

# **PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2017**

## **MEMORIA DEL PROYECTO N° 25**

### **1. DATOS DEL PROYECTO**

**Título: Estudio numérico y experimental de sistemas estructurales para la ejecución de Huertos Verticales. SV-17-GIJÓN-1-25**

**Investigador/a/es responsable/es: Mar Alonso Martínez**

**Tfno: 985 18 23 53**

**E-mail: alonsomar@uniovi.es**

**Otros investigadores: Felipe Pedro Álvarez Rabanal**

**Empresas o instituciones colaboradoras: Oficina Técnica Astur (OTA); Advanced Simulation Technologies (AST Ingeniería); Club Asturiano de la Innovación**

### **2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO**

#### **2.1 Resumen ejecutivo**

Hoy en día, y cada vez más, hay un gran desafío en las técnicas de cultivo que necesitarán sobre todo las poblaciones futuras, haciendo hincapié en los grandes núcleos urbanos. Se tiene constancia de estudios que confirman un crecimiento de la población mundial de 3000 millones de personas en sólo 35 años, pasando de los 7000 millones de personas a los 10000 millones. Este aumento provoca varios problemas que se deberían intentar subsanar. Varias de estas dificultades incluyen problemas en el abastecimiento de alimentos a las poblaciones; en la obtención de energía y agua; en la falta de espacio para tareas agrícolas o ganaderas, o en el crecimiento de la contaminación o el movimiento de las poblaciones rurales a la ciudad. Por ello, se ve necesario el progreso y avance de nuevas técnicas para la obtención de alimento como el cultivo, siendo la agricultura vertical un método eficiente y apropiado para la obtención de alimento en los núcleos urbanos.

En la actualidad, el método usado más común es la agricultura horizontal, siendo normalmente un invernadero de forma tubular en terreno abierto. No obstante, esta técnica ocupa mucho espacio, habitualmente no disponible en los núcleos urbanos. Por lo que el cultivo vertical se convierte en una opción idónea en zonas con alta densidad de población. Aunque no sólo sería ésta la ventaja que habría en la implantación de huertos verticales en núcleos urbanos, sino que también el cultivo de plantas ayudará a disminuir la contaminación al permitir a la absorción de contaminantes, y ayudarán en una creación del autoabastecimiento de frutas y verduras orgánicas.

El objeto de este proyecto es crear un sistema estructural de huertos verticales para una mayor explotación de los terrenos preparados para la agricultura. El diseño de la estructura se basa en estructuras de almacenamiento del sector industrial, resistentes a grandes pesos y cargas, de sencilla construcción y dividido en módulos o secciones. De esta forma, habrá un incremento del espacio aprovechable en sentido horizontal, beneficiándose del espacio en altura, y

aprovechando en muchos casos espacios comunes desaprovechados como pueden ser los patios interiores.

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se diseñó la estructura soporte del huerto vertical seleccionando una ubicación para el mismo. En base a esta localización, se dimensionó el huerto considerando el número de pisos, el tamaño de las macetas, pilares, pasillos, etc. Se realizó con herramientas avanzadas de dibujo CAD con el programa SolidWorks.

Asimismo, se realizó el cálculo estructural con el software ANSYS de simulación numérica mediante el Método de Elementos Finitos (FEM). Los resultados obtenidos han resultado satisfactorios en términos de tensión y deformación de la estructura.

En el diseño también se incluyó un elemento muy innovador denominado paraboloides que posee doble función: por un lado, actúa de cimentación en la base de la estructura; por otro lado, alberga los cultivos y la tierra actuando como maceta. Esta geometría se escogió por las altas prestaciones que aporta, al trabajar como membrana y autocompensar esfuerzos. Los pilares entre plantas son perfiles tubulares de sección cuadrada 50x50x4 medidas en milímetros.

Además, se creó también el diseño de regadío dependiendo de las condiciones a las que se exponía cada planta, acordándose que la primera planta, cobijada por la segunda, necesitaría regarse de forma artificial, escogiéndose el método por goteo. Mientras que la segunda planta, se abastecería del agua necesaria gracias a la lluvia y a un sistema de autoregadío incluido en cada maceta que estuviese en dicha altura para los momentos en los que las precipitaciones fuesen escasas.

## 2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Los objetivos iniciales se componen de:

- ***El diseño de la estructura que soporta el huerto vertical.*** Para ello, se consideraron las dimensiones de uno de los patios interiores del Edificio Polivalente de la Escuela Politécnica de Gijón, en el que se localizaría el huerto vertical. Después, se diseñó la estructura empleando perfiles normalizados estructuralmente eficientes para soportar las cargas del huerto y cumplir con los objetivos establecidos. Fue necesario el cálculo de las sobrecargas de uso según el Código Técnico de la Edificación. El diseño fue dibujado con el programa de CAD SolidWorks.
- ***Diseño del cultivo.*** Se necesitó pensar en el tipo de cultivo más idóneo para el clima y el espacio en el que se encontraría cada una de las plantas, tales como la lluvia y las temperaturas máximas y mínimas o el sol que incidiría. Así mismo, también se calcularon las medidas que la maceta requería para que las plantas pudiesen echar raíces y crecer de manera satisfactoria.
- ***Uso de herramientas avanzadas de simulación numérica (Método de los elementos finitos FEM).*** En este apartado, se introdujo la estructura diseñada y se calcularon las cargas soportadas por la estructura, se estudiaron los puntos más críticos y se optimizaron las dimensiones previamente establecidas hasta alcanzar una estructura portante resistente.
- ***Sistema de regadío.*** Se observaron las condiciones de riego a las que estarían expuestas las plantas y los sistemas de regadío que existen en el mercado. Se adoptó un sistema de riego por goteo en la primera planta. Se calculó teniendo en cuenta el caudal máximo

que se podría necesitar en la situación más desfavorable, en la que sólo se plantase la verdura que más agua requiere para crecer y el circuito de tuberías necesario. Finalmente, se escogió la bomba más adecuada para proveer el agua solicitada en dicha situación. En la segunda planta, el sistema de riego seleccionado fue el de autorriego. Se diseñó un depósito para el fondo de la maceta, que se llenará con las precipitaciones y permitirá, el almacenamiento de agua y la autorregulación de agua de la planta a través de sus raíces.

### 2.3 Tareas realizadas

- **Diseño del cultivo. ¿Qué se puede plantar?**

Para tomar esta decisión es necesario estudiar las condiciones ambientales que recibiría el cultivo y las que necesitaría, así como el diseño del huerto para saber si sería propicio para el correcto crecimiento de dicha planta. Hay que tener en cuenta que dependiendo de la zona en la que se coloque el huerto, estará más iluminado de forma natural o menos dependiendo de la llegada de los rayos del sol, ya que está situado en un patio interior. Es necesario saber también los cuidados a los que se debe someter la planta para considerar si se debe regar con más cantidad o frecuencia que la aportada de manera natural por el agua de lluvia. Además, el espacio que puede llegar a ocupar dentro del paraboloide diseñado es importante, ya que, por ejemplo, los tubérculos crecerían hacia abajo y si el espacio no es suficiente, su crecimiento se vería obstaculizado por las paredes del huerto vertical no dejando así que la planta echase raíces.

Por ello, se han estudiado las siguientes plantas que pueden ser las mejores candidatas para desarrollarse correctamente en esta estructura:

- *Fresa.* La fragaria o fresa es una planta perenne cultivada como alimento por su fruto también llamado fresa. El mejor momento para su plantación es finales del invierno o principios de primavera. Crecen bien en espacios reducidos, ya que solamente necesitan una profundidad mínima de 10 centímetros para su subsistencia. Su demanda de radiación solar es baja por lo que son apropiadas para zonas con semisombra o sin sol. Respecto al riego, decir que varía en invierno y en verano, dependiendo de la humedad del ambiente o sequedad, se necesitará regar cada 4 o 5 días en invierno y diariamente en verano. No es aconsejable regar sobre la planta, sino sobre la tierra, para evitar problemas de humedad en las hojas y el deterioro de los frutos. Hay varios tipos, pero siempre ofrecen un bonito efecto colgante. Florecen a la vez que dan el fruto y son perfectas para plantar en tiestos o en jardines verticales. Además, son muy resistentes a las inclemencias meteorológicas como las heladas.



Figura 1. Fresas

- *Lechuga*. Son muy fáciles de cultivar y su crecimiento es rápido en cualquier época del año, pudiendo soportar unas temperaturas que rondan entre los -6 y los 30°C como máximo. Se debe prestar atención a las fuertes heladas, que pueden quemar la planta, y a los calores repentinos. Es aconsejable su siembra al aire libre. Para evitar espigados prematuros, se la debe regar a menudo, siendo aconsejable el riego por goteo y la recolecta en cuanto se ve la subida a flor.



*Figura 2. Lechuga*

- *Tomate*. En este caso, es necesario sol, calor y agua para llegar a obtener buenos frutos maduros. Es muy recomendable no mojar la planta en el momento de regar, ya que se podrían generar problemas de hongos. Hay muchas variedades de tomates, pero la adecuada para esta localización es el tomate “Cherry” de mata baja. A diferencia del resto, éste no necesita guías para la rama principal. Además, su siembra resulta relativamente sencilla, solamente requiere tierra con luz solar abundante. Se aconseja enterrar un par de ellas por agujero a 1 cm de la superficie y regar. Aproximadamente una semana después, se deberían apreciar los primeros resultados. El momento óptimo para el crecimiento de este tomate es cuando llegue el buen tiempo con temperaturas que rondan los 20°, una vez acabada la temporada de heladas.



*Figura 3. Tomates Cherry*

- *Frambuesas*. Es también una buena opción ya que crecen bien a la sombra y por ser de origen nórdico, no necesitan calor excesivo. Soportan perfectamente las temperaturas bajas del invierno y las altas del verano, aunque las recomendables serían las invernales o las estivales cuando el ambiente es fresco para que el fruto sea de buena calidad. Es una planta perenne que necesita bastante tierra. Hay que tener en cuenta que el primer

año no da demasiados frutos en verano. Respecto a su riego, necesita entre 700 y 900 mm de agua al año, que se traduce en 2.5 litros por metro cuadrado al día. Si las lluvias fuesen demasiado abundantes, el frambueso podría quedar dañado debido a los encharcamientos. Por otro lado, si las precipitaciones se concentran en el periodo de madurez del fruto, este crecería blando, estropeándose con más facilidad e incluso con presencia de moho. Si se producen heladas fuertes tardías pueden resultar devastadoras para la planta, perdiéndose la floración y causando un crecimiento tardío. Otro efecto perjudicial serían grandes rachas de viento que provocarían serios daños y una enorme deshidratación que causaría la irremediable marchitez. No obstante, el frambueso aguanta temperaturas mínimas que varían entre  $-1.3^{\circ}$  y  $-0.7^{\circ}\text{C}$ , y resulta un fruto adecuado para exteriores en nuestro clima.



*Figura 4. Frambuesas*

- *Perejil*: Se trata de una planta herbácea común a lo largo de todo el mundo, sobretodo en Europa, Asia y algunas zonas de América. Es usada principalmente para condimentar comidas.

