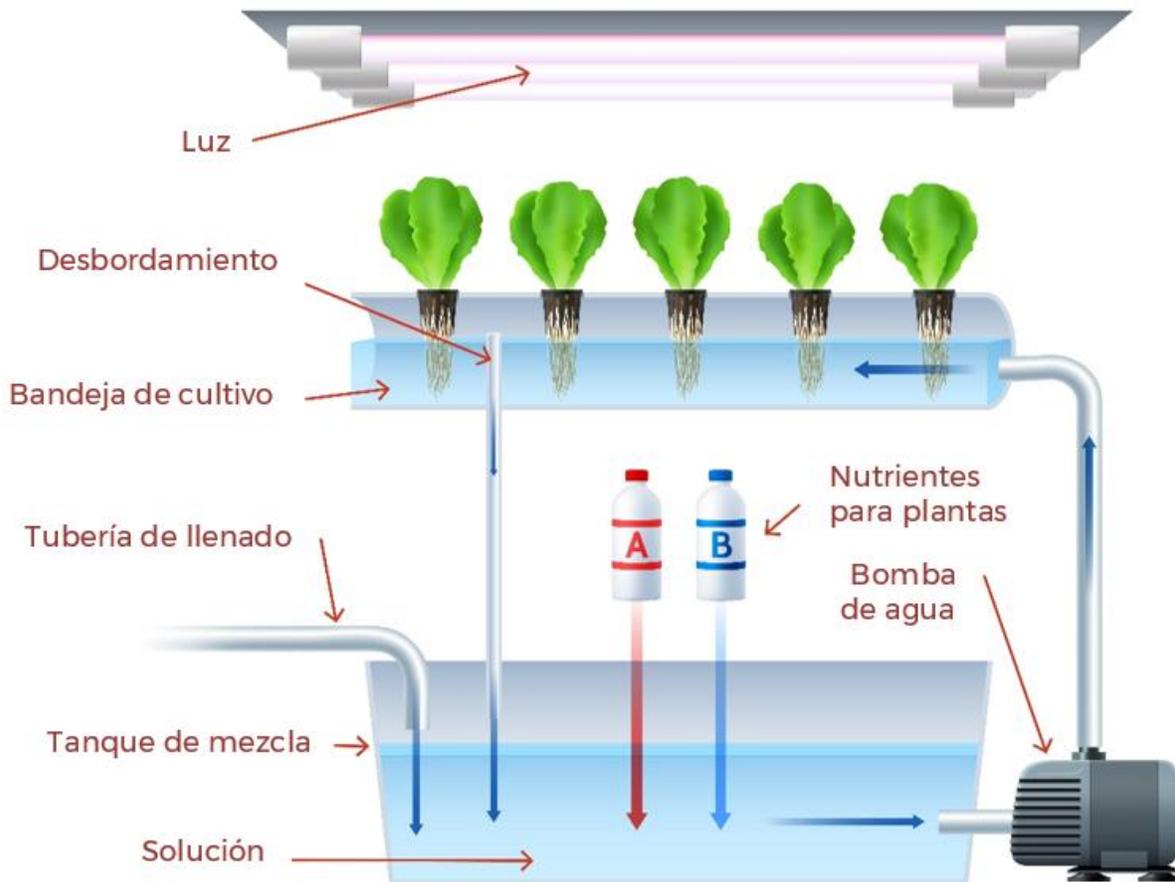


Figura 3.1 Componentes de un sistema urbano hidropónico

3.2.5 Cultivos en estructuras modulares con sustrato

Se han desarrollado también dispositivos capaces de contener sustratos, y en ellos brindar el soporte a la planta. En este tipo de sistemas será necesario el diseño del riego y la programación del mismo, el cual depende de los requerimientos de la planta y características del sustrato.



Figura 3.2 Membranas portantes

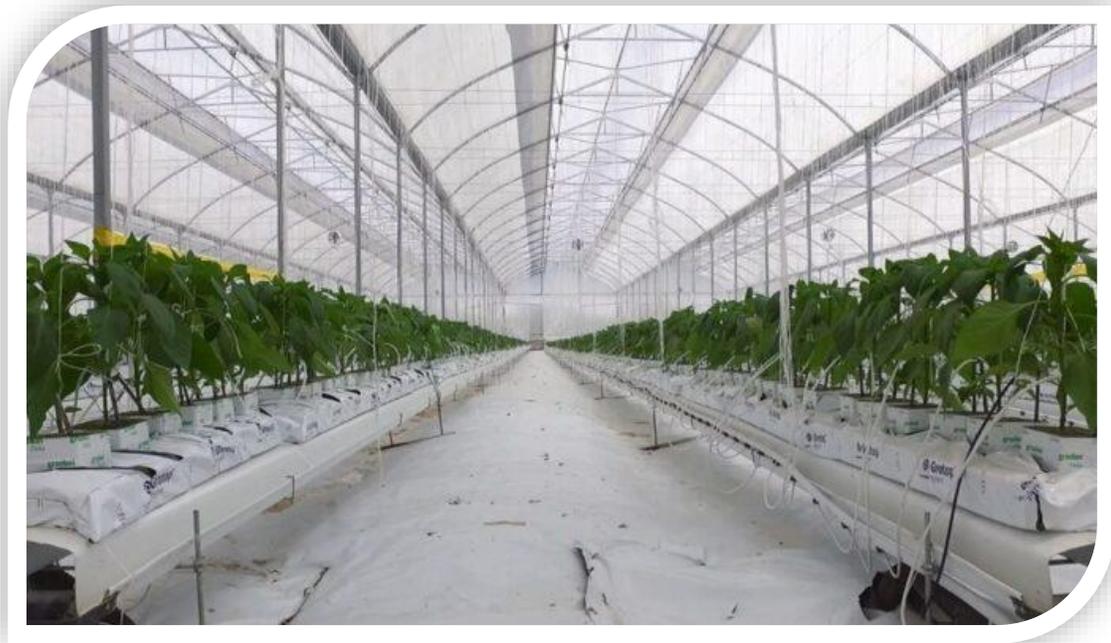
3.2.6 Cultivos verticales en sustratos

Cuando se habla del soporte, este puede ser el mismo sistema de conducción del agua, o en su caso, este sistema de tuberías puede contener un tipo de sustrato; este hecho elimina la posibilidad de ser hidropónico, pero puede resultar ventajoso en el manejo del mismo. Un sistema hidropónico en solución nutritiva, exige una constante recirculación y que la raíz siempre o la mayor parte del día/noche este en contacto con la raíz. Cuando se utiliza un sustrato, en función de las características de este, se pueden programar una serie de riegos durante el día, y en ese mismo riego se aportan los nutrientes.

Cuando se habla del sustrato, el cual puede ser natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, debe ser colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, con ello se ancla el sistema radicular de la planta, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta.

El sustrato puede intervenir o no en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta (Infoagro/industria-auxiliar/sustrato, 2019), pero si será importante conocer a capacidad de retención de agua y las características de drenaje de los sustratos varían. La lana de roca de alta calidad, cuando se deja drenar por efecto de la gravedad contendrá 80% de

solución, 15% de porosidad de aire y 5% de fibras de lana de roca. Esta proporción de solución y aire promueve el crecimiento vigoroso de la raíz. Las plantas que crecen en lana de roca tienden a reducir la solución y a aumentar la proporción de espacio de poros de aire disponible para la solución. Por lo tanto, si se desea una mayor proporción de aire en la zona de la raíz, el aumento del tiempo entre riego aumentará el porcentaje de aire.

**Figura 3.3****Lana de roca**



4 IMPLEMENTACIÓN DEL BIOSISTEMA GRANJA VERTICAL EN HIDROPONÍA

4.1 Vertical farm o granja vertical

La agricultura urbana será fundamental para la seguridad alimentaria y la preservación del medio ambiente, nuevas técnicas de cultivo urbano siguen surgiendo y modificándose para hacer de estas la opción más acertada a la hora de producir hortalizas en las ciudades, una de estas es el cultivo vertical de hortalizas, maximizando el área de producción y aprovechando de una manera más eficiente el espacio disponible, esta forma de cultivo ha llevado crear grandes estructuras similares a edificios donde se cultivaría una gran diversidad de alimentos.

Existen muchos proyectos de agricultura urbana vertical en todo el mundo, los cuales utilizan distintas formas de cultivo, desde el cultivo tradicional en tierra hasta distintas técnicas hidropónicas, aeropónica, acuapónicas o una combinación de todas estas, para hacer más eficiente el sistema. Además, también estos proyectos incluyen la producción de hongos/setas, aves de corral, peces o pequeños mamíferos, que las convierte en verdaderas granjas verticales. Todo esto lograría una producción agrícola sostenible, económica y controlada durante todo el año.





Entre los beneficios de esta técnica y que cobra mayor relevancia con la degradación del medio ambiente es el aumento de las áreas verdes de la ciudad y uno de los mayores beneficios al evitar la contaminación es que se considera un drenaje urbano sostenible. Favorece la estabilidad térmica, y aplicando técnicas de producción optimiza el uso de recursos en zonas urbanas, desde el espacio, agua, energía, etc.

En términos ambientales:

- Retienen el agua de lluvia.
- Permiten aprovechar residuos orgánicos.
- Absorben el ruido.
- Aumenta el área verde de la ciudad.
- Captura carbono durante el día.
- Mitigan el efecto Isla de calor.

4.1.1 Implementación de una granja vertical

Las experiencias en biosistemas urbanos, como jardines verticales, techos verdes, o granjas verticales reconocen tres tipos de componentes, independientemente de la tecnología empleada:

Componentes activos

Son aquellos que están expuestos a un cambio constante físico químico para cumplir sus funciones durante la vida útil del sistema. Los componentes activos son elementos biológicos o elementos que soportan la vida en el sistema: cobertura vegetal y medio de crecimiento (Issuu/guía, techos-techos verdes/jardines verticales).

Componentes estables





Componentes inertes del jardín vertical que debe mantener estabilidad química y física para cumplir sus funciones durante la vida útil del sistema. Son aquellos elementos fabricados que cumplen determinadas funciones en el sistema: Membranas de impermeabilización, barreras anti-raíces, barreras filtrantes, medios de drenaje, elementos del sistema de irrigación etc. La durabilidad de los componentes estables depende de la capacidad de los mismos para resistir con éxito a las condiciones ambientales, la humedad y los agentes orgánicos tales como microorganismos y hongos (Issuu/guía, techos-techos verdes/jardines verticales).

Componentes auxiliares

Elementos inertes estables que cumplen funciones específicas para adaptar correctamente una sección típica de sistema de jardín vertical a la estructura de un inmueble, tales como: Separación, Confinamiento, Protección, Evacuación de agua, Riego, Iluminación etc. (Issuu/guía, techos-techos verdes/jardines verticales).

4.1.2 Planteamiento y diseño de la granja vertical

Para que un sistema vertical sea funcional, debería contar con factores como:

- 1) **Estanqueidad**, que pueda contener los elementos vivos y el medio donde estos se desarrollan, como suelo o solución nutritiva, las plantas, sustrato, etc.
- 2) **Drenaje**, debe ser flexible en la captación de los excesos del riego principalmente y de la lluvia en algunos casos.
- 3) **Capacidad de retención de agua**, dependiendo el tipo de medio de cultivo, si fuera hidroponía, es conveniente que exista un flujo constante de agua. Si es sustrato, este debe evitar estrés hídrico en la planta.





- 4) **Consistencia.** Debe mantener la forma en las horas de máxima incidencia solar, y ser capaz de mantenerse funcional en el tiempo.
- 5) **Nutrición.** Las plantas son organismos vivos, los cuales necesitan estar alimentados permanentemente.
- 6) **Filtración.** Con el fin de evitar taponamiento en los conductos.

En este sentido se diseña una estructura piloto, en el cual se pueda llevar a cabo valorar factores de interés en la implementación de este tipo de sistemas en zonas urbanas. Con la implantación y operación del sistema integrado y los subsistemas, poder establecer las escalas de aplicación del mismo.

4.2 Elaboración de la granja vertical

Se plantea un sistema vertical el cual incluya distintos tipos de producción, bajo dos esquemas básicos; hidroponía y sustrato. En cuanto a cultivos en solución, se plantean tres esquemas. Un sistema horizontal que llamaremos, "tees", un sistema vertical que llamaremos "yees" y un sistema de raíz flotante, que llamaremos en balsa.

En cuanto a los sistemas con sustrato, se presentan dos variantes uno que llamaremos en torres y uno en sistema modular, con una estructura que contiene las geos membranas para contener, sustrato, plantas, riego etc. La construcción se describe a continuación

4.2.1 Inicio

Para simular las paredes de un edificio o casa cualquiera (urbano o rural), se construye una estructura de acero que hará las veces de la pared.



4.2.2 Estructura vertical portadora



Figura 4.1 Construcción de la estructura metálica

En la estructura de acero, se colocan los diferentes sistemas de cultivo vertical, el primero de ellos es un sistema de tubería de dos pulgadas, donde se coloca una "tee" para colocar las plantas. Al final de cada línea se hace una conexión para

alimentar a la siguiente línea, por lo que la estructura queda en zigzag.

4.2.3 Sistema hidropónico en Zigzag

Se establece el sistema hidropónico en zigzag, mediante tees y tubería de PVC. El sistema de alimentación de fluido y nutrientes se abastece con tubería de menor diámetro colocada de forma lateral entre línea y línea, a la salida de la primer línea se coloca la tubería de menor diámetro conectando con la segunda línea y así sucesivamente.



Figura 4.2 Planteamiento del sistema hidropónico



Figura 4.3 Construcción del sistema para hidroponía zigzag



Figura 4.4 Diseño y funcionamiento de la hidroponía TEE

4.2.4 Sistema hidropónico en líneas verticales (YEES)

Consiste en un sistema vertical con estructuras portadoras de plantas horizontales. Es un circuito con prácticamente una entrada en la parte primera línea de arriba hacia abajo y un sistema de drenaje en la última línea de arriba hacia abajo.



Figura 4.5 Pared frontal del edificio de Riego y Drenaje



Figura 4.6 Líneas (torres) ensambladas, sistema vertical

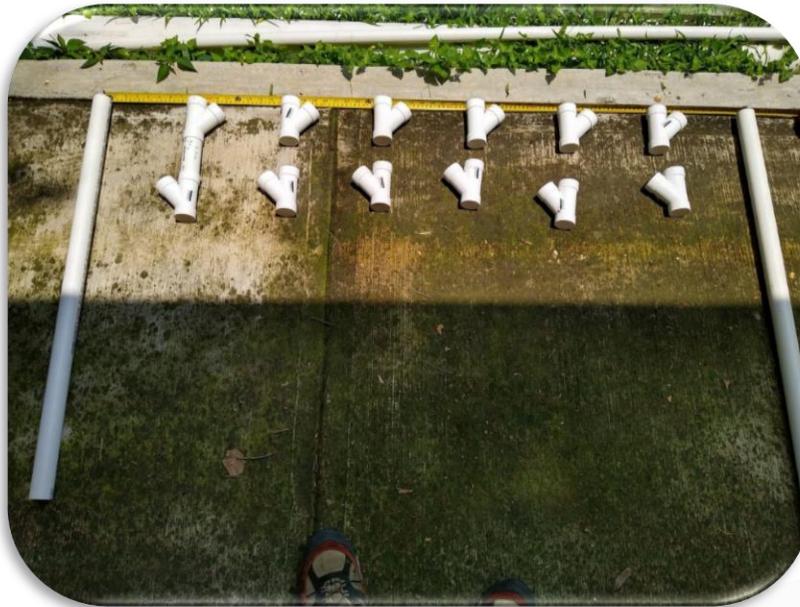


Figura 4.7 Equidistancias del sistema hidropónico vertical

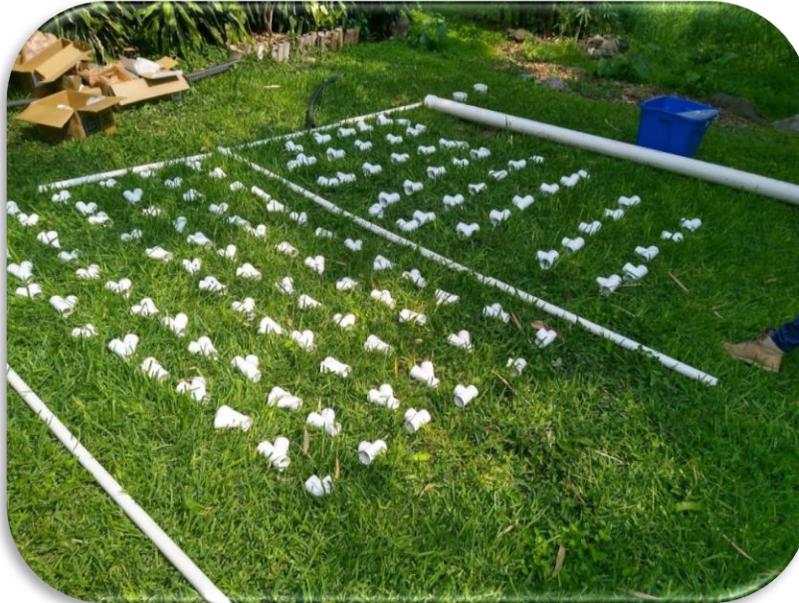


Figura 4.8 Panorama general de los sistemas

4.2.5 Sistema de producción en torres con sustrato (variantes)

Sistemas de producción en torres con sustrato, con diámetros variables y distintos cultivos (Figura 4.9).



Figura 4.9 Torres con diámetros variables

4.2.6 Sistema modular con sustrato (fresa)

Sistema hidropónico modular con sustrato, en este caso el cultivo es fresa. La elección de un buen sustrato es primordial para el tipo de cultivo que se desea plantar.



Figura 4.10 Sistema modular con sustrato, cultivo de fresa

Características propuestas de la estructura del muro

I. Sistema modular con estructura de acero

El sistema para muros verdes modulares se compone de un panel de un metro cuadrado el cual está elaborado a partir de una estructura metálica que tiene como ventaja su fácil instalación y el acoplamiento de más piezas de acuerdo al espacio donde se va a instalar. Está pensado para espacios al aire libre, enfocado principalmente en la utilización de plantas de bajos requerimientos:

a. Características de los módulos

Estructura de lámina galvanizada calibre 16: Se compone el marco del módulo a partir de un desarrollo en plano de la lámina con dobleces y soldadura para generar la estructura deseada.

Recubrimiento de pintura electrostática (color de acuerdo a requerimientos del cliente): Se da un recubrimiento de pintura en polvo el cual brinda mayor estética al producto y añade más resistencia al material que lo compone tomando en cuenta el espacio donde se ubicará.

Dos caras de geomalla: Esta estructura elaborada de diferentes polímeros funciona para darle un refuerzo al módulo complementando la resistencia de la tensión que genera la bolsa con el sustrato de las plantas.

Bolsa de geotextil y polietileno: La bolsa para el sustrato está elaborada de geotextil que es un material flexible y que sirve para drenar el agua del riego de cada módulo. Incluye también una capa de polietileno la cual hace que la bolsa solo sea permeable en ciertos puntos para enfocar y distribuir mejor el riego.



Figura 4.11 Sistema vertical a base de membranas

Una vez definida la cantidad de módulos, así como el largo y número de piezas donde se engancharán los módulos. Se considera la cantidad de taquetes expansivos de 5/16 que se utilizarán, así como la herramienta y el equipo necesarios. Se procede a Instalación de rieles de sujeción (tres taquetes por m²) distribuidos en el área del montaje.