Respecto a su plantación, se recomienda un mínimo de 20 cm de profundidad en la tierra, que debe encontrarse acuosa pero no encharcada para evitar la posible aparición de hongos dañinos. Se aconseja su plantación en climas moderados con humedad constante. Para conservar estas condiciones, se puede pulverizar agua diariamente. No se recomendaría una exposición directa al sol especialmente cuando el calor está en su momento más intenso, y aunque pueda adaptarse a lugares de semisombra, sí se recomienda que recibiese cerca de 5 horas de luz cada día, para no perder el color verde intenso que debería tener y afectar negativamente a su crecimiento, perdiendo frondosidad.



*Figura 5. Perejil*

- *Rábano*. Originaria de Eurasia o del mediterráneo oriental, se cultiva generalmente por sus raíces comestibles. Hay varias subespecies como el “rabanito”, el “rábano blanco” o el “rábano japonés”.

Para conseguir unos rábanos de buena calidad, se pueden plantar en lugares a pleno sol o semisombra, a poder ser con tierra de calidad, libre de piedras o rocas, y que posea buen drenaje para que las raíces crezcan libremente. De nuevo, la tierra debe estar húmeda, pero sin encharcamientos, y bien abonada. Los rábanos se consideran cultivos de temperaturas frescas, perfectos para las estaciones de primavera y otoño. Además de que soportan bien las heladas, no es recomendable plantarlos a temperaturas superiores a los 15°C. Las plantas crecen en menos de una semana y se pueden recoger tres o cuatro semanas después.



*Figura 6. Rábanos*

- *Habas*: El haba se trata de una planta herbácea con tallo erecto. Su cultivo se dirige principalmente al consumo humano y animal de sus semillas y su plantación empezaría al final del verano hasta noviembre.

Los cuidados del haba son muy sencillos, ya que no precisa de suelos con abundante nitrógeno, ni abonado. Además, no requiere riegos excesivos. De hecho, si el tiempo viene con lluvias, no hace falta preocuparse por regar.



*Figura 7. Habas*

Se han estudiado otras frutas y verduras como el calabacín o el pimiento, pero no resultarían recomendables para el uso que se les quiere dar, ya que fructifican mayoritariamente en verano, la única estación del año en el que la Universidad está la mayor parte del tiempo desocupada.

La tierra elegida para utilizar en el huerto vertical es un sustrato universal extra con tacto esponjoso que se adapta perfectamente a la plantación en el interior y en el exterior. Es un sustrato formado por varios materiales como perlita, que permite una buena aireación y “Vital Force”, oligoelementos que aportan fuerza a las raíces.



Figura 8. *Sustrato universal extra.* <https://www.jardipond.com/producto/sustrato-universal-extra/>

- **Aplicación del diseño a la Escuela Politécnica de Gijón**

El huerto diseñado se ubica en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, más concretamente, en el interior del edificio polivalente. En este edificio hay unos pasillos interiores a los que llega la luz y el agua de la lluvia necesarios para el crecimiento de las verduras o frutas que se decidan plantar, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 9. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón



Figura 10. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón-. Edificio Polivalente

Estos pasillos interiores tienen forma de sectores de corona circular. Se creyó oportuno emplazar el huerto en este lugar debido a la gran cantidad de horas que estudiantes, profesorado, personal de administración y servicios, y demás trabajadores que componen el campus, han de pasar en el edificio. A pesar de que no es una zona con excesivos problemas de contaminación, se considera un lugar muy adecuado para realizar un demostrador de este sistema de cultivo. Además, debido al alojamiento de la escuela del centro de la ciudad, se cree que esta iniciativa fomentará el consumo de frutas y verduras entre la comunidad universitaria.

Además, en este espacio, la luz del sol llega de forma natural a la mayor parte de la zona; está resguardado del viento en todo lugar por las paredes del edificio y la lluvia cae directamente sobre ello.

Actualmente, el sitio que ocuparía el huerto es un suelo empedrado con el único uso de dejar entrar al servicio de la limpieza para encargarse de la limpieza de los ventanales y de la suciedad que se pueda acumular dentro.

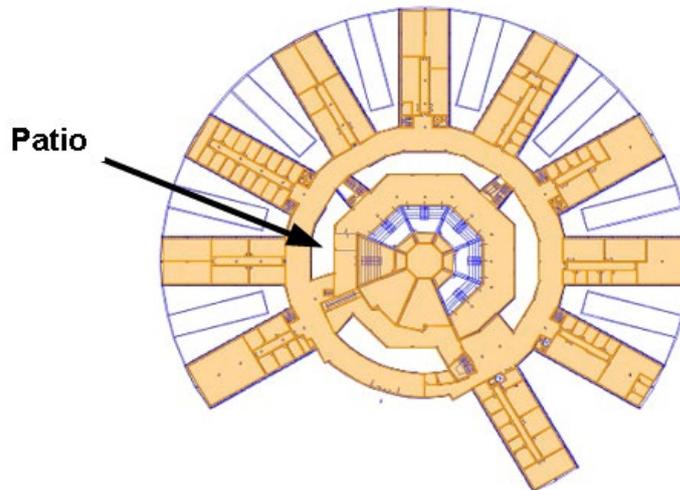


Figura 11. Plano de Edificio Polivalente Planta 1

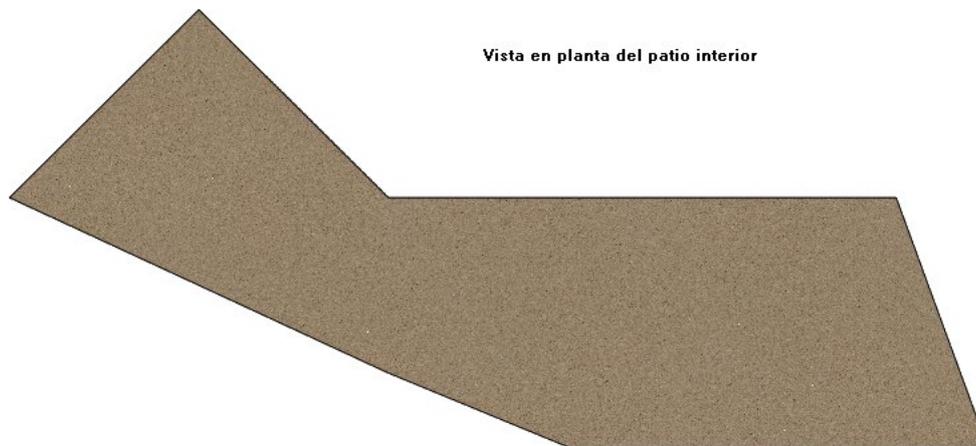


Figura 12. Vista en planta de la geometría del patio interior.

- **Uso de herramientas CAD para el diseño del huerto**

Como ya se ha dicho previamente, el software utilizado para la realización del diseño fue SolidWorks.

Para su correcto diseño, se dibujaron todos los componentes del huerto por separado y posteriormente fueron ensambladas formando el conjunto final. El diseño está formado por dos estructuras semejantes, ambas de dos plantas y compuestas por los mismos componentes y características, pero con distinto número de paraboloides y pilares debido al espacio irregular del que se dispone y al que hay que adaptarse.

La estructura concluyente es la que se adjunta a continuación:



*Figura 13. Diseño final del huerto vertical ubicado en el patio del Edificio Polivalente de la EPI Gijón (Universidad de Oviedo).*

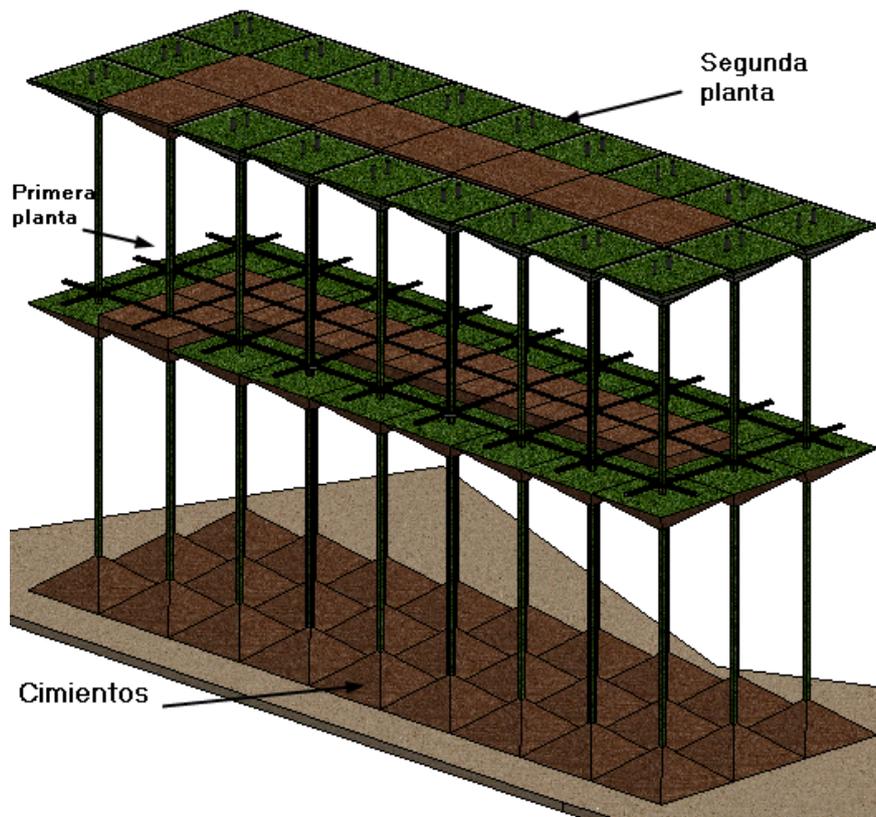


Figura 14. Huerto vertical izquierdo con sus partes principales.

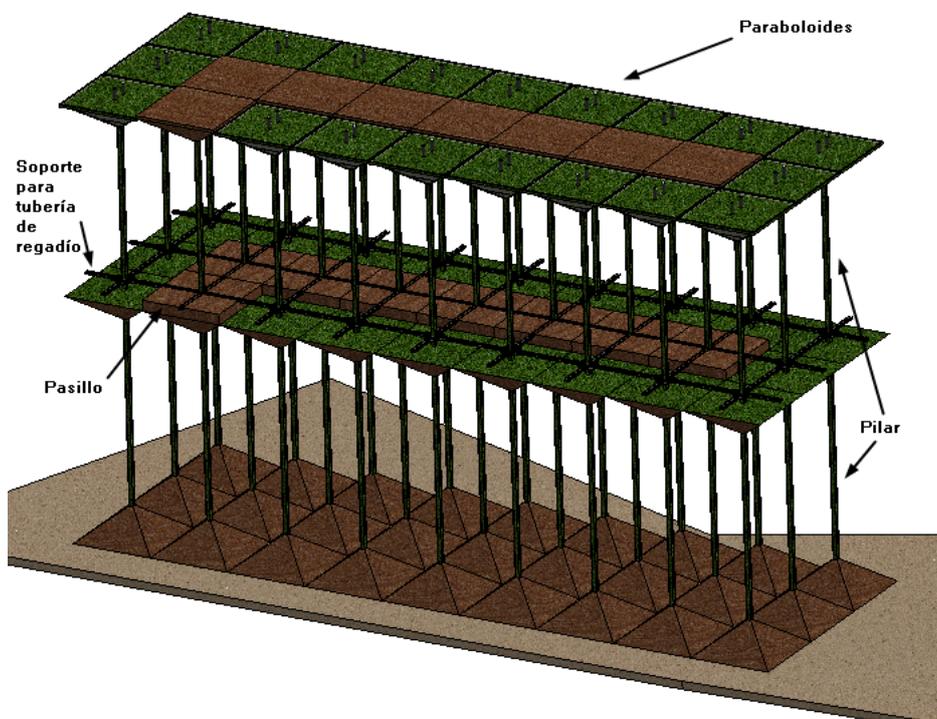


Figura 15. Estructura del huerto vertical izquierdo con componentes principales.

- **Cálculo de la estructura**

- **Cargas a aplicar al diseño del huerto**

Para dimensionar los elementos del huerto, es esencial saber la carga a soportar por la estructura. Se ha realizado una selección de materiales adecuados a las cargas a soportar y considerando criterios de sostenibilidad para alcanzar un diseño eficiente y sostenible.

El cálculo de las cargas se calcula con el código técnico CT-SE-AE, capítulo cero, acciones en la edificación. Se divide en varios capítulos: acciones permanentes, acciones variables y acciones accidentales. En este caso, las cargas consideradas son las siguientes:

Las acciones permanentes incluyen el peso propio de la estructura.

Las acciones variables contienen a las sobrecargas de uso.

Una vez dicho esto, hay que estudiar la situación en la que se encuentra el huerto vertical, teniendo en cuenta que se sitúa en un patio interior en la ciudad de Gijón, además de los materiales con los que se construye y del diseño. Por ello, la estructura vertical se ve sometida a cargas tales como su peso propio y las sobrecargas de uso. Otras acciones como la nieve, no se consideran por no verse afectada por ella. Tampoco por el viento, al estar en un patio cerrado, o la acción de los sismos o cambios grandes de temperatura, por no aplicar en la ciudad de Gijón.

Se calcula el volumen de un paraboloides aproximando su forma a la de una pirámide de base rectangular, y siendo la fórmula de su volumen como sigue:

$$V = \frac{\text{lado} \times \text{lado} \times \text{altura}}{3} = \frac{1 \times 1 \times 0.37}{3} = 0.123 \text{ m}^3$$

Siendo cada lado de 1 m de longitud y la altura es de 0.37 m.

Una vez sustituidos los valores en la ecuación, resulta un volumen  $V=0.123 \text{ m}^3$  (123 l).

Para saber el peso que soportan los paraboloides que contienen tierra y plantas existe un código con el que se normaliza dicho valor: “Normas Tecnológicas de jardinería y Paisajismo”, según ASESCUVE, Asociación Española de Cubiertas Verdes [1]. Donde se encuentra una clasificación para jardines en cubiertas divididas en extensivas, semi-intensivas e intensivas.

Las *extensivas* comprenden una baja manutención y regadío, plantas jugosas, herbáceas, de hojas perennes, cespitosas y vivaces. La tierra a usar sería porosa con un espesor comprendido entre 7 y 25 cm. Las cargas se encuentran entre 60 y 180 daN/m<sup>2</sup>. Para cubiertas ecológicas.

Las *semi-intensivas* son aquellas cuyo mantenimiento y riego es moderado, para plantas iguales que el tipo anterior, pero además, pueden ser subarbusivas o arbustivas. El sustrato es de mineral poroso con un espesor entre 10 y 25 cm. Su carga está dentro del intervalo de 150 a 350 daN/m<sup>2</sup>. Para cubiertas semi-ornamentales con pretensiones moderadas.

En las *intensivas*, el cuidado debe ser intensivo y el riego permanente. La tierra ha de ser sustrato de jardinería con espesores superiores a 60 cm y las cargas a soportar son superiores a los 600 daN/m<sup>2</sup>. Comprende a las cubiertas con jardines intensivos y sobre garajes subterráneos.

En este caso, se ha seleccionado el segundo tipo: cubiertas semi-intensivas, con una carga de  $150 \text{ daN/m}^2$ , aproximadamente  $150 \text{ kg/m}^2$ .

Además, hay paraboloides que son utilizados para el paso de las personas a modo de pasillo intermedio entre las plantas. Para calcular esta carga, se usa el ya citado código técnico CT-SE-AE, en el capítulo cero, apartado 3.1: “Sobrecargas de uso”. En donde se indica la sobrecarga de uso para personas en “Cubiertas transitables accesibles solo privadamente” que es el caso del huerto vertical diseñado. El valor indicado es de  $1 \text{ kN/m}^2$ , aproximadamente  $102 \text{ kg/m}^2$ .

**Tabla 3.1 Valores característicos de las sobrecargas de uso**

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)</sup>	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Figura 16. Valores característicos de las sobrecargas de uso según CT-SE-AE.

En resumen, por lo explicado previamente, los paraboloides donde se planta, soportan  $150 \text{ kg/m}^2$ . Mientras que los transitables, soportan  $102 \text{ kg/m}^2$ . Dicho esto, se decide sobredimensionar el pasillo y considerar una carga de  $150 \text{ kg/m}^2$ . Se persigue que este huerto sea una construcción industrializada, en la que los elementos se traen de fábrica y se combinan hasta obtener la estructura deseada, pudiendo los mismos elementos generar diferentes geometrías, diseños y combinaciones.

### ➤ Modelo numérico FEM

El modelo numérico FEM es un método utilizado para conseguir una aproximación numérica sobre un cuerpo, que se encuentre definido por unas ecuaciones diferenciales que determinan su comportamiento físico, partiendo dicho cuerpo en un alto número de subdominios llamados “elementos finitos”.

Dentro de cada elemento se diferencian unos puntos clave llamados “nodos”. Los nodos adyacentes son aquellos que pertenecen al mismo elemento finito. Asimismo, un nodo puede pertenecer a varios elementos si se encuentra sobre la frontera del mismo. Por lo que una malla

es el conjunto de nodos adyacentes y normalmente se crea con programas especializados por ordenador, realizando los cálculos sobre dicha malla de nodos, que además discretizan el dominio de los elementos finitos.

Es un método muy utilizado porque permite dar solución a cálculos matemáticos complejos que, de otra manera, no podrían ser resueltos. Este método da lugar a una solución aproximada, basada en la solución exacta en los nodos de los elementos.

Una parte importante de dicho cálculo es la llamada “convergencia”, ya que cuantas más particiones de elementos, la solución numérica que se calcula converge con mayor velocidad hacia la solución exacta en los nodos.

Hay varios programas que incorporan MEF en sus cálculos. El elegido para el cálculo numérico del huerto vertical es el software ANSYS en su módulo Mechanical APDL (ANSYS Parametric Design Language).

El programa ANSYS, con el que se calcula la estructura obtiene las tensiones principales que soportan los elementos del huerto, pudiendo incluirlas todas en un archivo Excel para un mejor estudio de las mismas.

- **Modelo numérico**

- **ANSYS**

En el modelo se incluyen las variables a estudiar en el problema, tales como el espesor “ESPESOR”, el espesor del tubo “ESPTUBO”, el espesor de la placa “ESPLACA”, “LADO”, la mitad del lado del paraboloides, “ALTURA” la profundidad del paraboloides y “CARGA” la carga que se aplicará sobre la estructura previamente calculada.

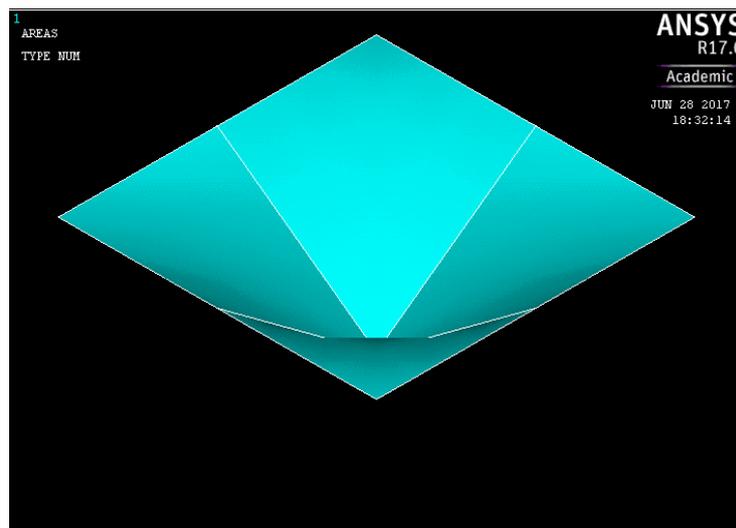
Se define la geometría a calcular mediante puntos localizados en las coordenadas adecuadas, K.

Los elementos finitos utilizados en el problema son elementos tipo BEAM189 y SHELL93. El primero de ellos es adecuado para analizar estructuras lineales esbeltas o gruesas, que soportan compresión y/o tracción. Está basado en la teoría de Timoshenko que incluye efectos de deformación de cortadura y proporciona opciones de secciones con pandeo sin restringir o restringidas. El segundo elemento, SHELL93, es usado debido a que se ajusta al análisis de estructuras de membranas de pared delgada a moderadamente fina. Son elementos con seis grados de libertad en cada nodo: translaciones en las direcciones X, Y y Z. Además de las rotaciones en los ejes X, Y y Z.

El material empleado para los pilares y los paraboloides es acero cuyas propiedades son: módulo elástico igual a  $1.2 \times 10^{11}$  Pa, coeficiente de Poisson de 0.3 y densidad 7850 kg/m<sup>3</sup>.

La sección de los pilares empleada es una sección tubular, cerrada y cuadrada de tipo SHS de 50 mm de lado y 4 mm de espesor, 50x50x4.

Se programa la geometría y posteriormente el mallado de la misma empleando los elementos finitos previamente comentados. En el cálculo se han estudiado un conjunto de 9 paraboloides (3x3) que es el patrón elegido, pero que podría ser combinado en otros patrones según se requiera. A continuación, se muestran algunas imágenes del proceso.



*Figura 17. Paraboloides hiperbólico.*

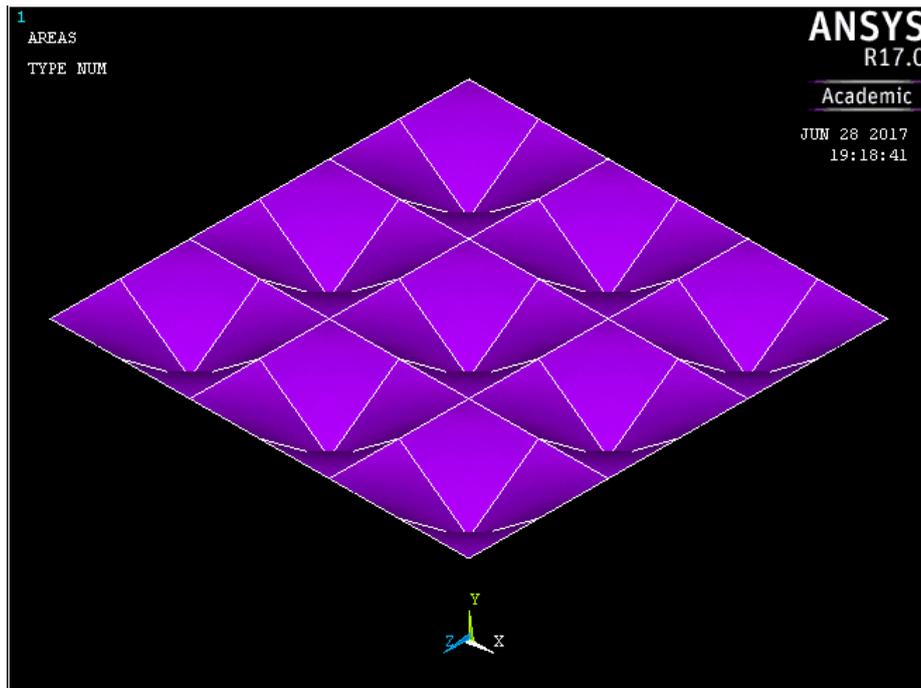


Figura 18. Forjado de 9 paraboloides hiperbólicos.