Figura 4.12 **Sustrato para producción de plantas, mezcla de perlita y fibra de coco, con suelo**

Se recomienda este sistema de naturación, debido a su bajo peso por metro cuadrado y por ser de fácil y práctica instalación.

4.2.7 Colocación de especies vegetales

Los subsistemas tienen diferente forma de colocar las especies vegetales. Cuando se habla de cultivos en sustrato, estrictamente el trasplante es más efectivo debido a que la planta pasa de un medio inicial a un medio similar, lo cual permite una rápida adaptación. Cuando el sistema es hidropónico, el trasplante es más exigente debido a que la raíz pierde la parte del suelo que estabiliza el contenido de humedad y queda totalmente expuesta la raíz, por lo que de inmediato debe quedar en contacto con la solución nutritiva, o en su defecto el riego.



Figura 4.13 Sistema modular para producción con sustrato

4.2.8 Sistema en raíz flotante tipo balsa

En el sistema hidropónico de raíz flotante, las plantas crecen y desarrollan su parte aérea flotando en una placa, que se mantiene a flote dentro de un recipiente contenedor, procurando tener en todo momento las raíces dentro de la solución nutritiva (Figura 4.14 y Figura 4.16). Otra opción es alojar el sistema hidropónico en un contenedor instalado en un muro (Figura 4.15).



Figura 4.14 Sistema hidropónico en raíz flotante, aproximación



Figura 4.15 Sistema hidropónico vertical en contenedor



Figura 4.16 Sistema hidropónico en raíz flotante

4.3 Instalación

Dos de los recursos más limitados, costosos y demandados en las ciudades son el agua y el espacio. Las grandes urbes continúan y continuarán con su tendencia de crecimiento vertical. Asimismo la accesibilidad al agua potable en cantidad y frecuencia se está reduciendo cada vez más.

Alrededor del mundo, varias ciudades están implementando *vertical farming*, una manera de producir alimentos verticalmente, optimizando al máximo el uso de recursos como espacio, infraestructura, nutrimentos, agua, mano de obra y energía eléctrica.

Este método de producción de hortalizas logra sus objetivos empleando luz artificial a través de LED's para cubrir las necesidades lumínicas durante la fotosíntesis; ocupando celdas fotovoltaicas para la generación de energía eléctrica que activan los sistemas de bombeo para los riegos, así como otros dispositivos eléctricos; reduciendo significativamente el uso de plaguicidas debido a lo confinado que es el área; reconstituyendo automáticamente los niveles de nutrición en el agua para satisfacer la demanda nutrimental de las plantas; implementando diversos sistemas de automatización como lo son riegos programados, enfriadores, calefacciones, sensores de humedad, luz, dióxido de carbono, temperatura, entre otros; aprovechando



el agua de lluvia a través de sistemas de captación pluvial; entre muchas otras tecnologías, todo esto gracias a la versatilidad que brinda la hidroponía y a las grandes posibilidades de trabajar de manera multidisciplinaria con otras áreas de la ciencia.

Este proyecto busca generar un modelo de producción altamente eficiente, implementando diversas tecnologías que permitan aprovechar al máximo los recursos espacio y agua. Derivado de lo anterior, se decidió confrontar cinco sistemas hidropónicos diferentes, con la finalidad de determinar las ventajas y áreas de oportunidad de cada uno de ellos.

Para este proyecto se recurrió por una parte a la hidroponía ortodoxa (sin suelo, empleando únicamente solución nutritiva) y por otra al fertirriego en un sustrato orgánico con aditamentos minerales con la finalidad de mejorar las propiedades físicas del mismo. La principal ventaja de emplear hidroponía y fertirriego es el control de la nutrición vegetal (solución nutritiva) y todas las virtudes que derivan de ello.

Dicho control nos brinda la certeza de un abonado equilibrado, en este caso se empleó la fórmula de Steiner, aportando macronutrientes, micronutrientes, regulador de pH y un desinfectante a base de cuaternario de amonio.

La hipótesis es que en sistemas hidropónicos verticales, es posible cultivar hortalizas en espacios reducidos, con el mínimo de agua, dos de las características críticas en zonas urbanas en desarrollo actual.





Figura 4.17 Muestra de una fábrica de plantas, en capas

4.3.1 Descripción de los sistemas hidropónicos



Figura 4.18 Ensamble de los sistemas hidropónicos

El trabajo consistió en la instalación y puesta en marcha de cinco sistemas hidropónicos para la investigación del rendimiento de cultivos de porte bajo: lechuga, arúgula, fresa y hierbas aromáticas. Dichos sistemas se colocaron apoyados sobre una base de herrería con dimensiones de 6.0 m de largo x 2.5 m de alto, destinando 1.5 m de largo a cada subsistema, exceptuando el sistema de raíz flotante el cual se colocó directamente sobre el suelo.



Figura 4.19 Base de herrería, para soporte de los subsistemas hidropónicos

Cada uno de los cinco sistemas presenta características muy específicas que permitirán evaluar diversos parámetros en torno al rendimiento por metro cuadrado y la calidad de la producción. Todos los sistemas cuentan con riego automatizado programado a diversos tiempos según sus necesidades hídricas. Los diseños y elección de materiales estuvieron definidas por el Dr. Jorge Flores Velázquez. Dentro de estos sistemas se enlistan los siguientes:

1. Sistema de Tees de PVC hidráulico 1 ½".
2. Sistema de Yees de PVC sanitario de 40 mm.
3. Torres verticales con tubos de PVC hidráulico ced. 40 de 4".

4. Cuadro para muro verde.
5. Sistema de raíz flotante.



Figura 4.20 **Instalación de la tubería de PVC**

El armado de cada uno de los sistemas fue según los requerimientos técnicos.

Sistema de Tees: fue diseñado con sistema de riego cerrado con recirculación constante generada por una bomba solar que solventa el gasto energético. El diseño le permite tener un reservorio de agua en caso de emergencias. Consta de seis niveles con seis Tees cada uno, lo que nos brinda capacidad para 36 hortalizas.



Figura 4.21 Instalación de la tubería de PVC, sistema de T's



Figura 4.22 Instalación de la tubería de PVC, sistema de Y's

Yees: al igual que el sistema de Tees, su sistema de recirculación le brinda la vitalidad a los cultivos a través de riegos constantes. Al ser un sistema totalmente vertical no cuenta con reservorio de agua. El diseño conlleva seis columnas con ocho

Yees cada una, dando una capacidad total de 48 espacios para cultivo.

Torres verticales: cuenta con un sustrato elaborado a partir de la combinación de sustrato orgánico (composta) y mineral (tezontle y tepojal). Su sistema de riego es abierto por goteo, lo que permite dirigir puntualmente el agua y la solución nutritiva a los espacios con mayor demanda. Asimismo permite el análisis de los lixiviados.



Figura 4.23 Colocación de estructuras



Figura 4.24 Actualización de estructuras



Figura 4.25 **Trasplante de fresa en el sistema modular con sustrato**

Cuadro para muro verde: adaptación de un cuadro para pared verde, cambiando el esquema de producción de suculentas a fresas. Cuenta con sustrato elaborado y membranas impermeables que evitan que trasmite el agua y mantiene aislado al sistema. Sus dimensiones son de 90 cm por lado lo que permite el crecimiento de 16 fresas.

Sistema de raíz flotante: cuenta con una lámina de espuma fenólica que le permite mantener a flote las plantas, al mismo tiempo las raíces absorben la nutrición que van requiriendo al estar en constante contacto con la solución nutritiva.



Figura 4.26 Sistema de producción tipo balsa con raíz flotante

Se logró generar un modelo de producción que podrá ser objeto de estudio de diversas líneas de investigación. De esta manera, será posible alcanzar sustanciales mejoras que desemboquen en un modelo más eficiente y sencillo a la vez.

Hoy por hoy, diversas políticas a nivel mundial le apuestan a la soberanía alimentaria, pero aún hay un largo camino por recorrer. Es bien sabido el enorme espectro de sistemas productivos de

hortalizas en ciudades, sin embargo, convendría confrontarlos y detectar las ventajas y oportunidades de ellos para así establecer sistemas más eficientes y estandarizados.



Figura 4.27 Adaptabilidad de sistemas verticales



Figura 4.28 Colocación de plantas germinadas

4.3.2 Riego

El sistema cuenta con alternativas para el riego; debido a las características de los subsistemas, se cuenta con un sistema de riego para el caso de las estructuras con sustrato y otro para las estructuras en solución. El riego que alimenta con solución nutritiva, es el que usa las válvulas solenoides y fueron programadas por un temporizador para aplicar riego y solución durante el día.

Para el caso de las estructuras hidropónicas, se usa una bomba solar la cual permite la recirculación constante, claro está mientras exista luz solar que el panel pueda transformar en energía.



Figura 4.29 Colocación del sistema de riego a cada módulo

El sistema de riego está dividido en dos secciones. La línea conductora que aporta la nutrición vegetal a manera de fertirriego por medio de electroválvulas que separan el riego de cada uno de los subsistemas; y el sistema de recirculación

constante exclusivamente para los sistemas sin suelo (sistema de Yees y Tees). Esta línea principal de alimentación conduce la solución nutritiva de manera separada para cada uno de los subsistemas por evaluar, tomando en consideración que para el sistema de raíz flotante el ingreso de nutrición es manualmente en tiempos por definir según requerimientos.



Figura 4.30 Vista inferior del panel solar

Los sistemas de riego con recirculación tienen una alta demanda energética, por ello se les instaló una celda solar que le provea de la energía necesaria durante el día para mantener su funcionamiento constante e ininterrumpido.

El panel solar, provee la energía para que la bomba "solar" este funcionando y de esa manera es posible la recirculación constante. Como es natural, al requerir la energía del sol para funcionar, es dependiendo del grado de nubosidad y desde luego que solamente de día.

De acuerdo con la bibliografía, la recirculación es suficiente entre 10 horas diarias. Quizá en este caso, existan días en que no se cumpla esta cuota de recirculación, pero los resultados indican que bajo las condiciones ensayadas, son suficientes para cultivar hortalizas de porte bajo en esta región.

Un tema interesante de funcionamiento y operación es que la bomba al ser sumergible, esta condición es necesaria para su funcionamiento, pero indispensable para evitar daño eléctrico,

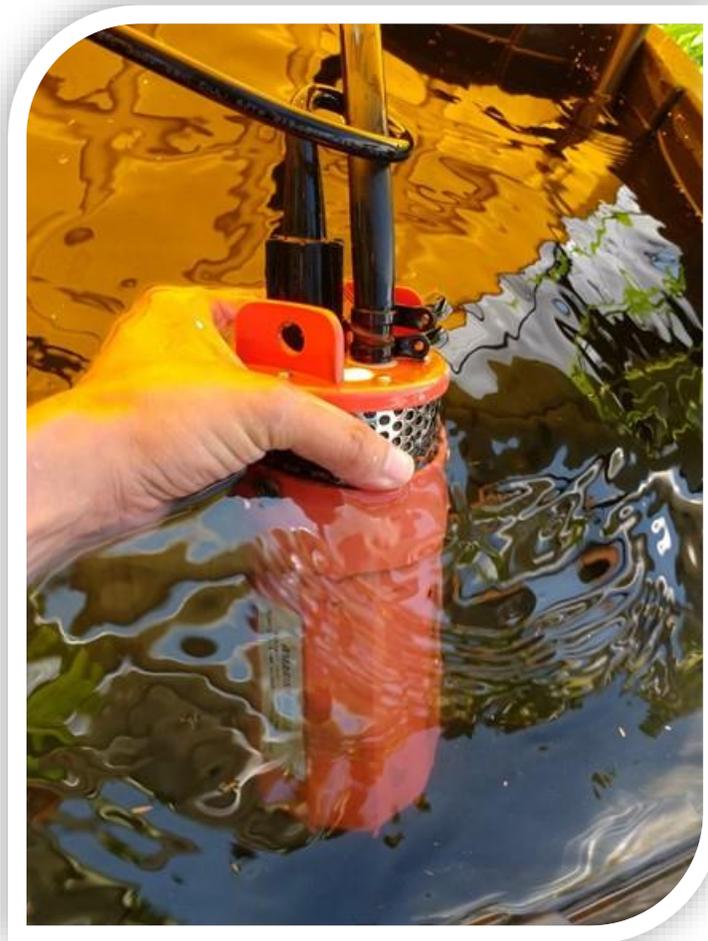


Figura 4.31 Bomba sumergible para recirculación con panel solar

La bomba sumergible tiene una salida de 16 mm pero para mejor función, se incrementa a media pulgada una vez salida del estanque. Con estas dimensiones se realiza la recirculación. El verdadero problema ocurre cuando las plantas están desarrolladas, con las raíces, que ocasionalmente reducen el flujo y puede genera taponamiento.



Figura 4.32 Captación de la solución nutritiva para recirculación

Los sistemas hidropónicos con recirculación de la solución nutritiva tienen la peculiaridad de estar interconectados, tanto en el ingreso de solución nutritiva recirculada como en la captación del excedente de la misma. Ambos sistemas cuentan con su propio recipiente plástico que capta el lixiviado de manera independiente, aunque los contenedores están interconectados, permitiendo compartir la misma bomba que ingresa de nuevo el agua en ambos subsistemas.

En cuanto a los sistemas en sustrato, se diseñó un riego programado. En este sentido se utiliza un programador comercial, el cual puede hacerse por tiempo de riego y veces al día.

Para llevar a cabo el riego en sustrato se conectó una bomba horizontal de $\frac{1}{2}$ HP de potencia, la cual resultó en una sobre potencia al sistema, por lo que se optó por una recirculación directa al tinaco, que además de reducir caudal y presión de flujo, facilita la dilución de la solución nutritiva y evita que se precipiten los fertilizantes.



Figura 4.33 Bomba horizontal para riego programado

La programación del riego, se realiza en: en los sistemas de recirculación, solo una vez al día pues solo se está inyectando la solución nutritiva, de hecho, el riego es recirculado. El riego en sustrato se programó en cuatro sesiones cada uno de 2 minutos. En general, el riego fue estimado de acuerdo a los datos de la estación meteorológica y requerimientos reportados por la bibliografía, no obstante debido a las condiciones específicas del lugar, es perfectible.

Con este ensayo, la idea es establecer la viabilidad estos sistemas en zonas urbanas, y entre las variables e establecer serian, espacio, consumo de recursos, manejo del sistema, complejidad de operación y costo. En ese sentido, el sistema es

viable, y la parte crítica quizá sea la combinación de la operación debido al seguimiento que debe ser diario



Figura 4.34 Panel de control para programación del riego

Se usa una estación meteorológica con el fin de llevar el seguimiento de las variables climáticas y con ello facilitar la programación del riego



Figura 4.35 Disposición de sistema de riego solar, eléctrico y estación meteorológica instaladas

Se instaló en la estación meteorológica un dispositivo para almacenar la información de los sensores; esto es útil, en el sentido que se puede llevar un registro constante de las variables, y con ellas tener juicios en la toma de decisiones, tal como se observa en la gráfica 36

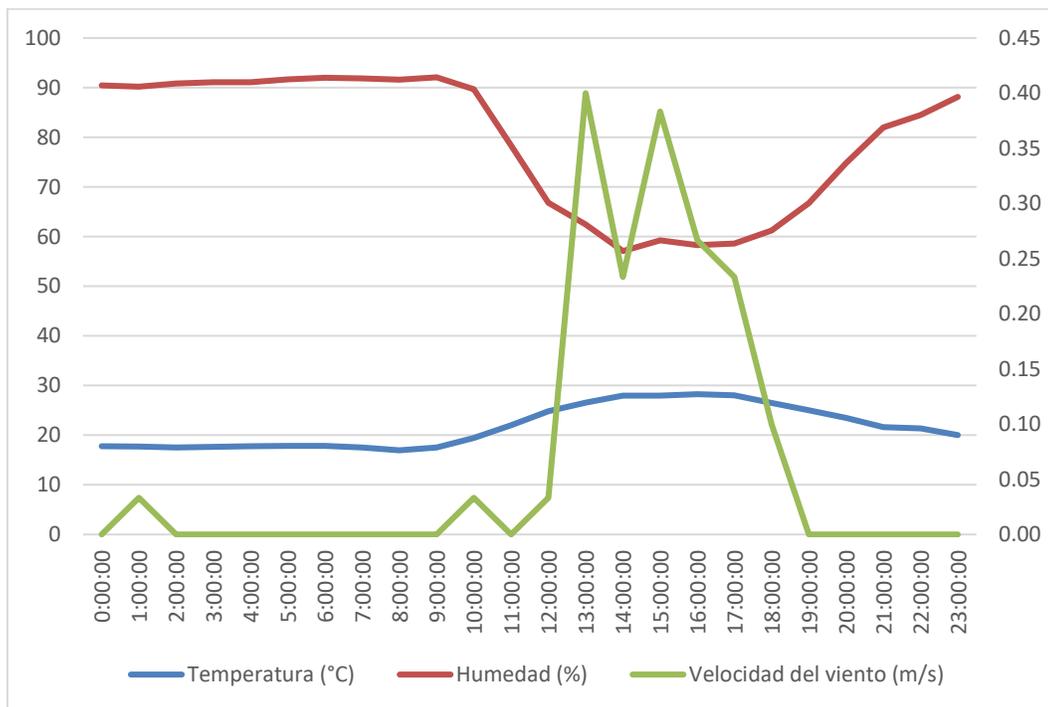


Figura 4.36 Variables meteorológicas que registra la estación

4.3.3 Trasplante

En este caso específico se trasplantaron dos variedades de lechuga, albahaca y fresa. En el entendido que es un sistema experimental para observar las características de funcionamiento de los subsistemas y tratando de probar su utilidad y viabilidad para ser implantados en zonas urbanas.