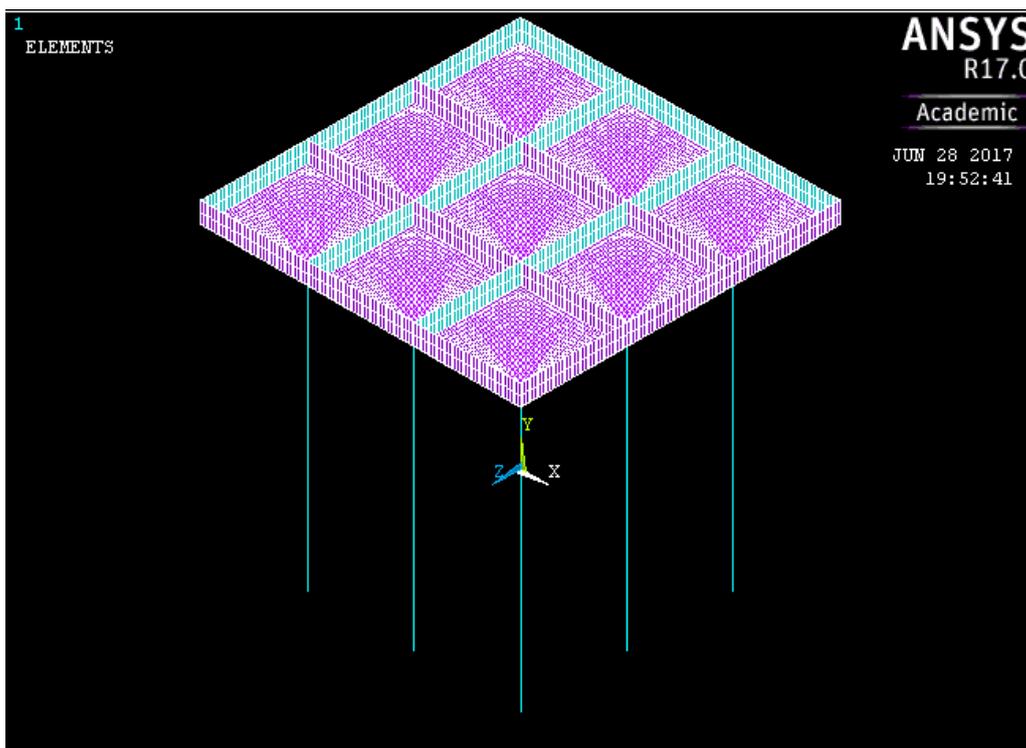
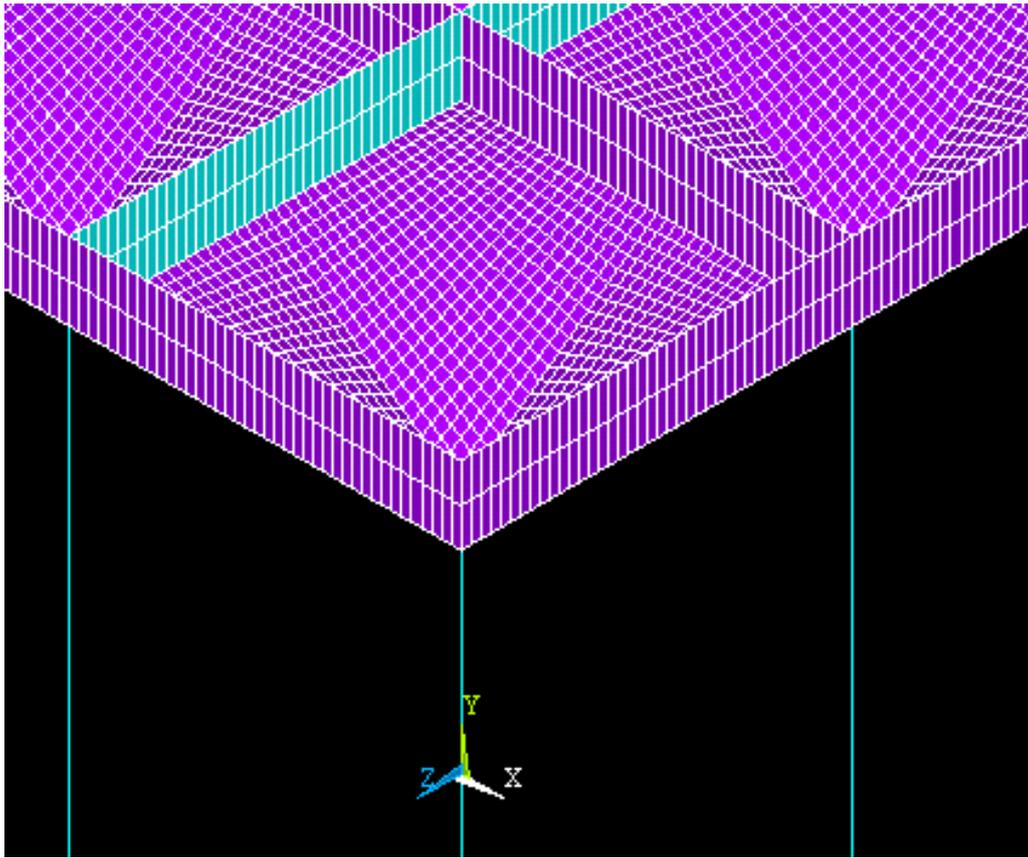


Figura 19. Mallado del forjado de los 9 paraboloides.



*Figura 20. Mallado de un paraboloido.*

Las condiciones de contorno aplicadas son la restricción de la base de los pilares, giros y desplazamientos, y la carga distribuida sobre todos los puntos del paraboloido, siendo en la dirección negativa del eje Y con el valor calculado anteriormente,  $150 \text{ kg/m}^2$ .

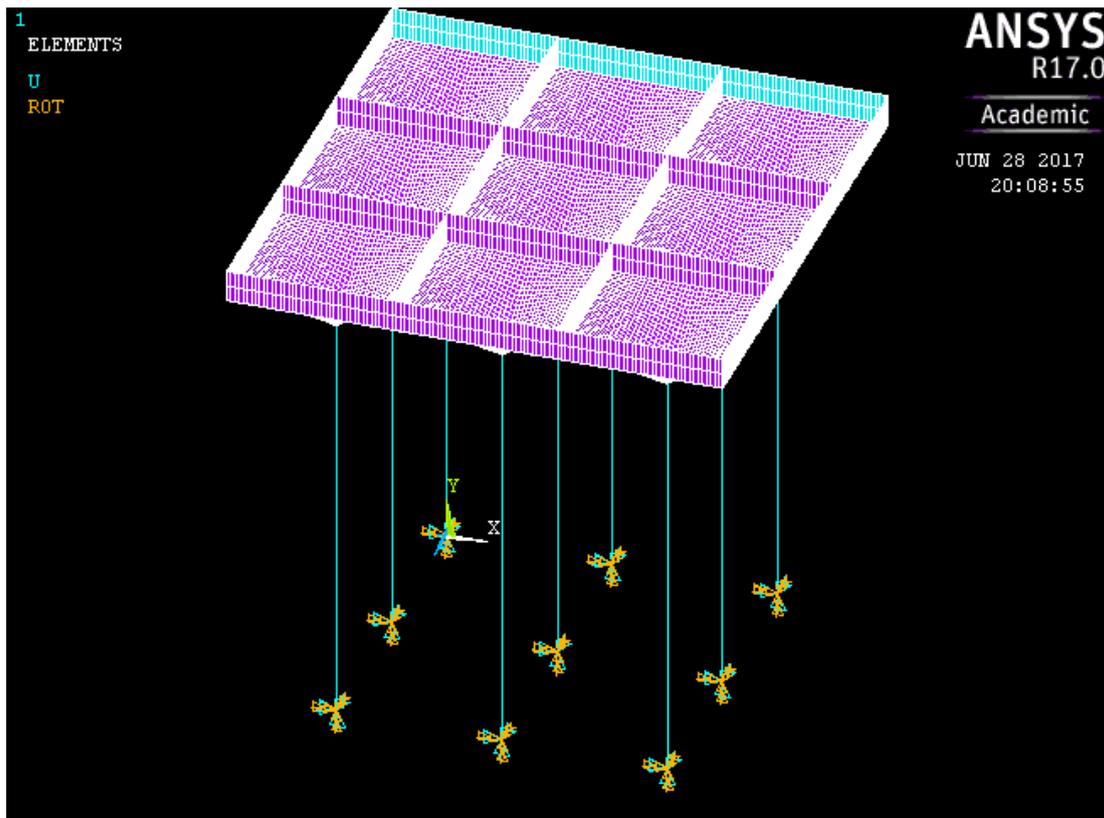


Figura 21. Restricciones en el forjado.

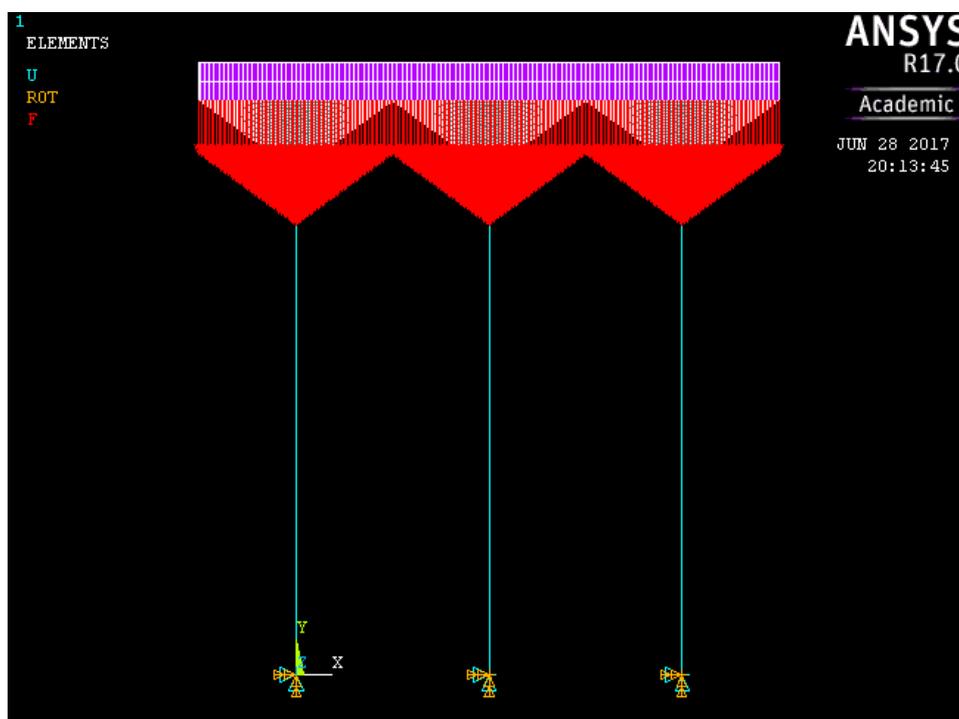


Figura 22. Carga distribuida en la superficie de los paraboloides.

Una vez aplicadas las condiciones de contorno, se procede a calcular la estructura y se obtienen los siguientes resultados.

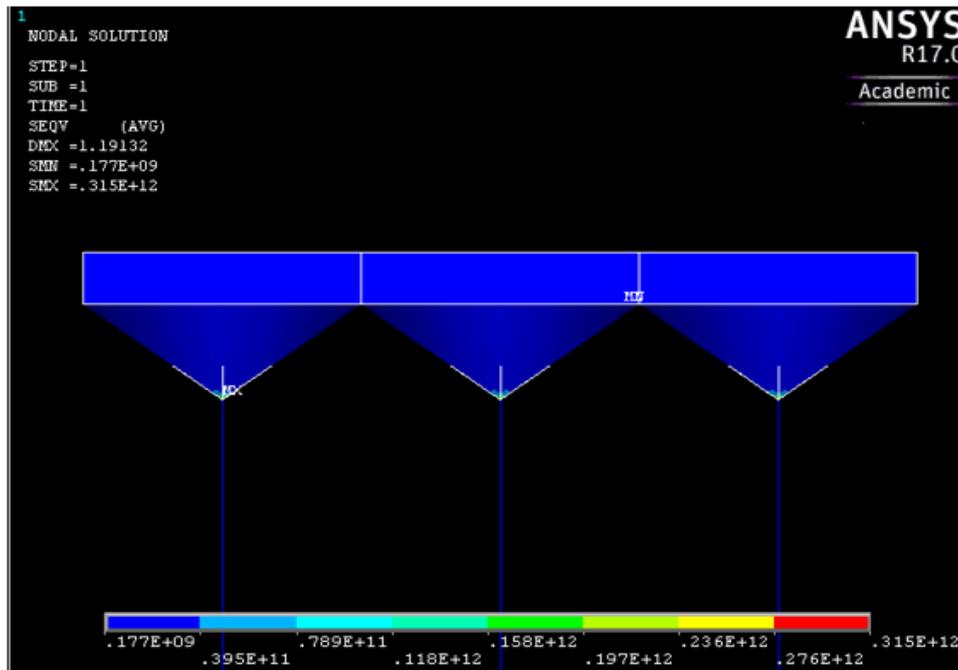


Figura 23. Resultado de calcular la tensión de Von Misses.

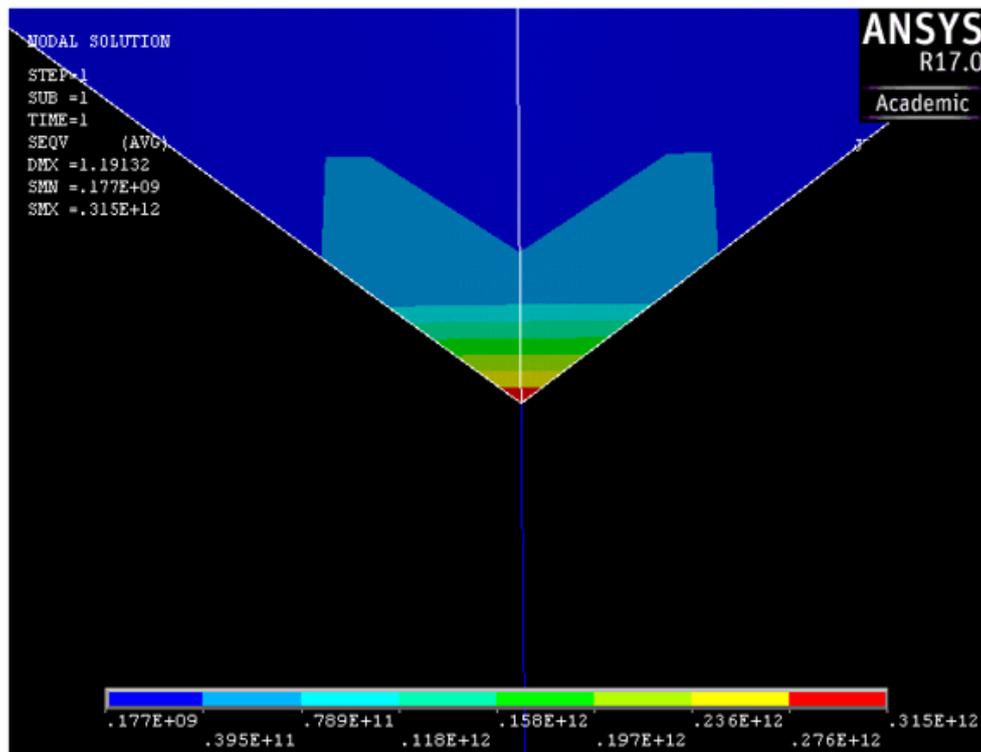


Figura 24. Ampliación del resultado de la tensión de Von Misses.

En la unión entre el pilar y el vértice inferior del paraboloide es dónde se centran las máximas tensiones. Este problema se solventa reforzando esa unión, aunque se sospecha que los valores pueden ser debidos a un error numérico que podría ser resuelto afinando la malla en la conexión entre el paraboloide y los pilares. Las tensiones, tanto en el pilar, como en el paraboloide son bajas y resultan muy adecuadas.

- **Sistema de regadío**

Se tendrán en cuenta dos tipos de sistemas de riego para el huerto vertical, debido a que en cada piso de la estructura existen diferentes condiciones de luz y precipitaciones. Teniéndose luz y posible riego natural (gracias al sol y lluvia) en la segunda planta y en la primera, habiendo una situación de semisombra y no llegando agua de forma natural por estar cubierta por la segunda fila de paraboloides.

Debido a este escenario, se instalará un sistema de riego artificial por goteo en el primer piso y en el segundo, el método elegido es el de implantar macetas de autorriego.

➤ **Riego por goteo**

Para saber qué dimensiones y potencia necesita esta instalación se debe estudiar la cantidad de agua que cada planta necesita. Para ello, se ha realizado un estudio de los vegetales que podrían estar o no en dicho piso, teniendo en cuenta la luz y la cantidad de agua que se precisa en cada caso.

Ya se ha hecho un estudio previo en el apartado 2.2.1. de las condiciones de siembra de cada planta, y por ello, se parte de que las que mejor soporten las condiciones de semisombra, serán las que estén en el piso que se está tratando, el primero:

- *Lechuga*: No soporta altas temperaturas como a las que se podría llegar en el caso de quedar a pleno sol, además de ser el sistema de riego por goteo uno de los más aconsejables para este caso. Sin embargo, la cantidad de agua necesaria varía según la fase de crecimiento en la que se encuentre, estando la primera semana entre 1 y 2 litros/m<sup>2</sup>. Más adelante, cuando llegue a tener cerca de unas 18 hojas, debería recibir entre 4 y 8 litros por metro cuadrado. Finalmente, hasta el momento de la recolecta la dosis es de unos 10 litros por metro cuadrado al día.
- *Fresa*: No necesitan sol ni calor para sobrevivir. A parte de no ser aconsejable regar sobre la planta para evitar excesivas humedades. Se recomienda darle 1 litro de agua por metro cuadrado al día aproximadamente.
- *Frambuesa*: El frambueso es el caso que mejor se podría adaptar a ambos pisos, ya que crecen bien con frío y a la sombra, y aunque es recomendable que reciba 2.5 litros de agua al día, ambas alturas se los podrían proveer a la perfección.
- *Perejil*: La característica básica por la que el perejil no puede situarse en la segunda planta es que no debería ser expuesto directamente al sol para evitar la pérdida de propiedades que esto supondría. La cantidad de agua a suministrar no tiene por qué ser demasiado exacta, siempre y cuando no haya encharcamientos y la tierra se mantenga húmeda siempre, por lo que se suministrará unos 2.5 litros por metro cuadrado al día.

Una vez analizada la cuantía de agua para cada caso, se tendrá en cuenta que la cantidad máxima de líquido que debe pasar por el sistema de riego es la suma del agua demandada simultáneamente para el mismo piso. Como la siembra de cada tipo de planta dependerá del momento y de lo que se quiera plantar, se diseñó el sistema de riego para el peor de los casos, que sería una plantación entera de lechugas, por ser la planta que más riego necesita al día. Entonces, se elige estudiar el huerto vertical de la izquierda por haber 19 paraboloides

en total en cada planta de la estructura, comparados con los 12 de la de la derecha. Se hará el cálculo con los 19 paraboloides y 10 litros necesarios diarios por cada metro cuadrado que es la superficie total de cada paraboloide, lo cual es una cantidad de  $0.000416 \text{ m}^3/\text{h}$  por paraboloide y un total de  $0.000416 \times 19 = 0.0079 \text{ m}^3/\text{h}$  que necesitará ofrecer el sistema de bombeo.

Las piezas de la instalación necesarias para construir el riego por goteo son:

- *Grupo de bombeo:* Abastecerá la potencia y el caudal que hace falta para un correcto funcionamiento.
- *Red de tuberías:* No será demasiado compleja debido a la poca agua que debe transportar cada día, la poca presión que soportará y la sencillez en la estructura de la construcción.
- *Codos y T's:* Cambiarán la dirección de la tubería para distribuir el agua por todo el huerto.
- *Gotero:* Serán autorregulables. Se encargarán de hacer salir el agua que regará la planta.
- *Conductos para la tubería:* El tubo irá apoyado sobre un conducto, que elevará a la tubería del suelo, y tendrá una rendija en la base para permitir el paso del agua.

Para calcular el tamaño de la tubería, es necesario saber la longitud total que se debe cubrir con tubería y el caudal que debe llevar, habiéndose calculado previamente y siendo  $0.0079 \text{ m}^3/\text{h}$ . Este dato se necesita en litros por segundo para poder calcular dicho diámetro, siendo  $Q = 0.0021 \text{ l/s}$ .

Respecto al circuito que debe recorrer la tubería seguiría el siguiente circuito, calculándose una distancia máxima aproximada de:

- Distancia desde la planta baja a la primera planta: 3.05 metros
- Distancia que recorren las tuberías en la primera planta a lo largo de todo el circuito:  $9 \times 3 + 9 \times 2 + 2 = 47$  metros.
- Distancia aproximada del huerto al sistema de bombeo: 2 metros.

Longitud total de la tubería:  $3.05 + 47 + 2 = 52.05$  metros.

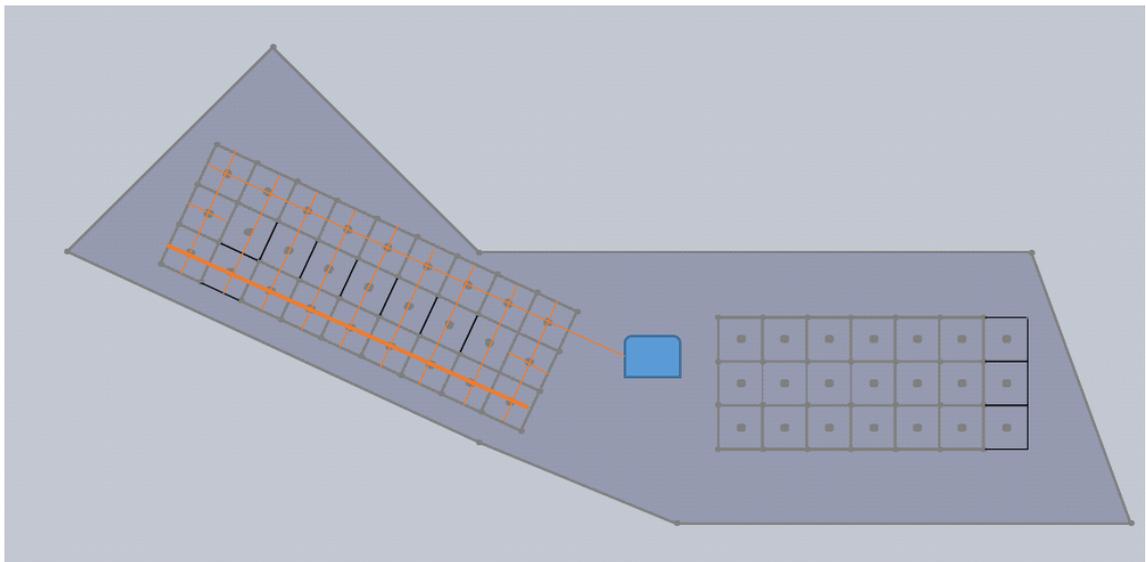


Figura 25. Circuito a recorrer por la tubería sobre los paraboloides.