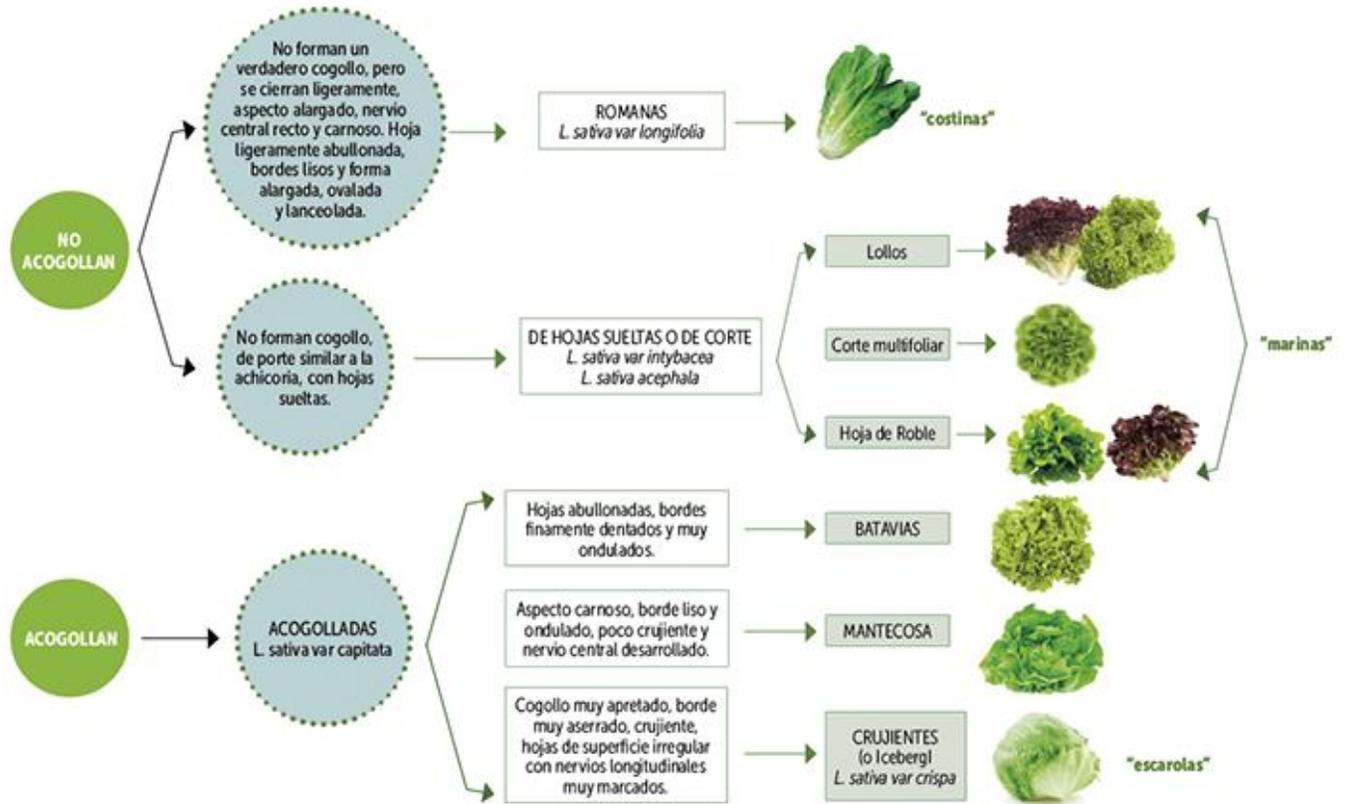


Figura 4.37 Tipos de lechugas cultivadas



5 MANUAL TEÓRICO requerimientos hídricos en zonas urbanas DEL BIOSISTEMA (ET_o, Pp y Cosecha de lluvia)

5.1 Requerimientos hídricos áreas verdes urbanas

5.1.1 Requerimientos de riego

La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos es bastante compleja porque depende de varios factores que, a su vez, son muy variables: clima, cultivo, suelo, fecha de siembra, etcétera. La metodología para su determinación es conocida desde hace tiempo, aunque buen tiempo estuvo restringida su aplicación debido a la complejidad de los cálculos, pero principalmente por la escasa información sobre el clima. Actualmente con el desarrollo de la informática y la modernización y ampliación de la red de estaciones climatológicas permite utilizar metodologías fundamentadas científicamente para determinar el requerimiento de riego de los cultivos.

Los requerimientos de riego se definen como la suma de necesidades hídricas de los cultivos menos las aportaciones naturales o artificiales de agua que alcanzan la zona radical durante un periodo de tiempo.

- **Estimación de los consumos de agua**

El consumo de agua por los cultivos, está ligado al proceso de evapotranspiración (*ET*), es decir, la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie





del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en esta superficie y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante.

A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación. Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en esta superficie son factores que afectan el proceso de la evaporación.

Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas.

Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la





superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera.

El agua, junto con los nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación.

El contenido de humedad del suelo y su capacidad de retener o de liberar el agua a las raíces del cultivo también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el tipo de cultivo, el medio donde se produce y las prácticas y manejo de cultivo.

La evapotranspiración, es decir, la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo.

En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la evapotranspiración





(ET) ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (FAO, 1990).

La evapotranspiración de referencia (ET_0) es un concepto establecido para indicar la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, cubierto por un cultivo de referencia. Se ha utilizado como cultivo de referencia la alfalfa o un pasto bien regado, en pleno desarrollo y en buenas condiciones fitosanitarias.

La estimación periódica de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) en una zona de riego constituye la base para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos. Como es difícil generar una metodología para estimar directamente la evapotranspiración real (ET_r) es necesario estimar primeramente la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0) para aislar el efecto del tipo del cultivo. Posteriormente, se ajusta el valor de ET_0 con un factor que toma en cuenta el tipo y etapa de desarrollo del cultivo, este factor se conoce como coeficiente de cultivo (K_c).

El concepto de evapotranspiración de referencia permite aislar exclusivamente las demandas evapotranspirativas de la atmósfera de otros factores como prácticas de manejo, tipo y fase de cultivo, al definir un cultivo fijo bajo condiciones óptimas de humedad.

Debido a que la mayor parte de los cultivos cubren totalmente el suelo en cierto periodo de su desarrollo, y el suelo sólo en ocasiones está permanentemente húmedo, tal concepto es hipotético y, como su nombre lo indica, sirve de referencia para la evaluación de lo que realmente ocurre. Por tal razón, la ET_0 es una cantidad que depende exclusivamente de las condiciones del medio ambiente: temperaturas máximas y mínimas, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, etcétera.

En la actualidad existen diversos métodos para la estimación de la (ET_0) aquí se usa solamente el método de Penman-Monteith, por su soporte científico y aceptación universal. El método de Penman-Monteith es el método convencional utilizado para estimar la evapotranspiración de referencia. Este método se ha estandarizado desde que la FAO documentó su aplicabilidad y





superioridad en diversas partes del mundo (Allen et al., 1998). La ventaja del método de Penman-Monteith (P-M) son las siguientes:

- Modelo físicamente basado.
- Incorpora parámetros fisiológicos del cultivo.
- Incorpora parámetros aerodinámicos.
- Probado intensamente en varias localidades alrededor del mundo.
- Buena aproximación para estimar la evapotranspiración de referencia para pasto.

Este método es usado para estimar la evapotranspiración de referencia con fines de estimación de los requerimientos de riego de los cultivos, sin embargo, su aplicabilidad aún no es total al requerir estimaciones promedio de temperatura y humedad del aire ambiental, velocidad del viento y radiación solar, en intervalos de un día o menor. Una descripción detallada del método de P-M se encuentra en el manual 56 de la FAO (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{\Delta(Rn-G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* Mw(e_s - e_d)}{R K r_{v(\Delta + \gamma^*)}} \quad (1)$$

Donde:

ET_0 Evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹),

Rn Radiación neta (kW m⁻²),

G Flujo térmico del suelo (kW m⁻²),

Mw Masa molecular del agua (0.018 kg mol⁻¹),

R Constante universal de los gases (8.3 x 10⁻³ KJ mol⁻¹ K⁻¹),

K Temperatura, Kelvin (273°K),

$e_s - e_d$ Déficit de presión de vapor del aire (kPa),





λ Calor latente de vaporización del agua (2,450 K J kg-1),

rv Resistencia al flujo de vapor de la cubierta vegetal (s m-1),

Δ Pendiente de la función de presión de vapor a saturación (Pa °C-1),

γ^* Constante psicrométrica aparente (Pa °C-1)

Para la obtención de los parámetros demandados por la ecuación (1), son necesarias algunas conversiones y premisas en función del intervalo de tiempo para el cual se estima o efectúan las determinaciones. La FAO ha desarrollado un programa (CROPWAT) de fácil utilización para la determinación de la Evapotranspiración de referencia. Para calcular la Evapotranspiración real del cultivo (ET_r) (Allen et al., 1998), se multiplica la ET_0 por el coeficiente del cultivo (K_c), adimensional.

$$ET_r = ET_0 * K_c \quad (2)$$

Donde:

ET_r Evapotranspiración real del cultivo (mm mes-1),

K_c Coeficiente del cultivo en función de la etapa de su desarrollo.

La evapotranspiración real de un cultivo se refiere al agua perdida tanto por la transpiración del cultivo como por la evaporación del suelo. Existen varios conceptos relacionados con la evapotranspiración. Para fines de diseño de sistemas de riego se requiere conocer la evapotranspiración en la época de máxima demanda que puede presentar un cultivo bajo condiciones óptimas, conocida como evapotranspiración potencial o evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándares (Ojeda y Carrillo, 2002). La evapotranspiración real de un cultivo es menor o igual a su evapotranspiración potencial.



Para calcular la evapotranspiración potencial de un cultivo (ET_p), se multiplican dos factores: el factor clima y el factor cultivo. El factor clima es representado por la evapotranspiración de referencia y el factor cultivo por el coeficiente de cultivo. Para fines de diseño se considera que la evapotranspiración real debe ser igual a la evapotranspiración potencial, a menos que se quiera trabajar bajo condiciones deficitarias. Por lo tanto, la estimación de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) con fines de diseño de un sistema de riego consiste en dos partes:

1. Estimación de una tasa de referencia, evapotranspiración de referencia (ET_0), con especificaciones en el suministro de agua y tipo de cultivo bien definido.
2. Escalar la tasa de referencia al tomar en cuenta las características del cultivo en la forma del coeficiente de cultivo (K_c).

Coeficientes de cultivo en áreas verdes urbanas

El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c .

El coeficiente de cultivo (K_c) relaciona la evapotranspiración potencial (ET_p) de un cultivo con la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0). Se han realizado una gran cantidad de investigaciones en diversas partes del mundo para obtener simultáneamente tanto ET_p como ET_0 y obtener el coeficiente de cultivo con la siguiente ecuación:

$$K_c = \frac{ET_p}{ET_0} \quad (3)$$



En el caso de cultivos agrícolas este coeficiente varía desde la siembra hasta la cosecha, derivándose cuatro fases o etapas de desarrollo del cultivo y en consecuencia cuatro valores del K_c .

Para la situación de las plantas en jardines, debido a la gran variedad de especies que se pueden encontrar, se hace prácticamente imposible establecer un valor del coeficiente de cultivo para su totalidad, ya que cada una de ellas presenta un valor diferente de K_c . Además en el jardín, factores como la densidad de plantas presentes, y de microclimas diferentes influirán en el valor de la evapotranspiración y el riego del jardín demandará cantidades diferentes de agua; por lo que para la aplicación del riego éste no será lo más eficiente, ya que las plantas con menores necesidades de agua recibirán más de la requerida. Una solución es considerar un valor de K_c intermedio por especie.

Un aspecto importante a considerar es que en jardinería, al contrario que en agricultura, no se determinan las necesidades de agua para maximizar el rendimiento, lo que se pretende es mantener los jardines con una estética aceptable. Por lo tanto, hay que tener presente que el coeficiente de jardín no sea considerado como un coeficiente de cultivo adaptado a jardines, sino de un coeficiente para determinar de forma aproximada las necesidades de agua que permitan mantener la estética, teniendo siempre en cuenta una serie de parámetros propios de los jardines.



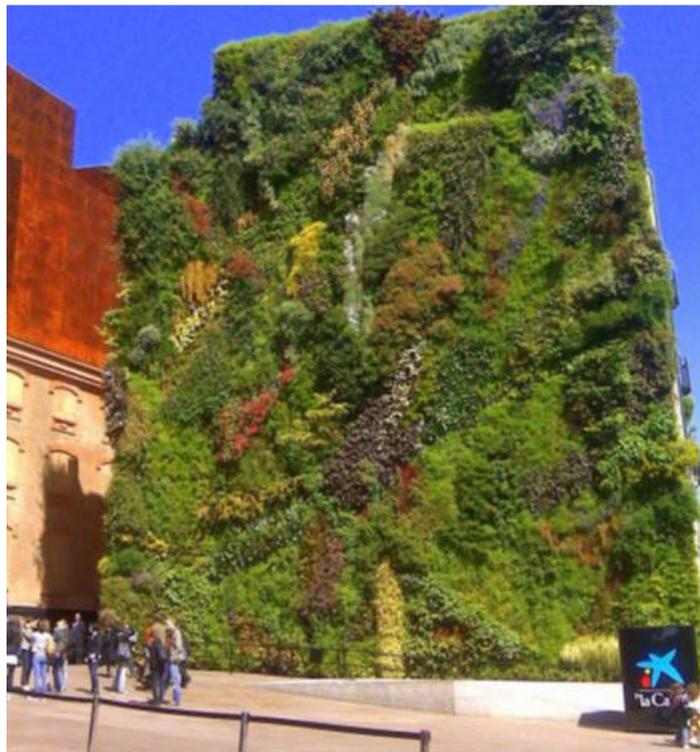


Figura 5.1 Jardín vertical Caixa Fórum, Madrid (Ayuso, 2016)

Para la determinación de la evapotranspiración de las plantas en jardines (ET_j), esta se afecta por un coeficiente de jardín, en lugar del coeficiente del cultivo, es decir (Costelo, 2000):

$$ET_j = K_j * ET_0 \quad (4)$$

Donde:

ET_j Es la evapotranspiración del jardín.

K_j Es el coeficiente del jardín.

ET_0 Es la evapotranspiración de referencia.

K_j Es el coeficiente del jardín en función de las especies que lo conforman, la densidad de plantación y del microclima existente. El K_j se basa en una evaluación de las especies plantadas que componen el jardín (K_e), de la densidad de plantación (K_d) y del microclima existente (K_m) y que se utilizará para el cálculo de la evapotranspiración, en lugar del K_c tradicional.

$$K_j = K_e * K_d * K_m \quad (5)$$

Donde:

K_e Coeficiente de las especies que componen el jardín.

K_d Densidad de plantas del jardín.

K_m Condiciones de microclima del jardín.

Enseguida se presentan algunas razones del por qué utilizar un coeficiente de jardín en lugar del coeficiente del cultivo:

A diferencia de un cultivo o de césped, las plantaciones de jardín se componen típicamente de más de una **especie**. Varias especies riegan comúnmente dentro de una misma área de riego, y las diferentes especies dentro de esta área de riego pueden tener necesidades diferentes de agua, y la selección de un coeficiente de cultivo apropiado para una especie puede no ser apropiada para las otras especies. Por lo tanto, Coeficientes de cultivo adecuados para jardines deben incluir alguna consideración de las mezclas de especies que se presentan.

Por otro lado, la **densidad** plantas varía considerablemente en los jardines. Algunas plantaciones tienen muchas veces más área foliar que otras. Por ejemplo, un jardín con árboles, arbustos y plantas de cubierta estrechamente agrupadas en una pequeña área tendrá más área foliar que un jardín con sólo arbustos muy espaciados en el área de igual tamaño. Como resultado, una plantación densa se espera perder una mayor cantidad de agua que una plantación rala. Para producir una estimación confiable de la pérdida de agua, un coeficiente de jardín debe tener en cuenta dicha variación en la densidad de la vegetación.

Muchas áreas verdes o jardines incluyen una variedad de **microclimas**, desde pequeñas zonas o áreas calientes, con sol,

viento, sombreadas y/o protegidas. Estas variaciones en el clima afectan significativamente la pérdida de agua de la planta. Se ha encontrado que una plantación en un área pavimentada puede tener 50% mayor pérdida de agua que una plantación de la misma especie en un entorno de parque. Otros estudios han determinado que las plantas en áreas sombreadas pierden 50% menos agua que las plantas de la misma especie en una condición de campo abierto. Esta variación en la pérdida de agua causada por microclima debe explicarse en un coeficiente utilizado para plantaciones de jardín. En conjunto, estos factores hacen plantaciones de jardín muy diferente de los céspedes y cultivos agrícolas. El coeficiente de jardín fue desarrollado específicamente para tener en cuenta estas diferencias.

Coeficiente de especie (K_e)

La variedad de plantas que normalmente se encuentran en un jardín dificulta el cálculo de las necesidades hídricas. Para simplificar estos cálculos y poder aplicar el agua necesaria a cada tipo de planta o especie, lo ideal sería agrupar las especies con necesidades de agua similares en zonas de riego comunes que se puedan regar de forma independiente, logrando así una aplicación más eficiente del riego. De esta manera la estética final del jardín estaría determinada por zonas de riego comunes, es decir, queda subordinada al riego.

El valor del coeficiente de especie es muy importante para la determinación del coeficiente del jardín, sin embargo, actualmente no existen valores normalizados para todas las especies de plantas.

Tabla 5.1 Coeficiente de especie (Costelo, 1994)

Género	K_e
Graptopetalum spp	0.26
Echeverria spp	0.26
Crassula spp	0.20
Especies	
Sedum acre	0.20
Sedum sediforme	0.20
Sedum sielbodii	0.20

Coeficiente de densidad (K_d)

El valor del coeficiente de densidad está en función del tipo de vegetación presente en el jardín. Para arbustos y plantas

tapizantes el coeficiente de densidad se considera equivalente. Con este tipo de vegetación, Kd toma un valor medio cuando la cubierta del suelo es completa o casi completa (90%). Si este porcentaje es menor o si la zona está recién plantada, el coeficiente disminuye tomando valores entre 1.0 y 0.5. Cuando sobre una base de tapizantes o de arbustos exista otro tipo de vegetación, los valores de densidad aumentan tomando valores entre 1.0 y 1.3.

Tabla 5.2 Coeficientes de densidad (Martín Rodríguez)

Tipo de vegetación	Coeficiente de densidad (Kd)		
	a	m	b
Árboles	1.3	1.0	0.5
Arbustos	1.1	1.0	0.5
Tapizantes	1.1	1.0	0.5
Plantación mixta	1.3	1.1	0.6
Césped	1.0	1.0	0.6

Nota.- (a) es el coeficiente con valor alto, (m) valor medio, y (b) es el valor bajo.

El factor de densidad oscila en valor de 0.5 a 1.3 (Costelo, 2000). Esta gama se separa en tres categorías: Alto (a) 1.1-1.3, Media (m) 1.0 y baja (b) 0.5-0.9. Las plantaciones recientes y ralas, estos jardines tienen menos área de plantas y de área foliar y por lo tanto pierden menos agua, por lo que se les asigna un Kd de valor en la categoría baja. Jardines con mezclas de vegetación (árboles, arbustos y cubiertas vegetales) tienen mayores áreas de hojas con un tipo de vegetación única, por lo que perderán más agua, se les asigna un factor de densidad en la categoría alta. Finalmente plantaciones que están formadas predominantemente de un tipo de vegetación, se asignan a la categoría media.

Coeficiente de microclima (Km)

La pérdida global de agua en un jardín también se ve afectada por las condiciones ambientales del mismo. En un jardín pueden existir zonas con distintas condiciones ambientales o microclimas. Las edificaciones o pavimentación típica de los jardines urbanos pueden influir sobre las condiciones naturales del jardín. Así, por ejemplo, los jardines de las zonas de estacionamiento o aparcamiento están sometidos a mayor temperatura y menor humedad que los jardines de los parques.

Una condición $K_m = 1$ es aquella en la que las estructuras y edificaciones. No influyen en el microclima del jardín. En condiciones microclimáticas altas (K_m de 1.0 a 1.4) indica que las condiciones externas aumentan la evaporación de la zona de riego. Esto suele ocurrir en jardines rodeados de edificaciones que absorben calor. En estos casos, el jardín recibe una radiación y una energía extra procedente de las construcciones que la rodean, que hará que la evaporación sea superior a la de un jardín que no esté expuesto a estas condiciones. En cambio en jardines sombreados, que reciben una tasa de radiación menor y si además están protegidos de los vientos, las condiciones microclimáticas varían, K_m de 0.5 a 1.0.

Tabla 5.3 Coeficiente de microclima (Martín Rodríguez)

Tipo de vegetación	Coeficiente de microclima (K_m)		
	a	m	b
Árboles	1.4	1.0	0.5
Arbustos	1.3	1.0	0.5
Tapizantes	1.2	1.0	0.5
Plantación mixta	1.4	1.0	0.5
Césped	1.2	1.0	0.8

Nota.- (a) es el coeficiente con valor alto, (m) valor medio, y (b) es el valor bajo.