Como no es un sistema que precisa de mucha velocidad, los cálculos se realizan con una velocidad máxima  $v_{\max}=0.5$  m/s.

Ahora ya se tienen todos los datos suficientes para calcular el diámetro de la tubería en metros:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v * 1000}} = 0.00236 \text{ (m)} \quad (1)$$

El diámetro necesario para dichas condiciones impuestas es muy pequeño, por lo que se escogerá aquel disponible con menor diámetro normalizado, resultando una tubería especial para un sistema de alimentación de agua de polietileno con 16 milímetros de diámetro. Entre sus características están que se puede roscar, soporta 10 bares de presión, es flexible y no se corroe.



Figura 26. Tubería de 16 mm de diámetro.

Para saber qué grupo de bombeo es el más adecuado para que la instalación funcione correctamente, hay que tener en cuenta ciertos parámetros que serán decisivos a la hora de calcular dicho sistema.

Como ya se sabe, la granja vertical se compone por dos estructuras que han de ser provistas ambas del riego por goteo. Para conseguir un sistema más eficiente con un grupo de bombeo más económico, por necesitar menos potencia y práctico, la bomba trabajará de forma intermitente, es decir, una vez acabado el riego de las plantas de la izquierda, se pasará a las de la derecha. Pero para el cálculo del tipo de bomba, no se considerarán por igual ambos huertos, ya que la construcción de la izquierda es más grande. Por lo tanto, estará ante unas condiciones más exigentes que el de la derecha.

En la decisión del sistema de bombeo, se necesitará conocer dos parámetros: la altura H [m.c.a.] y el caudal Q [l/s].

El caudal, conocido previamente, será de 0.00219 [l/s], que convirtiéndolo al sistema internacional de unidades, resultaría  $Q=2.19 \times 10^{-6}$  [m<sup>3</sup>/s].

En cambio, para calcular la altura será necesario hacer las pérdidas de carga, divididas en lineales y singulares.

- *Las pérdidas de carga lineales* se traducen en la pérdida de energía (medida en metros) por un descenso en la presión del fluido a medida que avanza debido a las tensiones cortantes que se producen entre el fluido y la pared de la tubería. Dicha pérdida de carga es debida a variables fluidodinámicas que dependen de qué flujo se trate, si laminar o turbulento.

Para saber de qué tipo es el fluido del huerto vertical, será necesario conocer el número adimensional de Reynolds (Re), que relaciona las fuerzas de inercia y las viscosas del fluido.

Particularizando para una sección tubular, Reynolds seguirá la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{4 * Q}{\pi * D * v} \quad (1)$$

Siendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \text{viscosidad dinámica del agua: } 0.001003 \text{ kg/m}^*s \\ \rho = \text{densidad del agua: } 1000 \text{ kg/m}^3 \\ Q = \text{caudal del fluido en [m}^3/s\text{]: } 2.19 \times 10^{-6} \text{ m/s} \\ v = \text{viscosidad cinemática del agua a } 20^\circ\text{C: } 1.0038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s. \\ \text{Si al calcular Reynolds, se obtiene un resultado menor de 2000, el flujo será laminar.} \\ \text{En cambio, si fuese mayor de 4000, se considerará turbulento. Si se encuentra entre} \\ \text{2000 y 4000, se encontrará en una zona de transición entre laminar y turbulento.} \end{array} \right.$$

Sustituyendo los valores necesarios para calcular Re, se obtiene:

$$Re = \frac{4 * 2.19 \times 10^{-6}}{\pi * 0.016 * 1.0038 * 10^{-6}} = 173.61 [-] \quad (2)$$

Se ve que  $173.61 < 2000 \rightarrow$  Se trata claramente de flujo laminar.

Ahora bien, para calcular las pérdidas de carga en tuberías y en régimen laminar, se seguirá la ecuación de Hagen-Poiseuille, donde se relaciona la pérdida de carga y el caudal:

$$h_{pl} = \frac{128 * \mu * L * v}{\rho * g * \pi * D} * Q \quad (3)$$

$$h_{pl} = \frac{128 * 0.001003 * 68.05 * 1.0038 \times 10^{-6}}{1000 * 9.81 * \pi * 0.0016} = 1.778 \times 10^{-7} [m. c. a.] \quad (4)$$

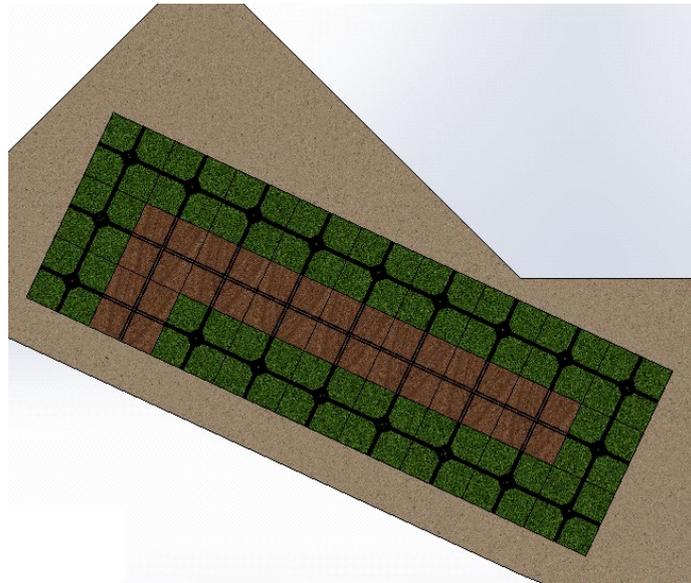
- *Pérdidas de carga singulares* son las generadas por algún objeto colocado en la tubería que impida la fluidez de alguna forma en mayor o menor medida. Ejemplos de éstas son los codos, válvulas, cambios de sección, entrada y salida de la tubería, etc. Por lo general, son menores que las lineales.

Se calculan de la siguiente manera, siendo la fórmula escrita a continuación la correspondiente a los “n” obstáculos que puedan crear las pérdidas singulares:

$$h_{ps} = n * \frac{8 * \xi * Q^2}{g * \pi^2 * D^4} \quad (5)$$

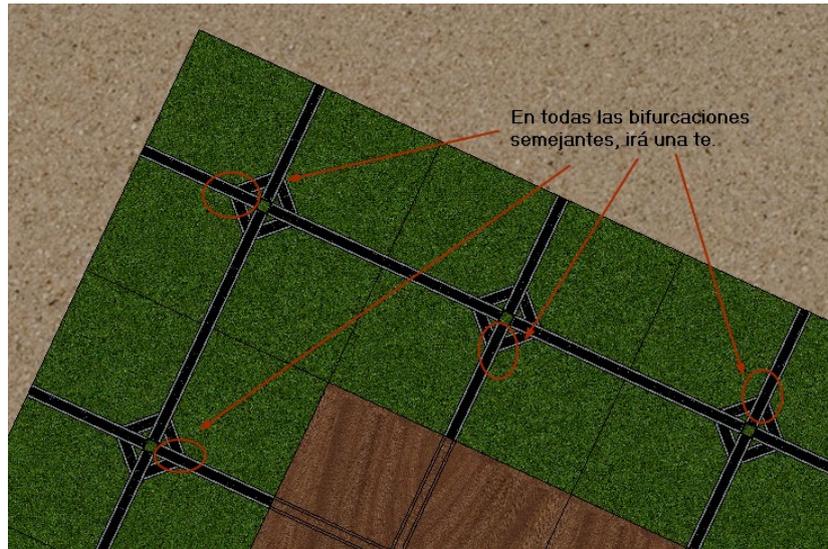
siendo  $\xi$  el coeficiente de pérdidas singulares, considerado en este caso de forma general para los codos, goteros y T's como 0.3.

Las pérdidas singulares se calculan haciendo un sumatorio de todos los codos y T's que incluyen la estructura más los goteros, que serán las válvulas abiertas o cerradas. El sistema de riego diseñado para la estructura más grande se muestra a continuación.



*Figura 27. Estructura con vista en planta del huerto vertical izquierdo*

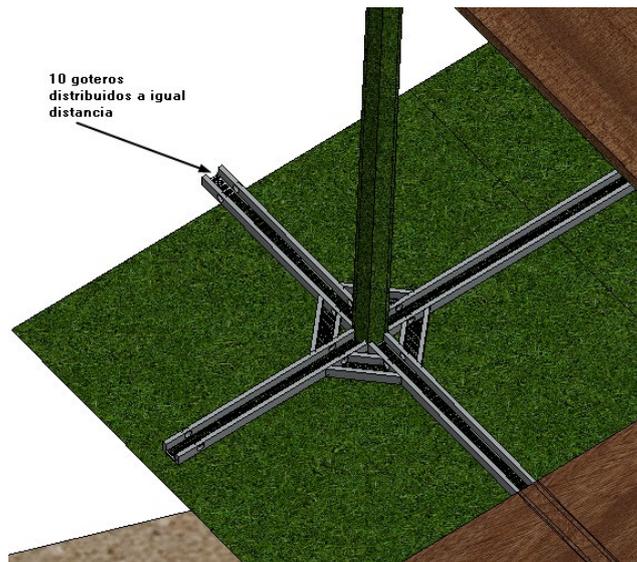
Por lo tanto, se encontrarán por cada pilar de los extremos 4 T's, y considerando que hay 19 pilares en esta situación, habrá un total de 76 T's.



*Figura 28. Lugar donde irán las T's.*

Las válvulas se colocarán cada 5 cm., obteniéndose la siguiente distribución:

En los extremos, la longitud del soporte de la tubería es de 475 mm., por lo que como el alcance máximo del gotero es de 10mm., y se incluirán goteros cada 50 mm, se instalarán 10 goteros en estas partes de la estructura.



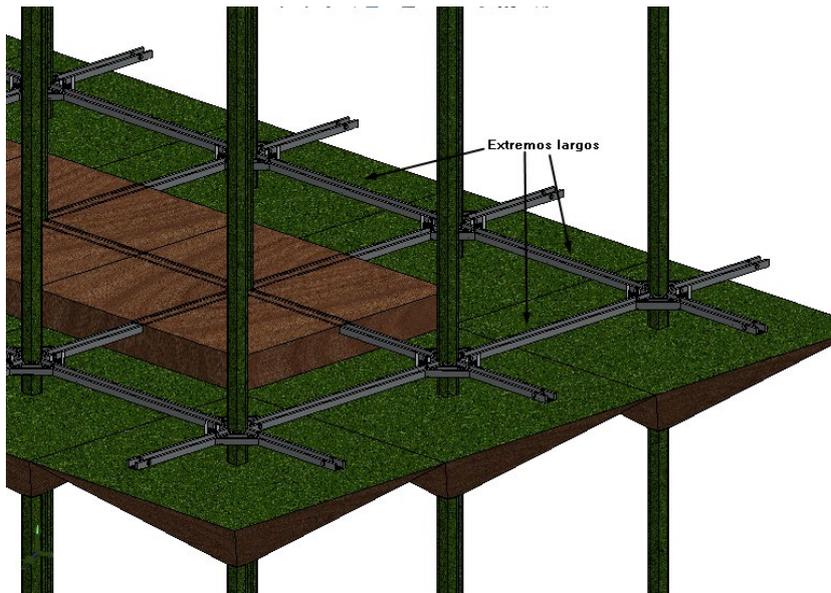
*Figura 29. 10 goteros necesarios en los extremos cortos de los soportes de las tuberías*

En los interiores, los soportes de las tuberías miden 950mm, por lo que se incluirán 19 válvulas por cada soporte cada 5 cm.



*Figura 30. 19 goteros necesarios en los extremos largos de los soportes de las tuberías*

Por lo que, en resumen, se tendrán entre los extremos largos, los extremos cortos y los interiores, un total de 676 válvulas.



*Figura 31. Extremos largos de los soportes de las tuberías*

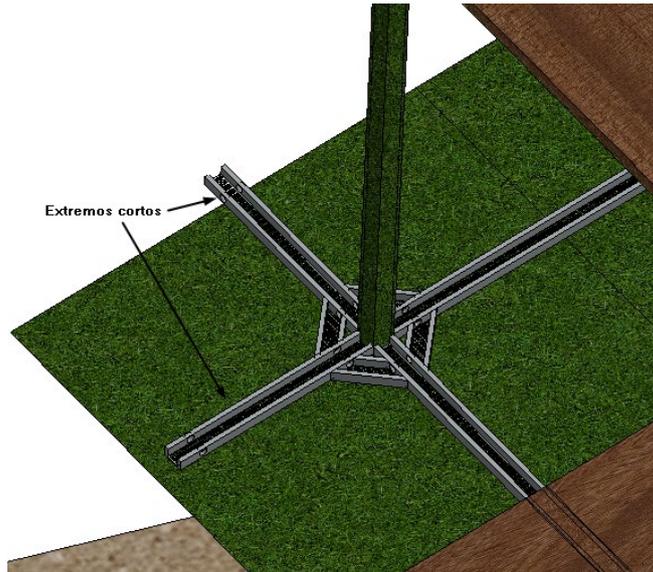


Figura 32. Extremos cortos de los soportes de las tuberías

Sustituyendo estos valores en la fórmula de las pérdidas singulares para los 5 codos que harán subir la tubería hasta la primera planta, las 676 válvulas, 72 T's y los 14 codos que se incluyen en el primer piso, se calculan unas pérdidas singulares de:

$$hps = (5 + 676 + 76 + 14) \times \frac{8 \times 0.3 \times 2.19 \times 10^{-6} \times 61.05^2}{9.81 \times \pi^2 \times 0.016^4} = 0.0022 [m. c. a] \quad (6)$$

El siguiente paso a realizar es la suma de ambos tipos de pérdidas (lineales y singulares), que en unidades de pascales [Pa] será como se indica a continuación, que será la presión que debe superar la bomba:

$$\text{Presión} = \rho \cdot g \cdot (hps + hpl + L)$$

Siendo la densidad  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  y la gravedad  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  y sabiendo que  $10^5 \text{ [m.c.a]} = 1 \text{ [bar]}$ , se tiene una presión con valor en Pa en la fórmula (7) y en bar en la (8) de:

$$\text{Presión} = 1000 \times 9.81 \times (0.0022 + 1.778 \times 10^{-7} + 61.05) = 598922.07 [Pa] \quad (7)$$

$$\text{Presión} = \frac{0.0022 + 1.778 \times 10^{-7} + 61.05}{1000 \times 9.81 \times 10^5} = 5.98 [bar] \quad (8)$$

Para decidir qué bomba adquirir para que sea la más adecuada a las necesidades del huerto, hay que entrar en la curva de la bomba con la Presión = 5.98 [bar] y el caudal  $Q = 7.9 \text{ [l/h]}$ .

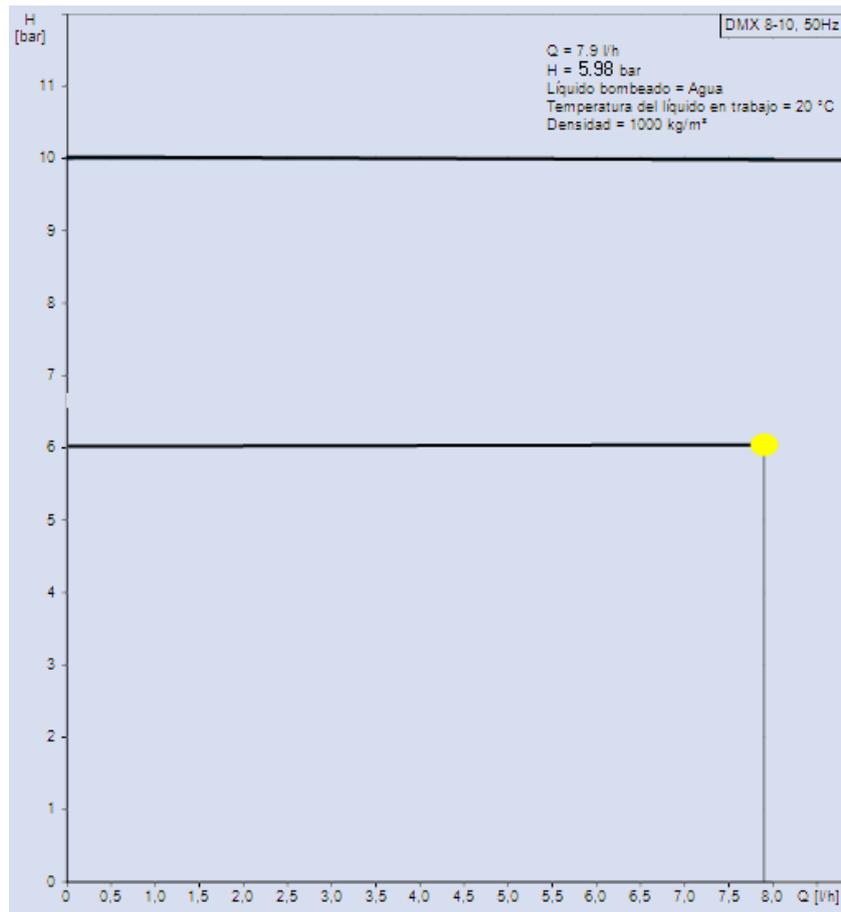


Figura 33. Curva de la bomba Grundfos DMX 8-10. 50 Hz.

El punto amarillo representa en qué punto del diagrama se encuentran las necesidades del huerto vertical que hay que cumplir.

De entre las bombas a escoger, se elige la Grundfos DMX 8-10, con 50 Hz y de nombre técnico “DMX 8-10 B-SS/V/SS-X-E1AAE0” y homologado por la CE, [2]. Se selecciona esta ya que cumple con las exigencias del circuito y, sus características se ajustan muy bien a lo demandado.

Es una bomba dosificadora de membrana que se ensambla a un motor AC y se adapta fácilmente a cualquier requerimiento. Cuenta con válvulas dobles y sencillas de hasta 50 l/h y a partir de 60 l/h respectivamente, las cuales se consideran suficientes. La membrana revestida de teflón y posee un cabezal que se toca con el agua. La cubierta de la bomba es de un plástico que soporta químicamente los usos industriales. Su instalación es sencilla y el diseño práctico y compacto para ocupar el menor espacio posible. Como materiales, su cabezal está compuesto por un acero inoxidable 1.4571, la válvula de bola por 316L y la junta por FKM.



Figura 34. Foto del producto

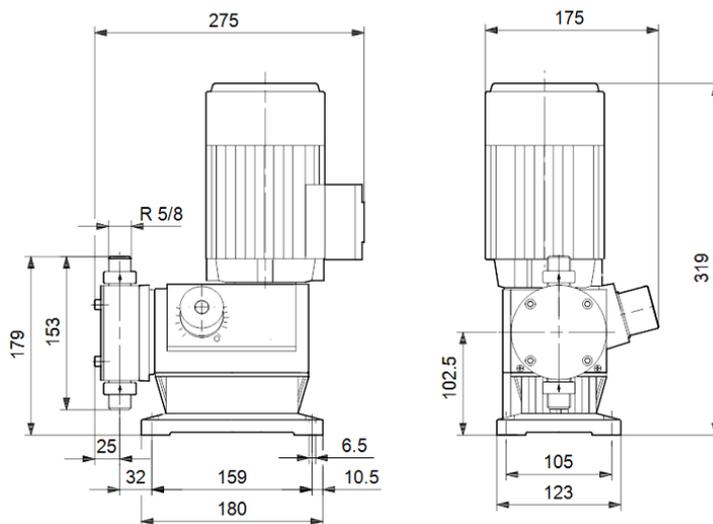


Figura 35. Dimensiones de la bomba.

Para la elección del *gotero* se tendrá en cuenta su alcance, siendo éste de 1 cm. Por lo que será necesario incluir en la instalación uno por cada 5 cm de tubería aproximadamente para humedecer la tierra en abundancia. Siendo necesarios un total de 350 como ya se ha explicado previamente.



*Figura 36. Gotero*



*Figura 37. Gotero instalado en la tubería.*

La ficha técnica del gotero escogido se muestra a continuación:

Tipo de riego	Por goteo
Tipo de producto	Gotero
Caudal [l/h]	0-60
Alcance [m]	0.01
Peso [kg]	0.2

*Tabla 1. Ficha técnica del gotero*

En la conexión de las tuberías, se usarán codos y T's.

Los codos se necesitan para poder cambiar la dirección en 90 grados de la tubería y para unir los tramos de tuberías que tienen que estar conectadas entre sí pero que tienen un cambio de sentido de 90°. Se calculan un total de 5, con 16 mm de diámetro.

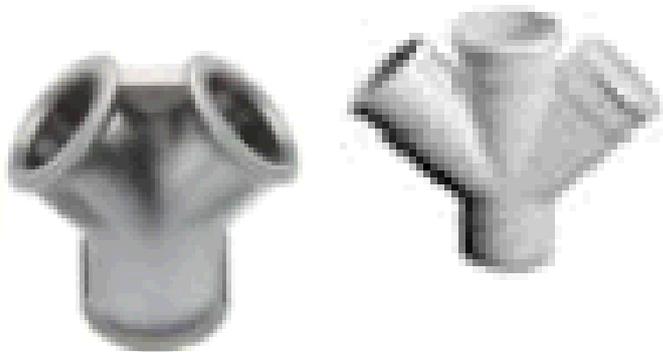


*Figura 38. Codo de 16 mm de diámetro.*

Las T's dividen la dirección a la que iría la tubería en otras dos. A veces el cambio de dirección es en 45°. También se necesitan de 16 mm de diámetro.