Tabla 5.4 Coeficientes de especie, densidad y microclima para jardines (Costelo, 2000)

Coeficiente	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
	Factor especie* (K_e)	0.7-0.9	0.40.6	0.1-0.3
Densidad (K_d)	1.1-1.3	1.0	0.5-0.9	
Microclima (K_m)	1.1-1.4	1.0	0.5-0.9	

5.2 Estimación de la precipitación útil en zonas urbanas

5.2.1 Clima

El clima predominante es cálido subhúmedo con temperatura media anual de 21.5°C, y una mínima promedio de 10°C que se presenta en el mes de enero y una máxima promedio de 32°C en los meses de abril y mayo. Las lluvias se presentan durante el verano entre los meses de junio a septiembre, con una precipitación media anual de aproximadamente 1,000 mm.

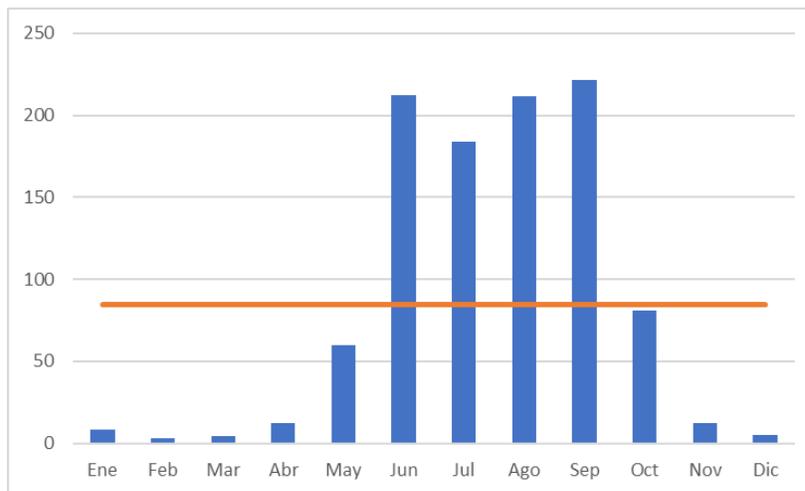


Figura 5.2 Precipitación media mensual, mm (período 1982-2009)

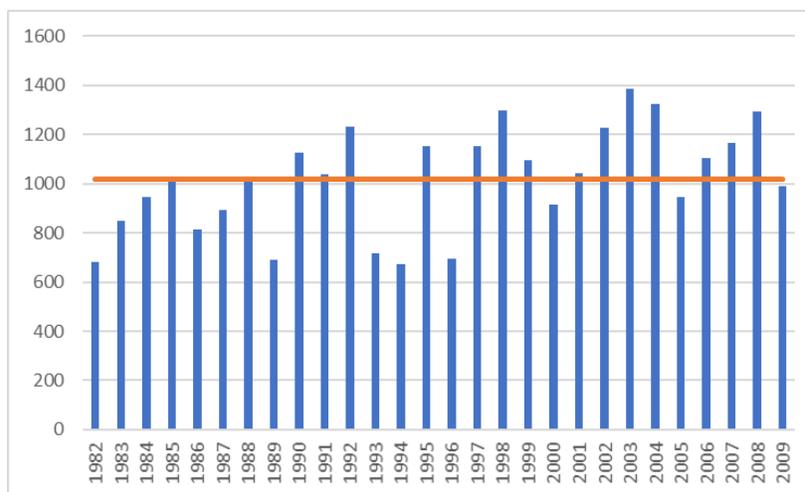


Figura 5.3 Precipitación media mensual, mm (período 1982-2009)

5.2.2 Precipitación

La precipitación es la caída de partículas líquidas o sólidas de agua a la superficie, a donde llegan con una velocidad de acuerdo al tamaño de la gota.

La velocidad de caída de las partículas de agua depende de su tamaño y de la componente vertical de la velocidad de los flujos de aire.

Las gotas en las que se condensa el vapor de agua atmosférico se mantienen aparentemente en suspensión formando nubes, sin embargo, a pesar de ser muy pequeñas no pueden evitar la gravedad y van cayendo lentamente a una velocidad v , cuyo valor es determinado por la ley establecida por el físico Stokes en 1850.

$$v = 1.3r^2 \times 10^6 \quad (6)$$

Donde,

v = velocidad de las gotitas, mm/s

r = radio de las gotitas, cm

Esta velocidad es insignificante y puede ser anulada por una pequeña corriente ascendente del aire. Por término medio la dimensión de las gotas en las nubes es de unas 5 μ de diámetro, su velocidad de caída es 0.7 mm/s. A veces, de una nube cuelga como una cortina de lluvia, pero que se evapora antes de llegar al suelo. Porque para que se forme verdadera lluvia es necesario que se formen por coalescencia gotas más grandes, las cuales, venciendo la resistencia del aire, pueden llegar al suelo.

Las gotas más pequeñas de lluvia tienen aproximadamente 0.1 mm de diámetro y cada una de ellas tiene más de un millón de gotitas de la nube que la origina.

5.2.3 Tipos de precipitación

Precipitación convectiva. Tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende, se enfría, se condensa y se forma la nubosidad de tipo cumuliforme, origen de las precipitaciones en forma de chubascos o tormentas. El ascenso de la masa de aire se debe generalmente a un mayor calentamiento en superficie.

Precipitación ciclónica. Es la que está asociada al paso de una perturbación ciclónica. Se presentan dos casos, frontal y no frontal.

La precipitación frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión.

La precipitación frontal se asocia a un frente frío o a un frente cálido. En los frentes fríos el aire cálido es desplazado violentamente hacia arriba por el aire frío, dando lugar a nubosidad de gran desarrollo vertical acompañada de chubascos que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizo. La precipitación del frente frío es generalmente de tipo tormentoso, extendiéndose poco hacia delante del frente. En los frentes cálidos el aire caliente asciende con relativa suavidad sobre la cuña fría, en general de escasa pendiente, dando lugar a una nubosidad más estratiforme que en el frente frío y, por lo tanto, a lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero de menor intensidad instantánea.

Precipitación orográfica. Es aquella que tiene su origen en el ascenso de una masa de aire, forzado por una barrera orográfica o montañosa.



Figura 5.4 Tipos de precipitación

5.2.4 Formas de precipitación

Formas de precipitación Según la apariencia de los elementos, esto es, según su forma, la precipitación se clasifica en:

- **Lluvia**

Se define como una precipitación de agua líquida que llega al suelo, con gotas de diámetro entre 0.5 y 5 milímetros.

- **Llovizna**

Riego tenue de gotitas pequeñas, de diámetro menor que 0.5 milímetros, muy denso o compacto. Se puede considerar débil, moderada o fuerte dependiendo de la visibilidad.

- **Neblina**

Es una precipitación mucho más tenue aún que la llovizna.

- **Nieve**

La nieve se forma de cristales de hielo cuando el vapor de agua se congela en diminutas partículas sólidas en niveles donde las temperaturas son muy inferiores a 0° C. Los cristales de hielo se van uniendo para formar los copos de nieve. Cuando los copos de nieve tienen suficiente peso, caen al suelo. Su tamaño, forma y concentración depende de la temperatura de donde se formen y por donde pasan y tienen una gran variedad de formas, pero todos tienen la característica de ser hexagonales, con un motivo único que no se repite. La nieve es transparente, aunque las reflexiones de los muchos lados de sus cristales hacen que parezca blanca.

- **Aguanieve**

Nieve fundente o mezcla de nieve y lluvia.

- **Lluvia helada**

Se produce cuando la temperatura en el nivel de las nubes es negativa y las gotas de lluvia están sobreenfriadas. La lluvia se congela al llegar a la superficie y chocar con los objetos.

▪ Granizo

Se forma cuando las gotas de agua sobreenfriadas circulan en una zona de corrientes ascendentes en el interior de un cumulonimbos. El granizo cae de la nube como precipitación sólida de terrones de hielo duro, redondeados o irregulares, cuando adquiere demasiado peso para que las corrientes ascendentes lo mantengan en el aire. Es tal vez la forma de precipitación más destructiva.



Figura 5.5 Formas de precipitación

5.2.5 Lluvia conducida por el viento

Existen investigaciones sobre la afectación de las edificaciones por la lluvia conducida por el viento, la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional, en la Unidad Tecamachalco alberga la tesis de maestría en ciencias en Arquitectura por el maestro José Eduardo Elizondo Barrientos (Elizondo, 2009).

El enfoque desde el punto de vista arquitectónico de las edificaciones serían efectos negativos de la lluvia, pero desde el punto de vista de la agricultura urbano serán efectos positivos, ya que nos puede indicar la dirección de la lluvia que se podría utilizar en los muros para implementación de jardines verticales o huertos urbanos verticales.

El clima y sus factores determinan en parte el deterioro de la envolvente del espacio habitable, el viento y la lluvia son algunos de esos factores: el efecto producido por la combinación de la velocidad del viento con la intensidad de la lluvia, da lugar al fenómeno conocido como "Lluvia conducida por viento" (Van Mook, 1997:01). Es la fuente más importante de humedad que

afecta el desempeño higrotérmico y durabilidad de las fachadas afectando a los materiales expuestos (Elizondo, 2009).

El objetivo principal de la tesis de Elizondo fue “Determinar la relación existente entre los vectores de velocidad y dirección del viento, y la velocidad de la lluvia, a partir de un modelo numérico simple, para así conocer el ángulo en el plano vertical (x, z) y dirección en el plano horizontal (x, y), incidentes de la lluvia conducida por viento, para determinar cuál es la orientación óptima de edificios, en función de la misma”.

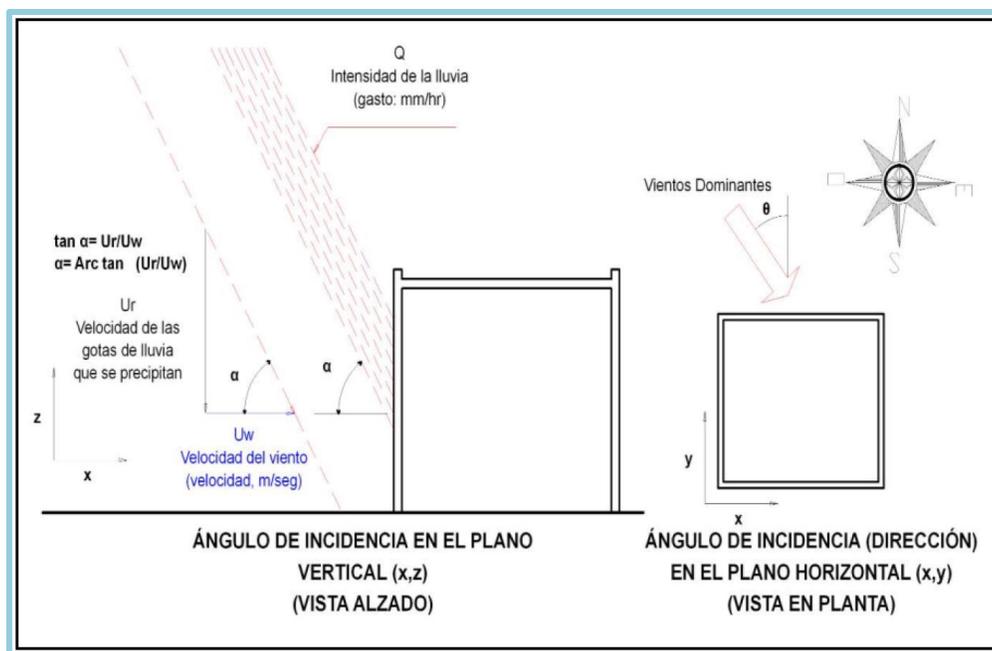


Figura 5.6 Representación esquemática de la lluvia conducida por viento (Elizondo, 2009)

Ya que el modelo del fenómeno se trata a partir de la combinación de vectores de velocidad, tanto de viento como de la gota de lluvia, nuevamente nos encontramos con la ley de Stokes.

La ley de Stokes se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de bajos números de Reynolds. Fue derivada en 1851 por George Gabriel Stokes tras resolver un caso

particular de las ecuaciones de Navier-Stokes. En general la ley de Stokes es válida en el movimiento de partículas esféricas pequeñas moviéndose a velocidades bajas. La ley de Stokes puede escribirse como:

$$F_d = 6\pi R\eta v \quad (7)$$

Donde:

R = es el radio de la esfera,

v = su velocidad y

η = la viscosidad del fluido

La condición de bajos números de Reynolds implica un flujo laminar lo cual puede traducirse por una velocidad relativa entre la esfera y el medio inferior a un cierto valor crítico. En estas condiciones la resistencia que ofrece el medio es debida casi exclusivamente a las fuerzas de rozamiento que se oponen al deslizamiento de unas capas de fluido sobre otras a partir de la capa límite adherida al cuerpo. La ley de Stokes se ha comprobado experimentalmente en multitud de fluidos y condiciones (https://www.academia.edu/11395579/laboratorio_viscosidad).

Si las partículas están cayendo verticalmente en un fluido viscoso debido a su propio peso puede calcularse su velocidad de caída o sedimentación igualando la fuerza de fricción con el peso aparente de la partícula en el fluido.

$$V_S = \frac{2r^2g(\rho_p - \rho_f)}{9\eta} \quad (8)$$

Donde:



V_s = velocidad de caída de las partículas,
 g = es la aceleración de la gravedad,
 ρ_p = es la densidad de las partículas,
 ρ_f = es la densidad del fluido,
 η = es la velocidad del fluido, y
 r = es el radio equivalente de la partícula.

La ecuación simplificada para la caída de una gota de lluvia a través del aire por Dingle y Lee en el año 1972, confirmada en el año 1977 por Banks y Flores en un estudio que llevaron a cabo para determinar el coeficiente de reaireación en lagos, determinaron que la velocidad V (cm/s). De una gota de lluvia de diámetro D (mm), cayendo en el aire puede ser calculada de la siguiente manera:

$$V = 5.49D^3 - 88.80D^2 + 491.84D - 16.60 \quad (9)$$

Siendo posible efectuar una combinación de vectores de velocidad de la gota de lluvia y del viento, y así poder conocer la orientación actuante de la lluvia conducida por viento y su ángulo de impacto, bajo condiciones de campo abierto (Elizondo, 2009).

Para la implementación de este modelo se requieren variables como intensidad de lluvia, diámetro de la gota de lluvia, velocidad de la gota de lluvia, velocidad del viento, dirección y orientación del viento; como no todas las estaciones meteorológicas registran estas variables, solamente de forma simple podemos realizar un análisis de las direcciones del viento y proponer el muro que mejor se oriente a la dirección preferencial del viento en la temporada de lluvias.



Con datos de la estación Progreso, ubicada en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), a $98^{\circ}51'34''$ de longitud, a $18^{\circ}53'04''$ de latitud y a 1,615.16 msnm, para el periodo de registro de 2013 a 2018, se analizaron los datos de viento para cada mes y se determinó que la dirección preferencial del viento en todo el año es del suroeste, confirmando que para el periodo de lluvias que es de junio a septiembre se mantienen los vientos provenientes del suroeste.

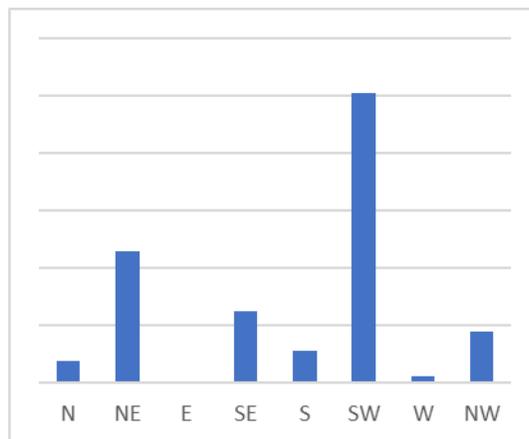


Figura 5.7 Dirección de los vientos para el período 2013-2018

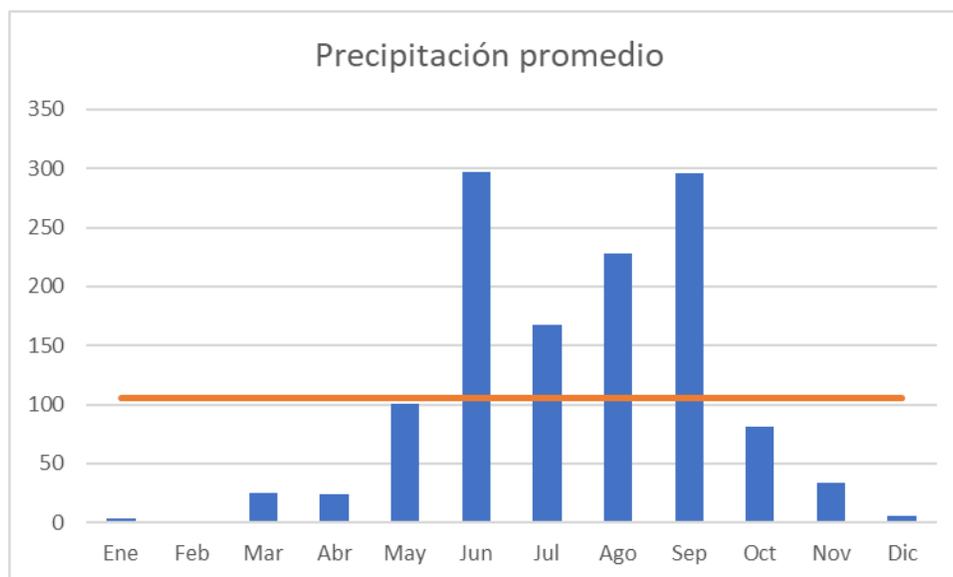


Figura 5.8 Temporada de lluvias de junio a septiembre (período 2013-2018)

Para la selección del muro que presente las mejores condiciones para aprovechar la precipitación directamente en la época de lluvia y haciendo uso de este análisis se determina que en esta zona los muros que se encuentren en la dirección suroeste, serán los idóneos para utilizarlos como muros verdes con fines de producción hortícola.