*Figura 39. T en 90°*



*Figura 40. T's en 45°*

El mallado metálico para apoyar la tubería de riego sobre él, yendo unido a los soportes de la tubería que hacen de guía y elevan al conducto del suelo se muestra a continuación:

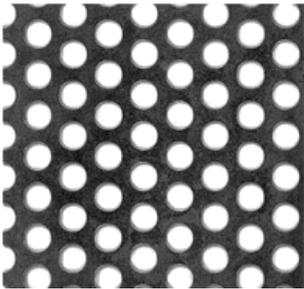


Figura 41. Mallado metálico.



Figura 42. Soporte de la tubería con la malla perforada.

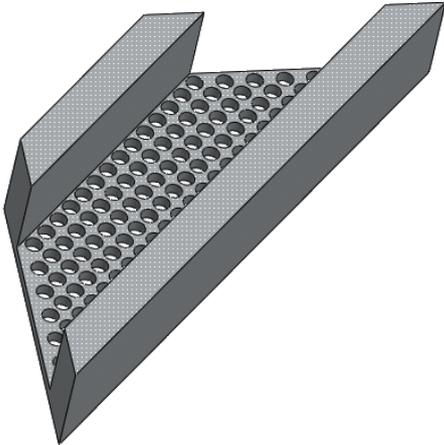


Figura 43. Soporte de las tuberías angulares con la malla perforada.

## ➤ Sistema de autorriego

En la segunda planta de la estructura no será necesario incorporar un sistema de riego como el de la primera, debido a que este piso no está cubierto por otra planta de paraboloides y el agua de lluvia caerá directamente sobre él regando las plantas de manera natural. Sin embargo, para los periodos de tiempo en los que la lluvia puede escasear más, como puede ser en verano, será necesario regar de alguna forma las plantas. Por ello, se ha decidido que el mejor sistema será el de introducir macetas con autorriego, con el cual se almacenará agua que la planta puede utilizar para hidratarse hasta unas tres semanas después de haberla regado directamente. Dadas las condiciones climáticas de la región en la que se ubica el huerto, es difícil que no haya precipitaciones en 3 semanas, por lo que esta decisión se considera apropiada para esta localización.

En el fondo del paraboloide se ubica un depósito que se llenará con agua de lluvia. La entrada del agua al depósito se realiza a través de tubos verticales más largos que sobresalen de la tierra. El depósito en la base almacenará agua con la que se podrá hacer frente a la demanda de las plantas.

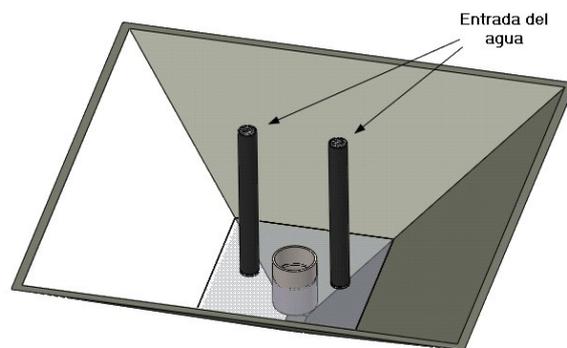


Figura 44. Tubos por los que entrará el agua de lluvia

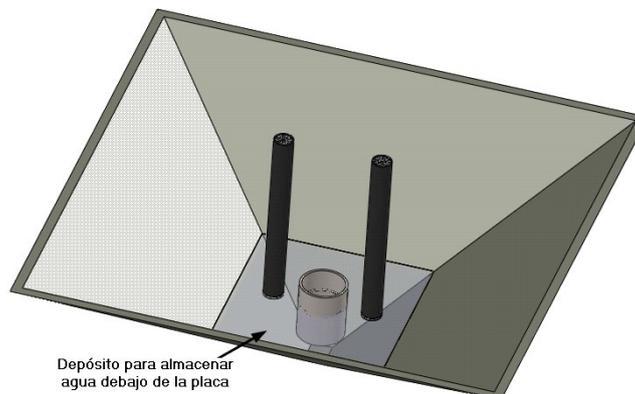
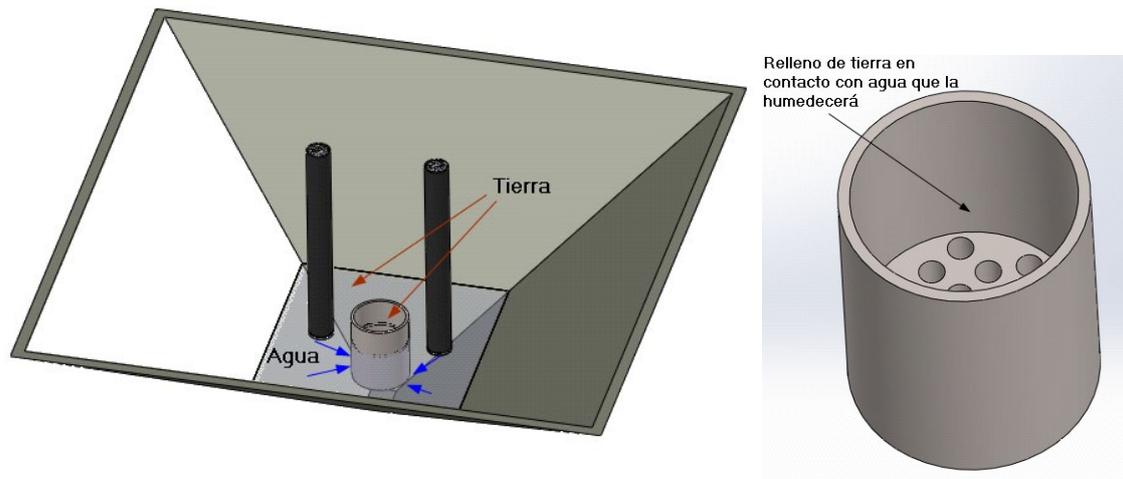


Figura 45. Lugar debajo de la placa donde se apoya la tierra, donde se almacenará el agua

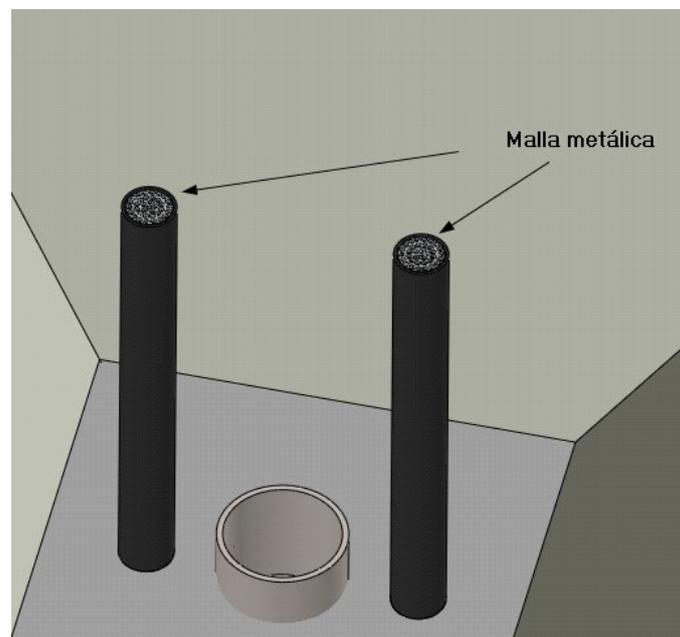
El cilindro central en el fondo del paraboloide dispone de agujeros pequeños y permitirá el paso del agua para humedecer la tierra en contacto con ella. Por lo que las plantas por sí solas, harán

crecer las raíces en dirección a la tierra humedecida, chupando el agua que cada planta necesite, unas usarán más agua y otras menos.



*Figura 46. Tubo que hace entrar en contacto la tierra y el agua.*

Los tubos largos y delgados son los responsables de hacer entrar el agua hacia el fondo. En el extremo superior se les incluye una rejilla o malla metálica para evitar que entre la suciedad o algún insecto que pueda acabar contaminando el agua almacenada u obstruyendo el acceso de la lluvia.



*Figura 47. Rejilla protectora*

El resultado final, incluyendo la tierra y los tubos para la entrada del agua sobresaliendo por encima, resulta discreto tal y como se muestra a continuación:



*Figura 48. Paraboloid final con autorriego.*

#### **2.4 Resultados obtenidos**

Respecto a los resultados estructurales del cálculo, las tensiones obtenidas se encuentran en torno a  $0.177 \times 10^9 \text{Pa}$ , a excepción de la conexión entre el paraboloid y el pilar que son más elevadas. Tal y como se ha comentado con anterioridad, esto puede ser debido a un problema numérico en el contacto entre ambos elementos y que podría solventarse reduciendo localmente el mallado en esa zona. No obstante, al tratarse de una zona tan localizada, esa concentración de tensiones, aparentemente numérica, podría ser solventada en la realidad con pequeños refuerzos en las unión, por lo que no resulta un aspecto preocupante para el diseño general de la estructura.

Asimismo, el resultado de este proyecto es un diseño innovador de huerto vertical, ubicado en nuestra escuela, del que se podrán recoger diferentes frutos y vegetales naturales. Se trata de una solución que aprovecha espacios sin uso.



Figura 49. Resultado final del huerto vertical

- **Referencias**

[1]: “Normas Tecnológicas de jardinería y Paisajismo”, según ASESCUVE, Asociación Española de Cubiertas Verdes.

[2]: Sistema de bombeo: <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&productnumber=96684545&qcid=313736696>

## 2.5 Trabajos o necesidades futuras

Para completar el diseño de este huerto vertical sería interesante hacer un estudio de las vibraciones a las que estaría expuesta la estructura. Al tratarse de una estructura transitable, puede presentar problemas de vibraciones que en este proyecto no han sido abordadas.

Asimismo, los accesos a las diferentes plantas tampoco fueron objeto de estudio en este proyecto. Aunque no parece un aspecto complejo, dada la localización de la estructura, sería importante estudiarlas antes de llevar a cabo una implementación del diseño.

Finalmente, la construcción de un demostrador de este diseño y el estudio de su comportamiento a lo largo de las diferentes estaciones permitiría probar una nueva tecnología de cultivo que sería muy apropiada para el aprovechamiento de espacios infrautilizados, especialmente en espacios urbanos en los que los elementos vegetales tienen multitud de beneficios.

## **2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias...)**

Actualmente, no se ha realizado ninguna publicación científica de los resultados del proyecto debido al poco tiempo del que se ha dispuesto para la realización del mismo.

Sin embargo, la investigadora contratada en este proyecto, Ruth Rico Rodríguez, realizará su Trabajo de Fin de Grado sobre esta temática, resultando un documento publicable y accesible para la comunidad universitaria.

Asimismo, los investigadores del proyecto tienen prevista la divulgación de los resultados de este proyecto a través de alguna jornada o ponencia de construcción sostenible e industrializada a lo largo del próximo año.

### 3. MEMORIA ECONÓMICA

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-17-GIJÓN-1-25.	3.500 €			
Otras fuentes	Referencia proyecto/contrato				
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	Ruth Rico Rodríguez			
	Tareas	Estudio del estado del arte y documentación Diseño conceptual del huerto vertical Cálculo estructural empleando herramientas de cálculo mediante el FEM Diseño del sistema de abastecimiento de agua para el cultivo Realización final del proyecto			
	Período	20/09/2017- 31/12/2017			

### 4. OTROS PROYECTOS Y CONTRATOS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

Título del proyecto/contrato	
Referencia	
Investigador/a/es principal/es	
Equipo investigador	
Periodo de vigencia	
Entidad financiadora	
Cantidad subvencionada	