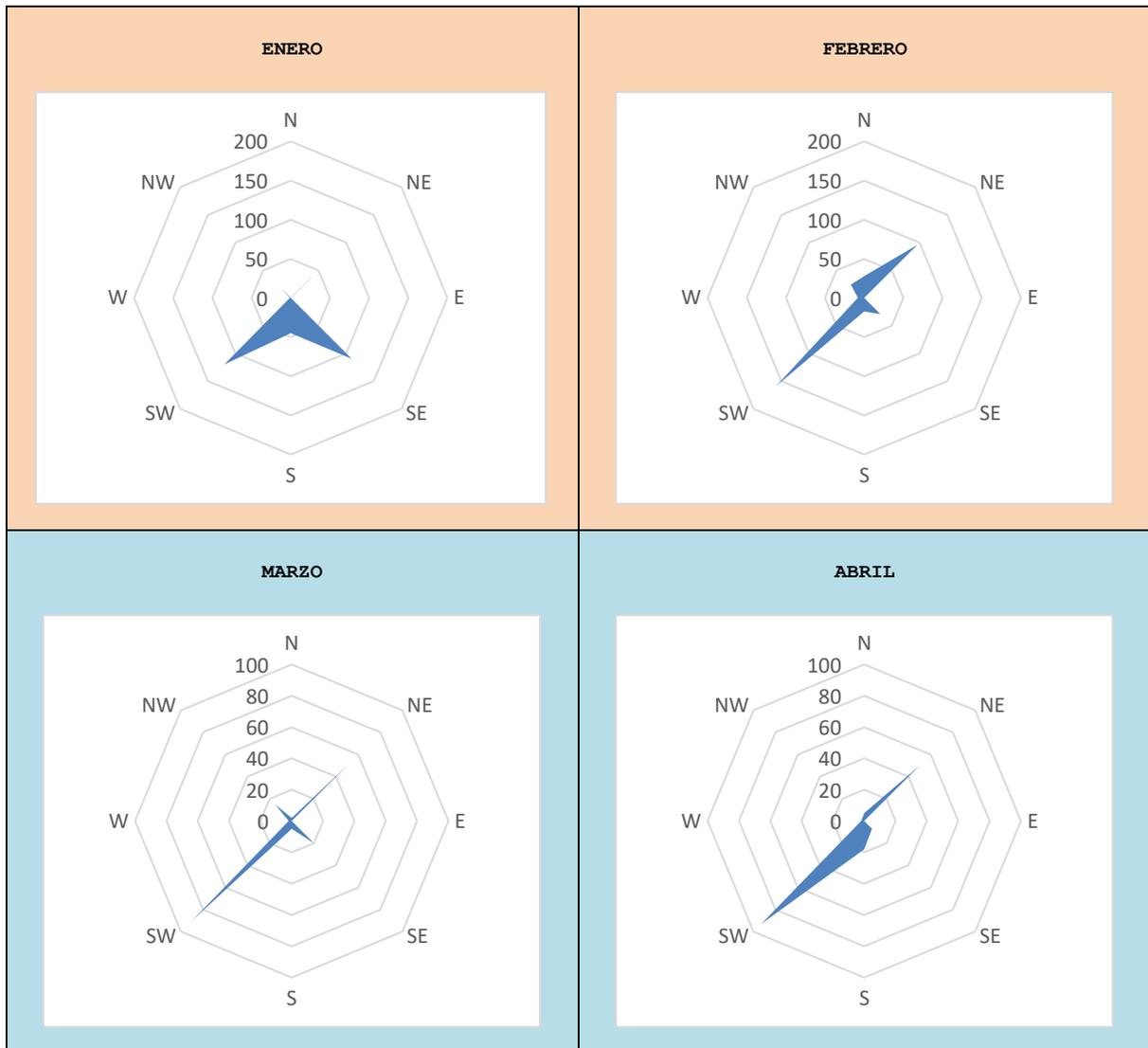


Figura 5.9 Dirección del viento, enero-abril

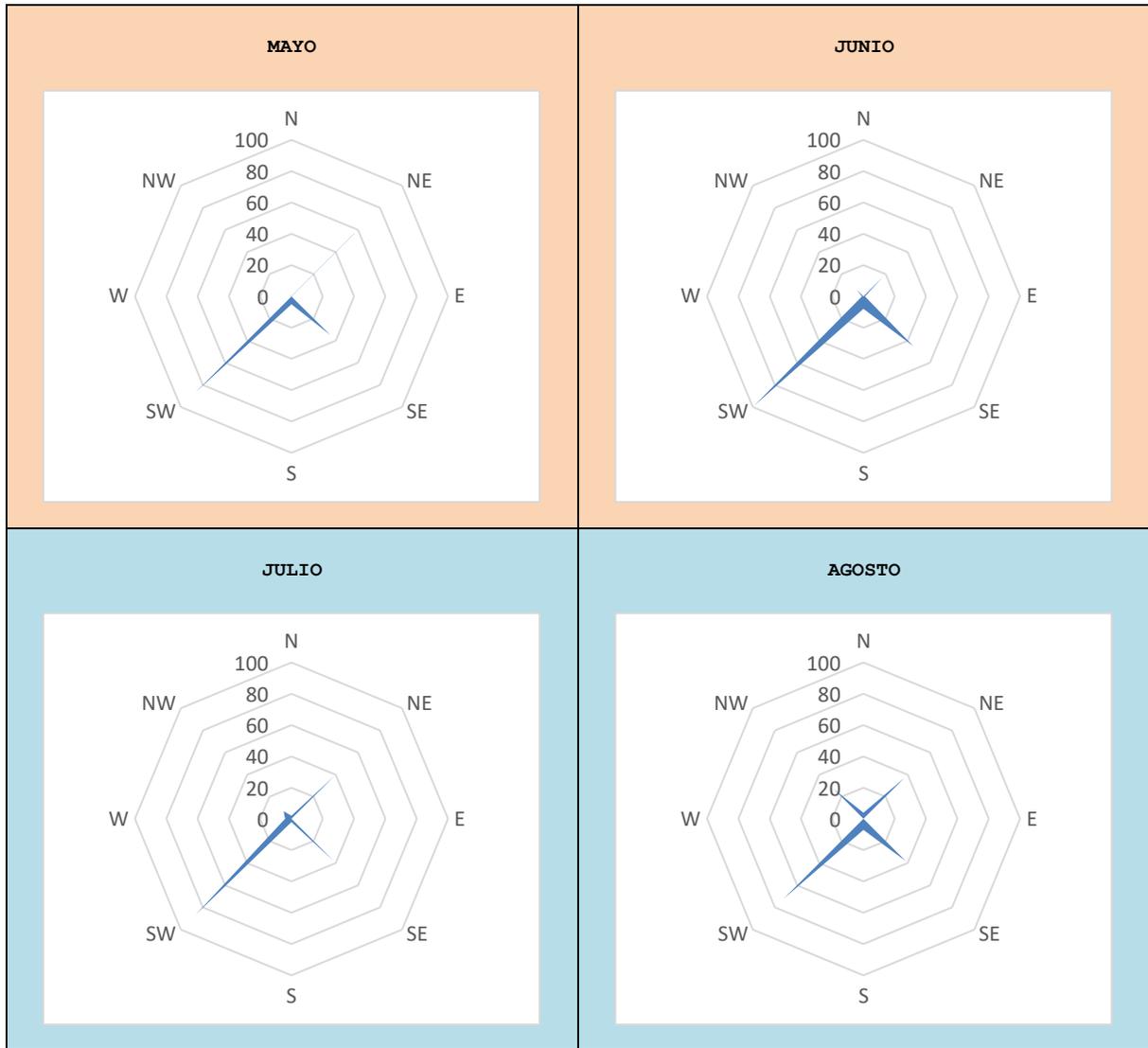


Figura 5.10 Dirección del viento, mayo-agosto

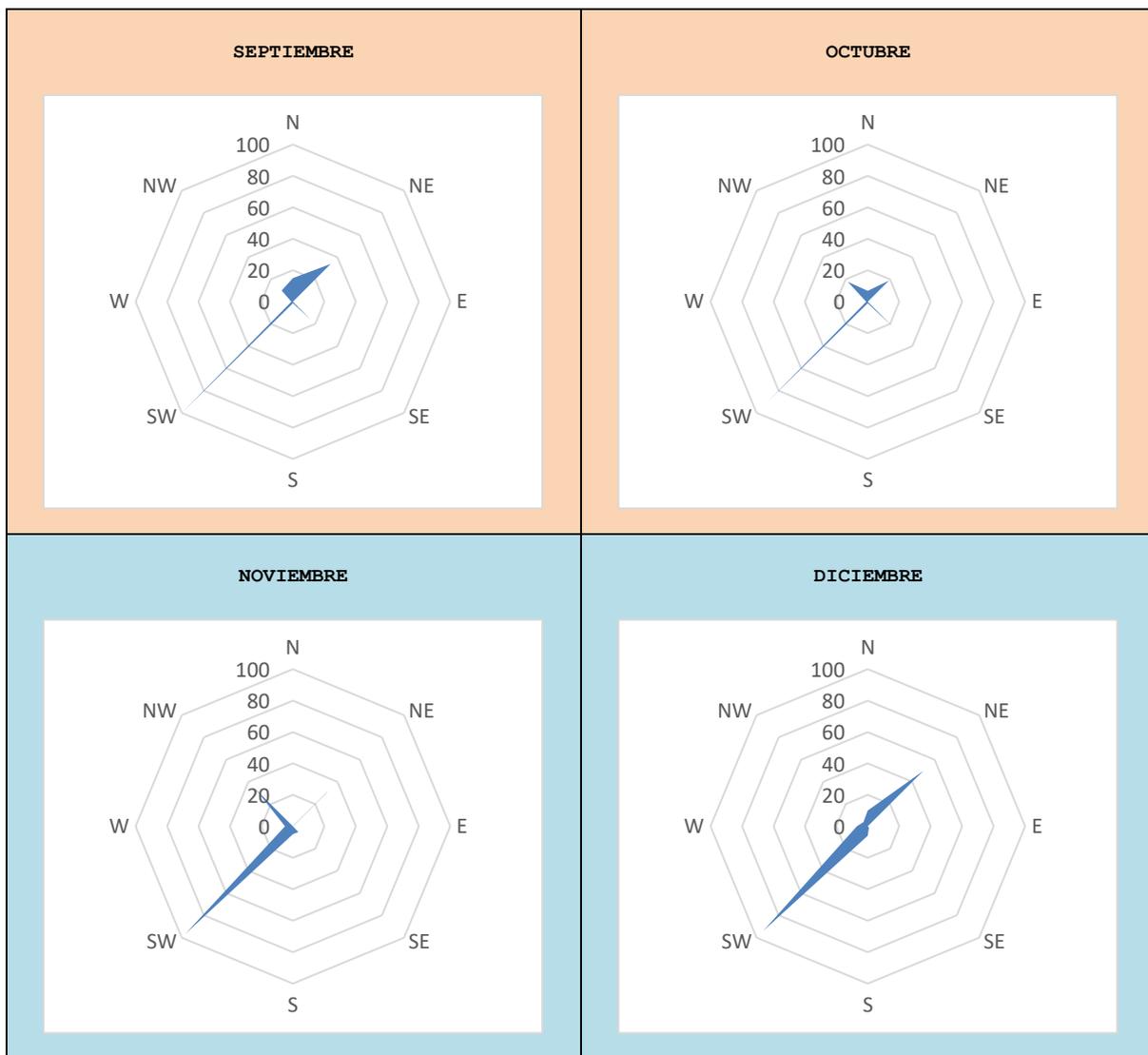


Figura 5.11 Dirección del viento, septiembre-diciembre



5.3 Cosecha de lluvia en zonas urbanas para producción hortícola

5.3.1 Antecedentes

A través de la historia, la civilización aprovecha el agua superficial como primera fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte, por ello el desarrollo de las primeras civilizaciones se realizaron a orillas de los ríos, allí el hombre aprendió a domesticar los cultivos y con ello la primera aplicación al agua de lluvia; pero no depende directamente de ella para su supervivencia, debido a la presencia permanente del agua superficial.

Cuando las civilizaciones crecieron demográficamente y algunos pueblos debieron ocupar zonas áridas o semiáridas del planeta, comenzó el desarrollo de formas de captación de agua de lluvia, como alternativa para el riego de cultivos y el consumo doméstico (Ballén-Suárez et al, 2006), o en algunos ejemplos ancestrales en Iberoamérica sobre el uso del agua para riego (Martínez-Saldaña, et al., 2011) y algunos ejemplos de captación de agua de lluvia y sus variantes (Mekdaschi-Studer & Liniger, 2013).

Los sistemas de captación de agua de lluvia, son ancestrales, teniendo el primer registro en el desierto de Néguev, en Israel y Jordania, descubriendo sistemas que datan de 4,000 años, consistían en el desmonte de lomeríos para aumentar la escorrentía superficial, que era entonces dirigida a predios agrícolas en las zonas más bajas. En Yemen se construyó antes del año 1000 a.C., que cuentan con patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua de lluvia.

Durante la República Romana (siglos III y IV a. C.) la ciudad de Roma en su mayoría estaba ocupada por viviendas unifamiliares denominadas "la Domus" que contaba con un espacio principal a cielo abierto ("atrio") y en él se instalaba un estanque central para recoger el agua de lluvia llamado "impluvium", el agua de lluvia entraba por un orificio en el techo llamado "compluvium". En Loess Plateau en la provincia de Gansu en China existían pozos y jarras para la captación de agua de lluvia desde hace más de 2,000 años.

En Irán se encuentran los "abarbans", los cuales son los sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de aguas de lluvia. En Centroamérica se conoce el caso del Imperio Maya donde sus reyes sostenían a sus pueblos de modos prácticos,





ocupándose de la construcción de obras públicas. Al sur de la ciudad Oxkutzcab, Yucatán, en el pie de la montaña Puuc, en el siglo X a. C. el abastecimiento de agua para la población y el riego de los cultivos se hacía a través una tecnología para el aprovechamiento de agua de lluvia, el agua era recogida en un área de 100 a 200 m² y almacenada en cisternas llamadas "Chultuns", estas cisternas tenían un diámetro aproximado de 5 m, y eran excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso.

En Cerros, una ciudad y centro ceremonial que se encuentra en el actual Belice, los habitantes cavaron canales y diques de drenaje para administrar el agua de lluvia y mediante un sistema de depósitos, estos permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca cuando escaseaba el agua potable (año 200 d. C.). En otras zonas de las tierras bajas, como en Edzná, en Campeche, los pobladores precolombinos de esta ciudad construyeron un canal de casi 50 m de ancho y de 1 m de profundidad para aprovechar el agua de lluvia, este canal proporcionaba agua para beber y regar los cultivos (Ballén-Suárez et al., 2006).

En la actualidad las experiencias internacionales demuestra que los sistemas de captación de agua de lluvia representan una solución para hacer frente a la creciente escasez de agua en zonas rurales y urbanas: En la República Popular de China, se resolvió el problema de abastecimiento de agua a 5 millones de personas con la aplicación de estas tecnologías. En Bangladesh se detuvo la intoxicación por arsénico con la utilización de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico. En Tailandia se construyeron 10 millones de cisternas. Brasil tiene un programa para la construcción de un millón de cisternas rurales. En España, Islas Vírgenes, Islas Caicos y Turkos, Tailandia, Singapur y Japón entre otros, existe un marco legal y normativo que obliga a la captación de agua de lluvia de los techos (Anaya-Garduño, 2004).

En México el crecimiento exponencial de la ciudad ha puesto una presión insostenible sobre las fuentes tradicionales de agua. La sobreexplotación de los acuíferos ha causado, en tan sólo el último siglo, 9 metros de hundimiento en la Ciudad de México; por otro lado el sistema Lerma-Cutzamala consume más energía para traer agua a la ciudad que iluminar toda la ciudad de Puebla. Mucha del agua utilizada en la ciudad de México está causando conflictos con las poblaciones del Estado de México que sufren





carencia de agua mientras ven sus reservorios llevados a la capital, la cual sufre de escasez de agua en un 36% de sus viviendas y cada año más viviendas están sujetas a recortes en el suministro.

Sin embargo, la crisis en el Valle de México no se debe a una falta real de agua. Cada año, lluvias torrenciales caen sobre la ciudad, haciendo de las calles; caudalosos arroyos, saturando el drenaje, e inundando colonias enteras, fenómeno que nos recuerda que la cuenca estaba dominado por grandes lagos. En la Ciudad de México (CDMX) hay abundancia natural de agua, pero mal administrada. El problema es que se ha perdido la relación con el recurso hídrico así como con sus ciclos naturales. Enviando la lluvia al drenaje, mientras se busca traer agua más lejos, sin embargo debería aprovecharse la condición de que el 60% de las viviendas en la CDMX ya cuentan con cisterna (Isla urbana, 2010).

▪ Estudios de la captación de agua de lluvia

La mayor parte de los estudios, sobre la estimación de agua de lluvia sobre una superficie han sido aplicados a cuencas hidrográficas, como el descrito por Linsley, Kohler, & Paulus (1977), Mario, Demetrio, & Rodiberto (2010), SIAPA (2014), Aparicio-Mijares (1992), Chereque-Morán (1989) y Fattorelli & Fernández (2011).

Algunos casos prácticos sobre el uso de la captación de agua de lluvia, es en el procesamiento en un beneficio de café (José Andrés, 2016). En el almacenamiento de agua en depresiones y conservación de la humedad en terrenos agrícolas (Critchley & Siegert, 1991), (FAO, 2014), (Mekdaschi-Studer & Liniger, 2013), aplicado a obras de conservación y usos en la agricultura, (Critchley, Siegert, & Chapman, 1991). Para abastecimiento de agua en el hogar (Basán-Nickisch, Sánchez, Tosolini, Tejerina-Díaz, & Jordan, 2018). Uno de los procesos que ha llevado a cerrar el ciclo del proceso de la captación de agua de lluvia y la purificación del agua, se describen por Pérez Hernández, Palacios Vélez, Anaya Garduño, & Tovar Salinas (2018) y (Juan-Martínez (2006).

Salinas-Hernández (2015) comparó la instalación de sistemas de captación de agua de lluvia en zonas urbanas y rurales, considerando tres factores: ambiental, social, económico y adopción del sistema



por parte de los usuarios. UNATSABAR, (2001), aparte de los otros factores también incluye el factor técnico.

Caballero-Aquino (2006), propone la metodología para la instalación de captación de agua de lluvia utilizando ferrocemento y la construcción de cisternas rurales por Agua del cielo (2010). Así como considerar el proceso de producción en comunidades marginadas de zonas áridas, como un modelo de desarrollo integral rural para producción agrícola y uso doméstico (Aurelio Pedroza-Sandoval, Chávez-Rivero, Trejo-Calzada, & Ruíz-Torres, 2014).

Uno de los estudios que recolecta información relevante sobre el análisis para los diferentes usos de agua en el hogar y en las ciudades, así como valores de uso en ciudades del mundo. Realiza la comparación entre tamaños de viviendas y zonas urbanas así como el área a captar y la demanda diaria por año en cada tipo de edificio. Genera un modelo de la demanda de acuerdo a los usos de agua en el hogar y lo representa en forma matemática. Genera el potencial de lluvia en una subcuenca y el volumen almacenado. Se aplica la consideración de la dureza del agua como un factor importante para los análisis ambientales y económicos del uso del agua de lluvia en el hogar (Morales Pinzón, 2012).

Zunun-Bartolome (2009), describe el procedimiento para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico, enumerando las ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia.

▪ **Ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia para la agricultura urbana**

La captación de agua de lluvia para el uso de la agricultura urbana presenta las siguientes ventajas, (OPS, OMS, CEPIS, & COSUDE, 2004):

- Alta calidad físico química del agua de lluvia, (Isla urbana, 2017).
- Sistema independiente y por lo tanto ideal para estructuras dispersas y alejadas, entre sí.
- Empleo de mano de obra y materiales locales, para la captación.

- No requiere energía para la operación del sistema de captación.
- Fácil de mantener el sistema, únicamente se requiere de limpieza al inicio de las primeras lluvias.
- Comodidad, nula mano de obra y ahorro de tiempo en la recolección.

Uno de los estudios para relacionar el costo beneficio que puede aportar la captación de agua en la ciudad de Morelia, descrita por Arroyo-Zambrano (2013), determina que se logra un ahorro del 1 al 3% si se aplica estos sistemas, la disminución del bombeo para suministro.

En el estudio realizado por Ortiz-Moreno, Arroyo-Zambrano, & Fuentes-Gutiérrez (2015) para el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), se realizó un análisis considerando el índice energético, hídrico, social, económico y urbanístico. Determinando que tendrá un 21% de satisfacción del requerimiento de agua diario, siendo una alternativa para el usuario.

A su vez las desventajas de este método de abastecimiento de agua son las siguientes (OPS et al., 2004):

- Alto costo inicial que puede impedir su implementación por parte de las familias de escasos recursos económicos.
- La cantidad de agua captada depende de la precipitación del lugar y del área de captación.
- En zonas urbanas, por la falta de espacio para la captación, se restringe a los espacios disponibles del usuario, que muchas ocasiones es limitado.

5.3.2 Materiales y métodos

En la descripción de materiales, se presenta la ubicación de la zona de estudio, la descripción general de los equipos y herramienta menor.

1. Zona de estudio

La investigación se realizó en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ubicado en Calle Paseo Cuauhnáhuac, No. 8532, Colonia Progreso, Municipio de Jiutepec, Morelos (Figura 5.12). En los edificios A1 (anexo 1) y edificio 2 (Figura 5.13).



Figura 5.12 Ubicación del IMTA, Jiutepec, Morelos, México



Figura 5.13 Ubicación de los edificios A1 y 2, en el ortomosaico del IMTA

2. Equipo

Equipo utilizado: dron DJI Phantom 4 pro, cámara digital, computadora, flexómetro y cinta de 100 m.

3. Metodología

La metodología se divide en las fases: fotogrametría, meteorología y estimación del volumen de escurrimiento (Figura 5.14).

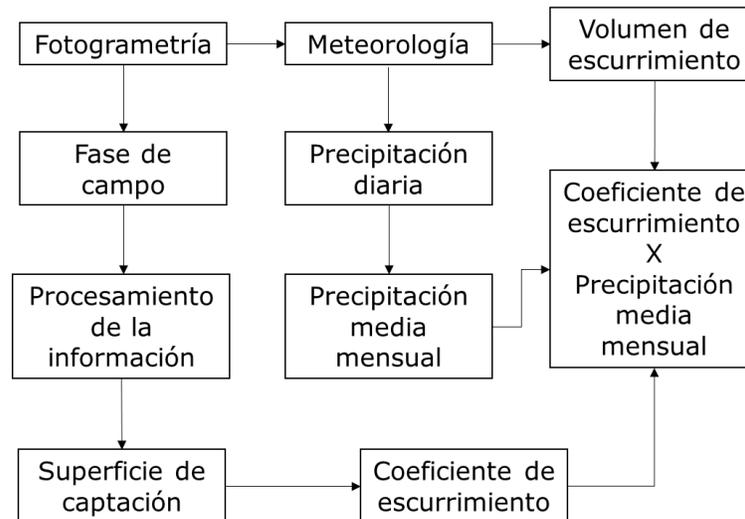


Figura 5.14 Metodología para determinar el volumen de escurrimiento, para captación de agua de lluvia en agricultura urbana

a. Fotogrametría

El proceso fotogramétrico, consiste en la recolección de imágenes, obtenidas con el Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), Figura 5.15.



Figura 5.15 Imágenes del equipo: a) fuselaje, b) control, c) carga útil y d) zona de despegue

El trabajo consistió en volar dos edificios, los cuales se presentan en la Figura 5.13, para el edificio el edificio A1 (anexo 1), se colectaron 39 imágenes con una capacidad de memoria de 187 Mb, con una altura de vuelo de 30 m, un traslape del 80% entre imágenes abarcando una superficie en terreno de vuelo de 42mX80m, una longitud de vuelo total de 314 m, distribuida en 4 líneas de vuelo y un tiempo de vuelo de 3 minutos 40 segundos, resultando una resolución de pixel de 0.82 cm.

Para el edificio 2, se colectaron 58 imágenes, con una capacidad de memoria de 278 Mb, con una altura de vuelo de 30 m, un traslape del 80% entre imágenes abarcando una superficie en terreno de vuelo de 57mX97m, una longitud de vuelo total de 484 m, distribuida en 5 líneas de vuelo y un tiempo de vuelo de 4 minutos 33 segundos, resultando una resolución de pixel de 0.82 cm.

El procesamiento, se realizó con el software Agisoft Metashape Pro versión 1.5 de prueba, (Agisoft, 2019) para obtener el ortomosaico y el modelo digital de superficie, en el cual se obtuvieron las medidas de los edificios en planta, de los elementos de interés para definir las áreas de captación de agua de lluvia (Figura 5.16).



Figura 5.16 Ejemplo de comparación de longitudes: a) medición real y b) medición obtenida en el ortomosaico, mediante el VANT

A partir de la comparación de las longitudes obtenidas en campo y las obtenidas en el ortomosaico, se obtuvieron los datos que se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Comparación entre las longitudes medidas y obtenidas en el ortomosaico para los edificios A1 y 2

No.	Edificio A1 (Anexo 1)				Edificio 2 (Riego y drenaje)			
	Long. medida (m)	Long. ortomosaico (m)	Descripción	Dif. (m)	Long. medida (m)	Long. ortomosaico (m)	Descripción	Dif. (m)
1	51.17	51.00	Edificio cara oeste	0.17	12.80	12.90	Edificio cara este	-0.10
2	6.30	6.40	Edificio cara sur	-0.10	15.50	15.60	Edificio cara norte	-0.10
3	29.30	29.40	Edificio cara este	-0.10	1.78	1.79	Edificio cara oeste	-0.01
4	3.20	3.10	Edificio cara sur	0.10	28.68	28.80	Edificio cara norte	-0.12
5	7.30	7.14	Edificio cara este	0.16	12.80	12.80	Edificio cara oeste	0.00
6	8.00	7.96	Edificio cara sur	0.04	30.26	30.40	Edificio cara sur	-0.14
7	2.10	2.21	Edificio cara oeste	-0.11	1.95	1.87	Edificio cara este	0.08
8	14.40	14.20	Edificio cara sur	0.20	14.00	14.00	Edificio cara sur	0.00
9	6.50	6.55	Edificio cara este	-0.05	4.64	4.58	Cuarto de máquinas cara sur	0.06
10	14.00	14.10	Edificio cara norte	-0.10	7.40	7.46	Cuarto de máquinas cara este	-0.06
11	1.70	1.68	Edificio cara oeste	0.02	4.32	4.35	Distancia del punto no. 6 a no.10	-0.03
12	11.50	11.50	Edificio cara norte	0.00	2.74	2.75	Cuarto de tanque de agua cara este	-0.01
13	13.30	13.30	Edificio cara oeste	0.00	4.16	4.20	Cuarto de tanque de agua cara sur	-0.04
14	5.10	5.05	Edificio cara norte	0.05	1.49	1.40	Altura de la estructura	0.09
15					7.93	7.59	Altura total del edificio	0.34

Para comparar los datos, de la longitud medida contra la longitud obtenida en el ortomosaico, se aplicó el estadístico del coeficiente de determinación (R^2) y el ajuste de la ecuación lineal de tendencia (Figura 5.17).

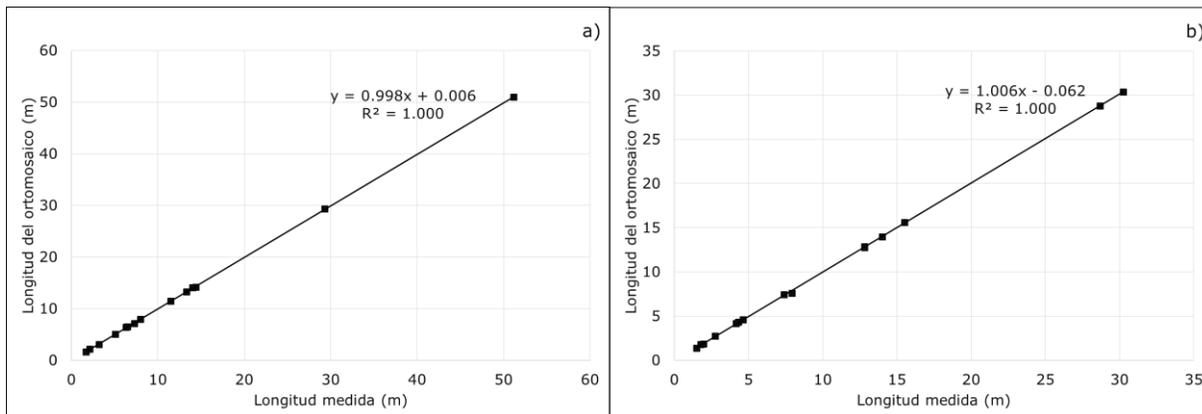


Figura 5.17 Comparación entre las longitudes medidas y las obtenidas en el ortomosaico por el VANT: a) edificio A1 (Anexo 1) y b) Edificio 2 (Riego y Drenaje)

Como se aprecia en las gráficas de la Figura 5.17, existe una buena confiabilidad en el modelo de determinar la geometría del área de captación de agua de lluvia, a través del uso del VANT para estimar el área de captación.

5.3.3 Precipitación y agro meteorología

A partir de la información de precipitación diaria, de la estación meteorológica con clave 17071 denominada Progreso IMTA, que se encuentra en las instalaciones del IMTA, con coordenadas (X= 99° 9'31"O, Y= 18°53'04"N, Z= 1,372.2 msnm). Esta información se obtuvo de SMN (2017) y de los datos actualizados que se toman directo del registro diario de la estación. Con información del 05/01/1982, al 22/05/2019, generando con ello una matriz de 13,651 días. A partir de esa información, se calculó la precipitación media mensual y anual (Figura 5.18).

Las ecuaciones que representan el análisis de la precipitación a partir del datos diarios, se presentan de la ecuación 10 a la 15, siendo esta la base para el análisis de la precipitación media mensual y anual (Chávez, 2010):

Precipitación diaria, día i , mes j , año k , en mm:

$$Pr_{ijk} \tag{10}$$

Precipitación mensual del año k :



$$Pr_{jk} = \sum_{i=1}^{NDM_j} Pr_{ijk} \quad (11)$$

Precipitación anual del año k :

$$Pr_k = \sum_{j=1}^{12} Pr_{ijk} \quad (12)$$

Precipitación media mensual, mes j :

$$\overline{Pr}_j = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Pr_{jk}}{NAR} \quad (13)$$

Precipitación promedio mensual:

$$\overline{Pr} = \frac{\sum_{j=1}^{12} Pr_j}{12} \quad (14)$$

Precipitación media anual:

$$\overline{Pr}_{anual} = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Pr_k}{NAR} \quad (15)$$

Donde:

Pr_{ijk} = Precipitación del día i del mes j , año k , en mm.

i = Número del día del mes j ($i = 1, 2, 3, \dots, NDM_j$).

j = Número de mes ($j = 1, 2, 3, \dots, 12$).

k = Número de año ($k = 1, 2, 3, \dots, NAR$).

NDM_j = Número de días del mes j , (28, 29, 30 ó 31).

NAR = Número de años de registro.

En algunos estudios se calcula la probabilidad para estimar la disponibilidad de la precipitación, en un área, procedimiento descrito en FAO (2014) y Pizarro et al. (2015).

Obteniendo con ello la siguiente: precipitación media mensual, promedio y media anual, Figura 5.18.



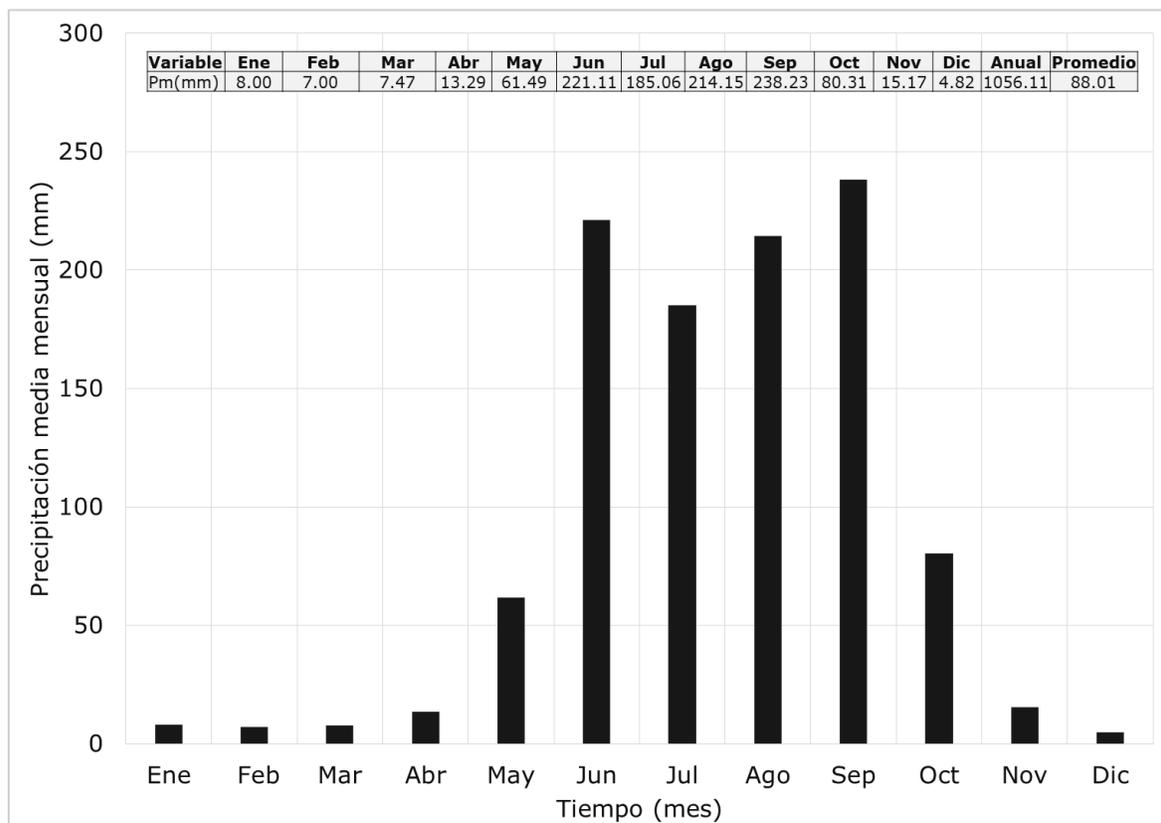


Figura 5.18 Precipitación media mensual en la estación meteorológica, período 1982-2019

En la Figura 5.18, observa que la distribución de la precipitación para la época seca se presenta en los meses de noviembre-abril y la época húmeda de octubre-mayo, presentando en la época húmeda una variación de la nominada sequia intraestival, de junio-septiembre, siendo menor la precipitación en julio. Para el periodo húmedo se comparó con la precipitación promedio en la república mexicana la zona se encuentra por arriba del promedio, considerando que en el año se dispone de 1,056 mm de precipitación.

- **Coefficiente de escurrimiento**

La escorrentía superficial (E) provocada por una lluvia puede compararse con la precipitación (P) del evento. Al cociente entre ambos valores se denomina coeficiente de escurrimiento (Ce), Ecuación 16 (Monsalve-Sáenz, 1995), (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006), (Martínez de Azagra-Paredes, 2006) y (FAO, 2013).

$$Ce = \frac{E}{P} \quad (16)$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento, adimensional 0 a 1.

E = Escurrimiento expresado en lámina, mm.

P = Precipitación, mm.

El coeficiente de escurrimiento depende de numerosos factores como: del tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de su cantidad, de su intensidad y distribución en el tiempo; de la humedad inicial de la superficie; del tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, material, grado de compactación, pendiente, relieve, rugosidad), del tipo de cobertura vegetal existente; de la intercepción que provoque; del lapso de tiempo (minutos, horas, días, meses, año). El coeficiente de escurrimiento al tratarse de una proporción, toma valores entre 0-1, siendo 1 el indicativo de que todo lo que precipita escurre y el valor de 0, que por el total de la precipitación, todo se retiene en el área de estudio (Martínez de Azagra-Paredes, 2006).

En el caso de la lluvia, su intensidad resulta fundamental en el proceso de producción de escorrentía superficial. No así para el granizo y la nieve, pues es la velocidad de fusión quien regula el fenómeno. El tipo de terreno influye sobre el valor de Ce . Las dos propiedades físicas del suelo que mejor explican la formación de escorrentía superficial durante un aguacero son la capacidad de infiltración y la permeabilidad de la superficie (Martínez de Azagra-Paredes, 2006). Así, se puede definir el coeficiente de escorrentía instantáneo $Ce(t)$, Ecuación 17.

$$Ce(t) = \frac{i(t)-f(t)}{i(t)} \quad (17)$$

Donde:

$i(t)$ = Intensidad de lluvia en el instante t .

$f(t)$ = Tasa de infiltración en dicho instante t .

La humedad inicial del suelo y su evolución a lo largo de la precipitación influyen notablemente, en el proceso del escurrimiento. La tendencia decreciente de la tasa de infiltración hasta alcanzar un valor asintótico que se relaciona con la permeabilidad (o conductividad hidráulica) del terreno.

En los primeros minutos de un episodio de lluvia, la intercepción altera la intensidad del aguacero que incide sobre el suelo, de manera que si hacemos intervenir este efecto en la definición del coeficiente de escorrentía instantáneo, (Martínez de Azagra-Paredes, 2006) se representa, Ecuación 18.

$$Ce(t) = \frac{i(t)-i_t(t)-f(t)}{i(t)} \quad (18)$$

Donde:

$i_t(t)$ = Intercepción instantánea.

La presencia de vegetación, su densidad, estructura, altura, tiempo de instalación y permanencia son determinantes en el proceso de infiltración (o a la inversa formación de escorrentía superficial).

Otro de los factores que en techos se tiene es la pendiente. Si la pendiente aumenta el coeficiente de escorrentía, pues una misma microtopografía embalsa más agua en terrenos tendidos que en terrenos empinados. A su vez, al aumentar la escorrentía superficial, crece la erosión hídrica, que lima el microrelieve del terreno, alisando la superficie y reduciendo las microdepresiones. Ambos motivos explican la dependencia del coeficiente de escurrimiento (Ce) de la pendiente. Los dos efectos señalados no inciden en superficies prácticamente lisas (tejados, zonas asfaltadas, etc.), de manera que en tales superficies no se considera la dependencia.

El lapso de tiempo al que se refiere el coeficiente de escorrentía hace variar su valor (y hasta su significado). Así, el coeficiente de escorrentía instantáneo $Ce(t)$, de coeficiente de escorrentía instantáneo máximo $máx(C(t))$; de coeficiente de escorrentía medio; de coeficiente de escorrentía anual, etcétera.

El coeficiente de escorrentía instantáneo es nulo desde el comienzo del aguacero hasta que se alcanza el tiempo de encharcamiento. Sus máximos instantáneos corresponden con los momentos de máxima intensidad de lluvia y con las partes finales del evento (en las que la superficie muestra la menor tasa de infiltración, al estar muy húmedo) (Martínez de Azagra-Paredes, 2006). El coeficiente de escorrentía medio ($Ce_m(t)$) se define mediante la integral, Ecuación 19.

$$Ce_m(t) = \int_0^t Ce(t) dt = \int_0^t \frac{i(t) - i_t(t) - f(t)}{i(t)} dt \quad (19)$$

Representa el coeficiente de escorrentía medio desde el comienzo del evento de lluvia ($t = 0$) hasta un instante dado t . Para una lluvia de intensidad constante va en aumento según transcurre el tiempo, tomando el valor máximo al final del episodio de lluvia. El comportamiento del coeficiente de escorrentía medio para aguaceros intensos reales (en los que $i(t) \neq cte$) suele ser similar. A su vez, dicho coeficiente toma valores mayores, cuanto mayor es el evento de lluvia (o dicho de otra manera: cuanto mayor sea su periodo de retorno).

Sin embargo han existido métodos que se han enfocado en calcular el coeficiente de escurrimiento máximo, obtenidos a partir de los caudales máximos en cuencas, en lugar de utilizar los volúmenes superficiales y de infiltración por evento, lo que lleva a existir valores más altos de Ce que Ce promedio. Esta diferencia de concepto ha llevado a desprestigiar el método racional, con relación a los diferentes métodos de obtención de volúmenes de escurrimiento. Sin embargo para los análisis de obtención de los volúmenes de captación de agua de lluvia para uso en la agricultura urbana, nos enfocaremos a los coeficientes de escurrimiento promedio, para dar mayor precisión al método.

En estudios de las áreas de captación, pueden existir cubiertas por más de un tipo de superficie (áreas compuestas), ya que combinan diferentes tipos de material, por lo que en esos casos, es necesario aplicar el promedio ponderado por área, a partir de

cada área individual y su coeficiente de escurrimiento asignado (Campos-Aranda, 2010), (SCT, 2000), (Chow, Maidment, & Mays, 1994) y (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006) Ecuación 11.

$$Ce = \frac{\sum_{i=1}^n Ce_i * a_i}{A} \tag{20}$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional 0 a 1.

Ce_i = Coeficiente de escurrimiento del área individual, adimensional 0 a 1.

a_i = Área individual, m².

A = Área total de la superficie de captación, m².

n = Número de áreas individuales consideradas, entero positivo consecutivo 1, 2,...

En la Tabla 5.6 se presentan los valores de Ce que más se utilizan en la estimación de la captación de agua de lluvia.

Tabla 5.6 Coeficientes de escurrimiento para captación de agua de lluvia

Tipo	Coeficiente de escurrimiento	Fuente
Concreto	0.6-0.9	(CONAGUA, 2016)
Pavimento	0.5-0.6	(Pizarro et al., 2015)
Geomembrana (PVC)	0.85-0.95	(CONAGUA, 2016)
Azulejos, teja	0.8-0.9	(CONAGUA, 2016), (OPS, OMS, & CEPIS, 2003), (Solano, Gonzaga, Espinoza, & Espinoza, 2017)
Lámina acanalada	0.7-0.9	(CONAGUA, 2016), (OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)
Calles asfaltadas	0.85	(Secretaría de economía, 2013)
Adoquinado o empedrado con cemento	0.75	(Secretaría de economía, 2013)
Terrazas	0.6	(Secretaría de economía, 2013)
Adoquín sin juntas	0.6	(Secretaría de economía, 2013)
Terracerías	0.4	(Secretaría de economía, 2013)
Tejado duro inclinado	0.8	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet, Oró, Tormo, Cinta-Pastor, & González, 2016)
Tejado plano sin gravilla	0.8	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado plano con gravilla	0.6	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado verde intensivo	0.3	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado verde extensivo	0.5	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)

Superficie empedrada/superficie con empedrado compuesto	0.5	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Revestimiento asfáltico	0.8	(ESPA. Innovative Water Solutions, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Madera	0.8-0.9	(OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)
Paja	0.6-0.7	(OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)

Aunque cabe aclarar que en algunas referencias como ESPA. Innovative Water Solutions (2002) presenta el concepto de coeficiente de escurrimiento con el de coeficiente de rendimiento de la superficie de captación.

A partir del proceso de la generación del ortomosaico, georreferenciado en UTM 14N, se determinaron las áreas de captación, asignando así los coeficientes de escurrimiento para cada área, y obtener el coeficiente de escurrimiento ponderado por área, aplicando la Ecuación 13. Como se aprecia existe una diferencia entre el coeficiente de escurrimiento promedio y el ponderado por área, Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Asignación del coeficiente de escurrimiento a cada área de captación de agua de lluvia

Variable	Edificio A1 (Anexo 1)		Edificio 2 (Riego y drenaje)	
Ce_1	0.90	Tragaluz de policarbonato	0.90	Lámina acanalada
Ce_2	0.80	Superficie revestida	0.70	Concreto
Ce_3			0.80	Superficie revestida
$Ce_{promedio}$	0.85		0.80	
$Ce_{ponderado}$	0.80		0.80	
A_1	12.00	Tragaluz de policarbonato	38.77	Lámina acanalada
A_2	454.06	Superficie revestida	11.97	Concreto
A_3			521.21	Superficie revestida
A_{Total}	466.06		571.95	

Ce = Coeficiente de escurrimiento, adimensional; A = Área, m².

A partir de la información del coeficiente de escurrimiento ponderado, tanto para el edificio A1 (Anexo 1) y el edificio 2 (Riego y drenaje) presentan un valor de 0.8, con una superficie de 466.06 m² y de 571.95 m², respectivamente, superficie que será necesaria considerar en el cálculo de volumen potencial para captación de agua de lluvia.

Volumen de escurrimiento

Para calcular el volumen de escurrimiento, se obtiene con la Ecuación 12.

$$V_{jk} = C_{eponderado} * A_{Total} * Pm \tag{21}$$

Donde:

V_{jk} = Volumen medio mensual potencial a captar, m³.

$C_{eponderado}$ = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional.

A_{Total} = Área total de captación, m².

Pm = Precipitación media mensual, m.

A partir de las ecuaciones anteriores, se calcula el coeficiente de escurrimiento para cada área de captación de agua de lluvia en cada edificio, Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Volumen de escurrimiento mensual para el edificio A1 y 2

Edificio Variable	A1 (Anexo 1)			2 (Riego y drenaje)		
	Pm (mm)	Pm (m)	Vol. Esc. (m ³)	Pm (mm)	Pm (m)	Vol. Esc. (m ³)
Ene	8.00	0.01	2.99	8.00	0.01	3.68
Feb	7.00	0.01	2.62	7.00	0.01	3.22
Mar	7.47	0.01	2.79	7.47	0.01	3.44
Abr	13.29	0.01	4.97	13.29	0.01	6.12
May	61.49	0.06	23.00	61.49	0.06	28.30
Jun	221.11	0.22	82.71	221.11	0.22	101.76
Jul	185.06	0.19	69.22	185.06	0.19	85.17
Ago	214.15	0.21	80.10	214.15	0.21	98.56
Sep	238.23	0.24	89.11	238.23	0.24	109.64
Oct	80.31	0.08	30.04	80.31	0.08	36.96
Nov	15.17	0.02	5.67	15.17	0.02	6.98
Dic	4.82	0.00	1.80	4.82	0.00	2.22
Anual	1,056.11	1.06	395.04	1,056.11	1.06	486.07
Promedio	88.01	0.09	32.92	88.01	0.09	40.51

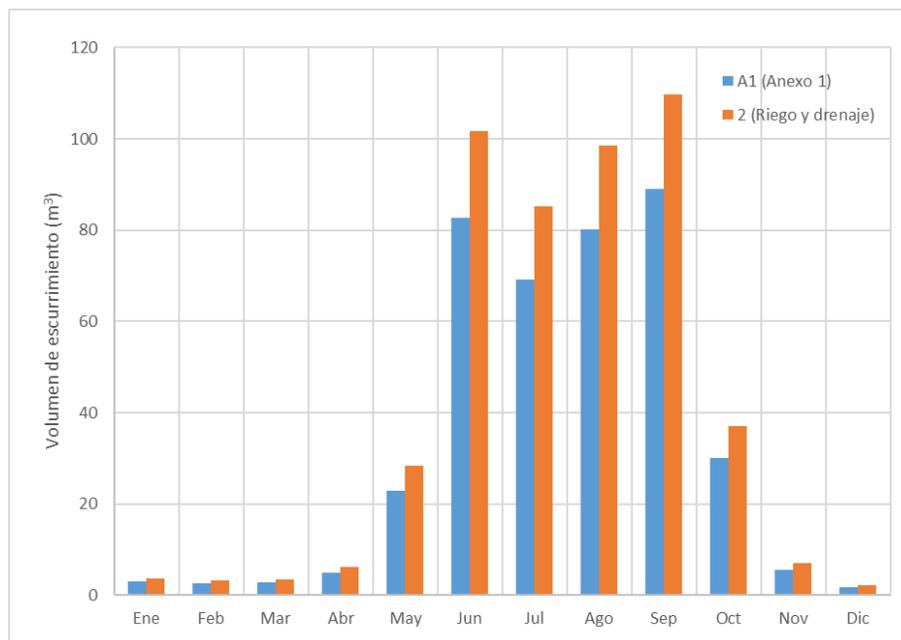


Figura 5.19 Escurrimiento medio mensual para captación de agua de lluvia, en los edificios A1 y 2

Como se aprecia en la Figura 5.19, los meses en donde se presenta la menor capacidad para captar agua de lluvia en los edificios A1 y 2, ubicados en la localidad de Progreso, Jiutepec, Morelos, son los meses de noviembre-abril, que corresponden a la época de secas, y los meses de mayo-octubre los meses húmedos. Teniendo el máximo en septiembre, ya que este proceso depende de la disponibilidad de precipitación.

5.3.4 Resultados y discusión

Para el caso de la agricultura urbana el periodo húmedo para producir sería el periodo de mayo-octubre para obtener el mayor potencial de producción y considerar que esta limitante ubica a la producción en la misma condición que presenta la agricultura de temporal, ya que depende de la disponibilidad de la precipitación en el tiempo, sin embargo suma una condición de las estructuras de almacenamiento que permite amortiguar el



estrés hídrico, es por ello que la relación del volumen del almacenamiento es la función óptima y estará sujeta a la demanda.

A partir de la disponibilidad del volumen de agua que el temporal provee, el módulo de agricultura urbana que puede suministrarse, será de las siguientes dimensiones: para el edificio A1 con una capacidad de almacenamiento total de 395.04 m³ y para el edificio 2 con 486.07 m³. Sin embargo con el afán de optimizar la inversión se considera la operación misma del sistema lo que lleva hacer un manejo integral del sistema de oferta y demanda. Ya que no es necesario tener la dimensión total anual, debido a que se requiere de una programación de producción y de disponibilidad diaria del sistema.

Por lo que es necesario considerar un buen diseño agronómico, para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos a producir y con ello proponer el tamaño óptimo de almacenamiento considerando que la época crítica para el almacenamiento se daría de noviembre-abril (6 meses).

El resultado final de estos estudios, complementan la información para llegar al diseño, de los sistemas de captación de agua de lluvia (OPS et al., 2003), considerando las partes que conforman de acuerdo a Isla urbana (2017) son: techo, bajantes, canaletas, tlaloque, filtro de hojas, cisterna y filtros. Por lo que este estudio, sobre la determinación de la captación de agua de lluvia, permite estimar el volumen de agua disponible en forma mensual, identificando la época húmeda de la seca.

5.3.5 Conclusiones

Este estudio aporta una de las fases iniciales para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia, que consiste en la estimación de volumen de escurrimiento, estructurada la metodología en las fases: fotogrametría, meteorología y estimación del volumen de escurrimiento.

En la fase fotogramétrica se introduce las ventajas que tienen el uso de VANT, para obtener dos datos fundamentales como es la geometría y el tipo de superficie, teniendo una alta correlación con valores de $r^2=0.99$ para la geometría, comparando los datos medidos con los estimados en el ortomosaico, identificando que la variable X, Y, tiene mejor respuesta con relación a los valores





de Z, obtenidos en la malla de puntos del modelo digital de elevación.

Se considera que este tipo de herramientas permiten analizar estructura urbana, para identificar rasgos geométricos que se utilizan en el diseño de sistemas de captación. Con la resolución de las imágenes obtenidas por los VANT, se puede observar a gran detalle a nivel de cm, los tipos de superficie que se pueden localizar en los techos, que son las estructuras básicas para la captación de agua de lluvia y asignar un coeficiente de escurrimiento variable a cada área, recurriendo con ello al coeficiente de escurrimiento ponderado.

En la fase meteorológica se analizó la información de la matriz de la precipitación diaria hasta llegar a los promedios mensual con 88 mm y anual de 1056 mm, que son un estimado de la capacidad de la zona para almacenar esa precipitación efectiva. Y con la estimación del volumen de escurrimiento, se determinó el potencial de almacenamiento, para el edificio A1 con una capacidad de almacenamiento total de 395.04 m³ y para el edificio 2 con 486.07 m³.

Este estudio genera las bases de diseño de estos sistemas y permite enfocarlos a la producción de la agricultura urbana, tema que, por el crecimiento poblacional y el cambio climático, es una técnica que se ha estado implementando como política pública y en el diseño de la infraestructura verde, por su enfoque equilibrado con el medio ambiente.





6 VIABILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA PARA IMPLANTAR CULTIVOS VERTICALES EN ZONAS URBANAS

6.1 Viabilidad técnica

Las prácticas agrícolas urbanas no son recientes y han formado parte siempre del paisaje urbano. Los huertos urbanos han ido ganado importancia y adquirido nuevas características relacionadas tanto con la soberanía alimentaria, la calidad de los productos que se consumen y la generación de empleo, influyendo en una mejor calidad de vida, educación ambiental, relaciones sociales, y opciones de regeneración urbana (Zaar, 2011).

Entre las razones que dieron origen la implantación de sistemas no convencionales para la producción de cultivos resaltan: i) la necesidad de satisfacer la demanda en las ciudades, ii) evitar el costo ambiental de su traslado de la parcela a la manzana y iii) reducir al máximo el consumo de recursos principalmente agua y energía en la producción de cultivos. Atendiendo estos tres factores, se definen criterios valorativos para opinar sobre la viabilidad de implantar estos biosistemas en zonas urbanas. Ya en fechas actuales, es notoria la participación ciudadana ejerciendo presión a gobernantes y se colabora en la planificación y creación de nuevos espacios de esparcimiento y desarrolla actividades ecológicas.





Las granjas verticales permiten a los productores aprovechar al máximo el espacio, pero sobre todo les dan la oportunidad de adaptar las condiciones ambientales para que el crecimiento de sus cultivos sea más ágil y eficiente. Además, variables como las plagas o la maleza desaparecen.

Los sistemas automáticos contribuyen en la optimización de los rendimientos según los tipos de cultivos, convirtiéndolas en zonas de producción más efectivas que los invernaderos y más productivas que los propios campos. Por ejemplo, en Japón en 2,300 metros cuadrados de granjas verticales producen 10,000 cabezas de lechuga por día— Esto es el doble de volumen que se obtiene con los métodos tradicionales— y si esto no fuera suficiente, estos espacios construidos hacia arriba utilizan 40% menos energía y 99% menos agua. El modelo es tan exitoso que lo están replicando en Hong Kong, y los gobiernos de Mongolia, Rusia y China esperan hacer lo propio en los siguientes años.

El éxito conseguido se debe a la tecnología que utilizan, la cual controla la temperatura y humedad, pero su mayor logro es el uso de iluminación LED. Gracias a este mecanismo, las plantas crecen hasta dos veces más rápido. El responsable de este éxito es Shigeharu Shimamura, quien fundó Mirai – ‘futuro’ en japonés— y convirtió una antigua fábrica en la granja industrial más grande del planeta.

Otro caso de éxito es Urban Organics, granja ubicada en Minnesota, Estados Unidos. Ellos son pioneros en la reutilización de agua y en el uso de hidroponía, una técnica de cultivo que aprovecha eficientemente el suelo y el agua. Con este método pueden cultivar tres variedades de col rizada, dos diferentes tipos de acelga, perejil italiano y cilantro.





Figura 6.1 Producción intensiva de Lechuga en Hidroponía (iGrow, 2019)

También en Estados Unidos nació Aerofarms, que tiene instalaciones cultivables por más de 14,000 metros cuadrados y que produce 900 toneladas de verduras frescas. Si quisieran alcanzar esta producción en un campo tradicional, tendrían que sembrar 139,000 metros cuadrados.

En Bélgica está Urban Crop, quienes convirtieron 50 metros cuadrados en 500 metros cuadrados de espacio para sembrar. Sus instalaciones producen 220 plantas de lechuga utilizando sólo 5% del agua necesaria en la agricultura tradicional.

El desarrollo de proyectos de granjas urbanas es cada vez más ambicioso. En Suecia, el emprendimiento Plantagon lanzó una campaña para utilizar locales vacíos de las ciudades como espacios para producción de alimentos de forma sostenible y eficiente. Su primera granja la ubicaron en Estocolmo, pero su objetivo es llegar a 10 instalaciones para 2020.

Las nuevas tecnologías se han convertido en una herramienta crítica para solucionar los problemas de distribución de alimentos en las ciudades. En México, apenas se escuchan algunas ideas para avanzar hacia este camino de auto sustentabilidad urbana. (Con información de Web Urbanist y Futurism).



6.1.1 Demanda alimentaria en zonas urbanas

“La ciudad moderna se ha construido contra el campo, generando el antagonismo urbano-rural actual, y ésta es una de las claves fundamentales de la insostenibilidad urbana” (Soler y Renting, 2013).

Existe un notable crecimiento de las ciudades urbanas, dejando áreas de espacios rurales en donde la pobreza está relacionada con la misma. Sin embargo, el desarrollo de estas ciudades rurales ha dado origen a la pobreza en zonas urbanas. Según el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), se estima que la cantidad de pobres en zonas urbanas aumente en un 76%, esta cifra se da por el aumento migratorio de las zonas rurales a la ciudad y el crecimiento económico de las mismas, ya que las oportunidades laborales de una zona rural no van acorde al crecimiento demográfico; los fenómenos naturales, el bienestar social también contribuyen a la expansión de una ciudad.

El crecimiento de las ciudades tiene como causa la industrialización de las mismas, las cuales han relegado, con el paso de los años, las zonas agrícolas, construyendo más ciudades sobre estas y dejando de lado la importancia que la agricultura tenía en la supervivencia del hombre, se tiene esta relación como principio base para pensar en el futuro de la agricultura, ya que son muchos barrios los que están, en su totalidad, consolidados y segregaron por completo los extensos mantos verdes que embellecían la ciudad (FAO, 2010)

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Rural (OCDE), cuando se habla de agricultura periurbana ésta debe ser practicada dentro de un radio de 20 km desde un centro urbano de más de 200,000 habitantes y de 10 km desde una ciudad con una población de entre 50,000 a 100,000 habitantes (ZOOAR, 2011).





6.1.2 Superficies cultivables en zonas urbanas

Tabla 6.1 Países del Mundo por número de habitantes, año 2019

País	Número de habitantes
China	1 395 261 000
India	1 375 898 000
Estados Unidos	329 071 000
Indonesia	266 614 000
Pakistán	216 823 000
Brasil	210 461 000
Nigeria	209 058 000
Bangladés	176 198 000
Rusia	147 043 000
Japón	126 398 000
México	125 357 000
Etiopía	109 395 000
Filipinas	107 041 000

Las Vegas tiene una nueva granja vertical de 30 millones de dólares, su objetivo es producir casi medio millón de kg de producto al año. Al producirse de manera local, los alimentos no tienen que recorrer largas distancias para llegar al consumidor, con el consiguiente ahorro en combustibles fósiles.





Figura 6.2 Cultivo Indoor, iGrow, 2019

Ten en cuenta que la mayoría de los alimentos que se consumen en EEUU viajan entre 2,500 y 3,200 kilómetros antes de llegar a la cesta de los consumidores. Con estas granjas, la empresa promotora Oasis Biotech, asegura que los alimentos solo recorrerán una media de 6 kilómetros. Producción local = menos contaminación = menos huella.

Esta granja no es la primera que se instala en EEUU de estas características, ni la **más grande**, pero si será una de las más grandes gracias a sus 20.000 metros cuadrados de cultivo.

La granja se ubica en una industrial vacía de Las Vegas, usa el sistema de **cultivo hidropónico**, por lo que no necesita tierra. Oasis Biotech usa un ambiente interior controlado y un sistema de iluminación LED para cultivar productos frescos los 365 días del año. Se recicla el 100% de su agua y nutrientes. Usa un 90% de agua menos que los cultivos tradicionales.

Producen cultivos como la lechuga romana y la rúcula, junto con productos gourmet.

En México, se cuenta con ciudades con alta densidad de población, que hace perfecto el desarrollo de sistemas de producción en zonas urbanas; al igual que en las vegas, no solo para la reducción en el consumo de recursos, sino en el gasto que significa el transportarla, y la pérdida en el traslado

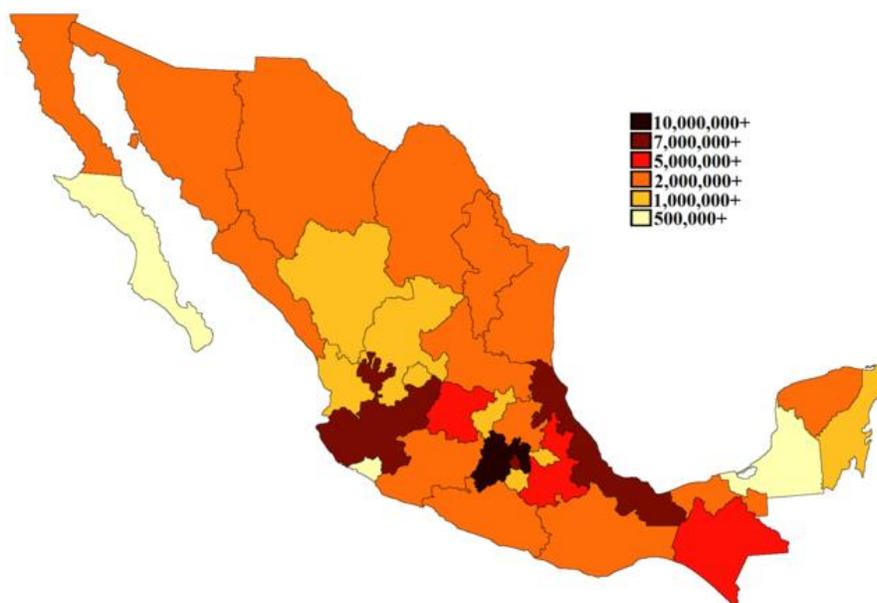


Figura 6.3 Distribución poblacional (CONAPO, 2017)

Las ciudades son por mucho, la más grande obra de construcción del ser humano. Los asentamientos han substituido las zonas de siembra, con lo cual se agudiza el problema de la alimentación, falta de espacios, reducción de recursos, etc. En México la superficie ocupada por los edificios, apartamentos y demás componentes urbanos, pueden ser una fuente de espacios para la producción de plantas comestibles.

Si se considera solo la superficie horizontal, es un recurso que bien vale la pena explorar; mero más aún, si se considera las partes horizontales como techos, jardines y terrazas, pero además las partes verticales, como paredes. La suma de esta superficie constituye un área suficiente para la producción intensiva, como lo indica la tabla 6.2

Tabla 6.2 Superficie de las principales ciudades en CDMX (wikimedia, 2019)

#	Ciudad	Entidad Federativa	Superficie (Km ²)	Superficie (m ²)
1	Ciudad de México	Ciudad de México / México / Hidalgo	2,370	915
2	Monterrey	Nuevo León	958	370
3	Guadalajara	Jalisco	803	310
4	Tijuana	Baja California	466	180
5	Puebla de Zaragoza	Puebla	440	170
6	Toluca de Lerdo	Estado de México	427	165
7	Ciudad Juárez	Chihuahua	363	140
8	Mexicali	Baja California	363	140
9	Santiago de Querétaro	Querétaro	363	140
10	San Luis Potosí	San Luis Potosí	346	133
11	Mérida	Yucatán	272	105
12	Torreón	Coahuila de Zaragoza	259	100
13	Chihuahua	Chihuahua	246	95
14	León	Guanajuato	231	89
15	Saltillo	Coahuila de Zaragoza	220	85
16	Oaxaca de Juárez	Oaxaca	218	84
17	Tampico	Tamaulipas	212	82
18	Cuernavaca	Morelos	207	80
19	Hermosillo	Sonora	207	80
20	Agua Calientes	Agua Calientes	199	77
21	Canoán	Quintana Roo	199	77
22	Morelia	Michoacán	186	72
23	Reynosa	Tamaulipas	181	70
24	Cullacoán	Sinaloa	176	68
25	Veracruz	Veracruz	163	63
26	Tuxtla Gutiérrez	Chiapas	140	54
27	Victoria de Durango	Durango	127	49
28	Acapulco de Juárez	Guerrero	119	46
29	Villahermosa	Tabasco	114	44
30	Xalapa-Enriquez	Veracruz	75	29



6.2 Viabilidad técnica para la implantación de granja vertical

La implantación de sistema de producción en zonas urbanas, contempla el uso eficiente de los recursos, espacio, agua y energía aunado al respeto por el medio ambiente. Una granja vertical (Vertical Farming) es el término que se le da a la práctica de producir alimentos en capas verticales o estructuras verticales, a diferentes escalas desde enormes rascacielos, almacenes en desuso o contenedores de traslado, hasta el departamento o la casa. El objetivo de este texto, es brindar apoyo al lector para construir y operar una granja vertical en casa.

De manera práctica, cuando se habla de vertical farming se refiere al crecimiento de plantas en capas. Este sistema permite mantener de manera sostenible la producción de un cultivo en una superficie interior o exterior de un inmueble mediante una adecuada integración entre:

- El inmueble a intervenir.
- La vegetación escogida.
- El medio de crecimiento.
- Los factores climáticos y ambientales.

Para lograr esta integración, el sistema debe desempeñar 6 funciones básicas:

- 1) Sistema cerrado, sin fugas.
- 2) Contener el drenaje.
- 3) Capacidad de retención de agua en la zona de las plantas.
- 4) Consistente con el biosistema.
- 5) Nutrición continua.
- 6) Filtración de impurezas.

6.2.1 Métodos empleados en granjas verticales

Se han desarrollado diversas metodologías para la implementación de granjas verticales, las cuales incluyen la estructuración en edificaciones como rascacielos, almacenes o estacionamientos o contenedores. A la par, diversas tecnologías han sido sugeridas y otras tantas han logrado establecerse, desde el uso de



invernaderos, en capas, cultivos ligeros, de porte baja, fitoremediación, crecimientos arquitectónicos, hidroponía, etc.

Granja vertical es el resultado de la innovación al esfuerzo para lograr alta productividad, especialmente en la producción de vegetales. Como es natural, esta técnica requiere fuentes que permitan a las plantas crecer verticalmente de manera diferente a los sistemas convencionales, en forma horizontal.

6.2.2 Requerimientos hídricos de los cultivos en zonas urbanas

La evolución en la producción de cultivos, en el contexto que se explora, no puede concebirse con los mismos consumos que tradicionalmente se aplican. Si bien es cierto que el requerimiento hídrico de la planta se mantiene lo cierto es que fuera de este consumo, no debe existir mayor requerimiento. Normalmente un cultivo de lechuga, requiere una lámina de riego de 8 cm; en sistemas verticales, mediante recirculación, el consumo sería de 1 cm.

En el sistema piloto que se experimentó, se implementaron tres subsistemas, raíz flotante, recirculación y sustrato. Para el caso de la raíz flotante, se colocó la bandeja de agua con solución, y cada día se oxigenaba de manera manual. Se cultivaron 18 lechugas en 0.5 m². A pesar de que el nivel de agua se mantuvo, fue complicado estimar con exactitud el consumo, debido a singularidades como la lluvia, pero las lechugas completaron su ciclo con la transpiración de la misma.

En cuanto a los sistemas de recirculación, el consumo fue similar a la balsa, solo que esta se estuvo recirculando y en consecuencia no fue necesario la oxigenación. Las torres verticales con lechugas y albahaca y el modulo cuadrado con la fresa, se les aplico 4 riegos diarios, de 1 minuto cada uno, aproximadamente 1 litro diario.

Diferencias en el modo de cultivar y en la densidad de siembra. La raíz flotante de 18 plantas en medio metro cuadrado, es decir 36 plantas/m². El sistema hidropónico en Tees, 36 plantas en 2.25 m², es decir 16 plantas/ m². El sistema hidropónico en Yees, 54 plantas en 2.25 m², es decir 24 plantas/m². Las Torres con 27





plantas en cada torre, por 4 torres son 108 plantas en 2.25 m², o 48 plantas/m. Finalmente, el modulo cuadrado con 18 plantas en 0.8 m² de fresa, la densidad es de 22 fresas m².

6.2.3 Fertilización

Actualmente existen en el mercado productos "ad hoc" para la producción de cultivos a nivel jardín. En general los requerimientos nutricionales no son diferentes al de los cultivos en campo abierto, acaso lo que cambia será el manejo en el sentido que al haber una recirculación no solo el consumo de agua es mínimo, sino que el de los nutrientes también.

En el entendido de que la planta absorbe el alimento mineral por las raíces en forma iónica, de acuerdo a las necesidades de este, en función de la etapa fenológica en que se encuentra y que estos iones están permanentemente disponibles en la solución, la fertilización consiste en proveer una solución nutritiva completa al inicio del ciclo y estar monitoreando las propiedades de esta durante el ciclo.

Dos parámetros pueden ser suficientes para llevar el seguimiento; potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica. Este fue el procedimiento usado para la fertilización del piloto, se aplicó una solución universal de Steiner al inicio y se estuvo monitoreando el drenaje. Fue necesario actualizar la solución en dos ocasiones. Los valores de conductividad iniciaron en 1 meq l-1 y el pH de 6.5.

6.2.4 Control de plagas y enfermedades

Es necesario el control de plagas y enfermedades. En este caso no se detectaron mayores problemas de plagas, quizá debido al corto tiempo del ciclo de producción y que es el primer ciclo. No obstante si habrá que estar preparado para un sistema de detección y control de plagas cuando es en exteriores.

Debido a que es un cultivo en solución nutritiva, se reducen los riegos de enfermedades.





6.2.5 Reposición de plantas muertas

Es posible que por algún motivo una planta dentro del sistema hidropónico o sustrato vertical muestre síntomas de raquitismo o lento crecimiento, incluso la muerte, dejando un espacio vacío en el diseño, por lo cual se tiene que reemplazar por una nueva planta que irá acompañada con su respectivo cambio del sustrato.





7 CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo actividades para establecer parámetros valorativos en el tema de introducir sistemas de producción hortícolas en zonas urbanas. Estos elementos se abordaron desde el punto de vista teórico, histórico y mediante la implantación de un sistema piloto a semejanza de los establecidos en forma comercial.

Derivado de la integración de información relacionada, se encontró que existe un desarrollo sostenido y con más de 20 años en torno a la agricultura en zonas urbanas. Siendo los últimos 5 años un despunte real a nivel mundial, sobre todo en las economías con mayor poder adquisitivo, acceso a la tecnología, problemas de espacio y alimentación y desde luego, gran visión.

Existen sistemas a gran escala con proyectos nacionales en países como estados unidos, Singapur, Holanda, Japón, etc. Sin embargo, también se han desarrollado sistemas comerciales a baja escala, para producción de verduras, ensaladas y hortalizas tipo gourmet, en un mercado que prefiere productos frescos y libre de gentes inorgánicos.

En México el desarrollo de estos biosistemas, es más bien incipiente, acaso en universidades y centros de investigación, pero definitivamente no extendido en zonas urbanas, mucho menos rurales. Entre las hipótesis que se pueden plantear, pasa por el desconocimiento de la tecnología, falta de política productiva, y quizá la abundancia de recursos naturales como la radiación y a pesar de grandes urbes en el país, aun no es crítico el tema





del espacio para habitar. No obstante, es un hecho la reducción generalizada de zonas de cultivo para convertirse en suelo urbano.

Se implanto un sistema vertical que incluyo y cinco subsistemas de producción en forma vertical, combinando posición, medio de cultivo y forma de cultivar, tales subsistemas fueron, Hidroponía vertical con YESS y horizontal con TEES, hidroponía en balsa o raíz flotante, y sistemas en sustrato, uno en vertical tipo torres y el otro en un módulo con exoesqueleto de herrería.

Los 5 sistemas fueron aptos para desarrollar el cultivo de fresa, lechuga y albahaca en la zona climática de Jiutepec Morelos. Los resultados indican, que un sistema vertical es apto para producir en casas habitación, departamentos y edificio en general. Los inconvenientes de este tipo de tecnologías, están en función del grado de tecnificación, para subsistemas rústicos, es necesario un conocimiento mínimo del proceso de producción. A medida que se tecnifica, además del cultivo se requiere de otras habilidades.

Los resultados obtenidos indican una producción sostenida de estas plantas, a un bajo costo, básicamente los fertilizantes, debido a que más del 80 % del agua se recicla, o en su caso es factible cosechar de las azoteas, no necesita suelo, no hay malezas, es un sistema viable en exteriores en zonas urbanas.

En esta primera etapa se evaluó la viabilidad de su implantación, en una futura investigación será oportuno evaluar las características de las plantas, como peso, tamaño para relacionar la productividad con otros biosistemas. Si bien es cierto que con el uso de este tipo de tecnologías de producción agrícola es factible cubrir gran parte de las necesidades de alimentación que demanda la población, y que además es viable reducir la contaminación ambiental al disminuir el consumo de combustibles al producir y distribuir los alimentos en las ciudades donde se localiza el grueso de la población; también es importante considerar el factor agua, ya que para producir éstos se requiere agua, luego entonces se recomienda continuar desarrollando y





evaluando este tipo de tecnologías con la utilización de aguas residuales tratadas.





8**REFERENCIAS**

- Agisoft. (2019). *Agisoft Metashape Pro*. Retrieved from <https://www.agisoft.com/>
- Agua del cielo. (2010). *Cisternas para el Agua: manual de construcción*. Retrieved from <http://ecotec.unam.mx/Ecotec/wp-content/uploads/ManualDeConstruccion.pdf>
- Anaya-Garduño, M. (2004). *Centro internacional de demostración y capacitación en aprovechamiento del agua de lluvia (CIDECALL)*. Retrieved from <http://www.colpos.mx/ircsa/cidecall/odcs/carpeta.pdf>
- Aparicio-Mirajes, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Primera re; Editorial Limusa, Ed.). México, D.F.
- Arroyo-Zambrano, T. I. (2013). *Colecta de agua pluvial como medida para el uso eficiente de la energía y reducción de emisiones de CO₂e análisis económico y ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Aurelio Pedroza-Sandoval, Chávez-Rivero, J. A., Trejo-Calzada, R., & Ruíz-Torres, J. (2014). Sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) y bioproductividad en comunidades marginadas de zonas áridas. *Impluvium, I*(No. 1), 41. Bermejillo, Dgo.
- Ayuso, A. (2016). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE UN JARDÍN VERTICAL DE INTERIOR*. Madrid : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA.
- Baiche, B. (2001). Information, and how to deal with it. En *N. Nalliman Your research project (Ed.)* (págs. 40-68). Londres, Inglaterra: Sage.
- Broto, C. (2016). *Jardines verticales : manual práctico y 42 proyectos*. México: Links Books.
- Enríquez , H. (2004). *Guía para el diseño de instalaciones eléctricas residenciales, industriales y comerciales*. México: Limusa.
- Microsoft. (10 de Enero de 2013). *Windows*. Recuperado el 05 de 05 de 2014, de <http://windows.microsoft.com/es-mx/windows/home>
- Minke, G. (2014). *Muros y fachadas verdes, jardines verticales : sistemas y plantas, funciones y aplicaciones*. México: Icaria editorial.
- Olivera Ramos, R. (2017). *Internet of Things Programming with JavaScript*. Mumbai: Packt.
- Perez, C. A. (2014). *Por que los hombre aman a las México: UTEZ.*



Poza, A. (2017). *ACONDICIONAMIENTO BIOCLIMÁTICO. jardines verticales*. YUCATÁN: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.

Torrente Artero, Ó. (2013). *ARDUINO: Curso Práctico de formación*. RC Libros.

UNATSABAR, U. de A. T. en S. B. R. (2001). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. In *UNATSABAR* (Vol. 1). Retrieved from http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/monte_carlo/monte_carlo.htm?iframe=true&width=95%25&height=95%25

Valdivia, B. E. 1997. Producción de Forraje Verde Hidropónico. Conferencia Internacional de Hidroponía Comercial. Memorias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral. Lima Perú pp. 91-99.

Van Mook, Fabien J.R. et al. 1997. Computer simulation of driving rain on building envelopes, <http://sts.tue.nl/drivingrain/>, Genova, Netherlands.

Zaar Miriam-Hermi. (15-10-2011). Agricultura Urbana: Algunas Reflexiones sobre su Origen e Importancia Actual. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, XVI, 64-69.

Zunun-Bartolome, J. (2009). *Elaboración de un procedimiento para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia para uso domestico*. (Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”). Retrieved from <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789>

<http://www.monsanto.com/global/lan/mejorar-la-agricultura/pages/poblaciones-en-aumento-retos-mayores.aspx>

<http://www.abc.es/sociedad/20130614/abci-poblacion-mundial-crecera-201306141214.html>

Hacia un futuro con seguridad hídrica y alimentaria (Towards a water and food secure future), FAO, 2015

<http://www.fao.org/documents/card/en/c/eb978434-dac0-4cd0-bcb3-f1f6f01773f9/>

Circuitos cortos de comercialización para alimentos ecológicos, Daniel López García, 19/02/2015,

<http://www.elsalmoncontracorriente.es/?Circuitos-cortos-de>

Análisis de las aguas residuales para su uso en la agricultura, R.M. Ayres and D.D. Mara, 1996 http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/labmanual/es/

La batalla de los supermercados llega a los productos frescos, María Sánchez, Madrid, 17/09/2016, *Expansión*

<http://www.expansion.com/empresas/2016/09/17/57dd4a65268e3e806f8b4639.html>





Gerencia Regional de Agricultura. Ficha Técnica para el Cultivo de la Fresa. Perú. [En línea] Consultado el 01 de abril de 2019: http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/Ficha%20T%C3%A9cnica%20para%20el%20Cultivo%20de%20la%20Fresa_0.pdf

[En línea] Consultado el 01 de abril de 2019:

https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-629440633-lq-led00665-tecnolite-exterior-reflectores-led100w100-240v-_JM

[En línea] Consultado el 01 de abril de 2019:

<http://tecnolite.lat/productos/lq-led00665>

[En línea] Consultado el 01 de abril de 2019:

<https://www.acomee.com.mx/articulo.php?search=LQ-LED-00630&id=TECNOLITE&pro=LQ-LED-006-30>

[En línea] Consultado el 01 de abril de 2019:

https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-586933823-2400-semillas-de-lechuga-orejona-hortaliza-882-envio-gratis-_JM?quantity=1

[En línea] Consultado el 01 de abril de 2019:

https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-587952849-800-semillas-de-lechuga-roja-hortaliza-888-envio-gratis-_JM?quantity=1

[En línea] Consultado el 01 de abril de 2019:

https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-660546339-semillas-de-fresa-20-semillas-_JM?quantity=1





ANEXOS

















MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA