



***Universidad Nacional Autónoma de México***

***Facultad de Estudios Superiores  
Campus Aragón***

***Análisis de la transferencia de calor en el cultivo de tulipanes en invernadero  
de interfaz con condiciones de frontera***

***Tesis que para obtener el título de  
Ingeniero mecánico electricista  
presenta:***

***Barajas Mendoza Mario Josué***

***México***

***2009***



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## AGRADECIMIENTOS

*Es fácil saber que personas forman parte importante de nuestras vidas, incluso nunca se borran conscientemente de nuestras mentes, porque de una u otra forma son a quien se les debe el estar donde se esta o no, aunque se diga que cada quien por su cuenta hace meritos para obtener lo que tiene, yo creo que solo en algún porcentaje; sin una motivación de algún tipo es imposible hacer las cosas. Por mi parte lo se de sobra, y ellas lo saben de sobra, aunque se rehúsen a ello por algún motivo, es que hay personas que creen fielmente en mi, a pesar de la condición humana, que creo, en mi, prevalece grandemente.*

*En particular, pienso, que siempre se tiene un jurado en la cabeza para quien se hacen las cosas, para que ellas las juzguen, y sus palabras son de peso pues sus cualidades les dan ese poder sobre nosotros, yo tengo dos en especial y aunque se que muchas veces la gente no pondera de la misma forma a la gente, yo lo hago porque en algún grado llegue a conocerlas o las conozco.*

*Obviamente mi familia es un aporte energético grandísimo, y hablo de ella como un ente homogéneo, ya que de otra forma no funcionarían bien las cosas (o por lo menos en mi familia, soy afortunado), mis padres, que siempre han sido el ejemplo correcto de lo que se debe de hacer, sin llegar a convertirlo ellos mismos en patrón, si no en una especie de guía consultable acerca de lo que es la vida, para ser sincero, desde pequeño nunca me sentí desafortunado acerca de esto, a pesar que no fueron años de bonanza económica, uno aprende juzgar en base a otros criterios mas validos, ellos definitivamente son y serán y sin temor a equivocarme a quienes les debo todo lo que soy (mucho o poco), y hablar específicamente de la forma en que me ayudan seria demasiado vulgar, tendrían que decir: en todo.*

*Sin duda alguna Mariana es el motor de mi familia, es la cohesión, la esperanza, la atención, espero que un día se de cuenta y este consciente de lo que su llegada represento en nosotros, ¿que mas aliciente se puede tener sino una personita que esta allí llenando de alegría todo lo que toca?, ninguna.*

*Por otro lado conocí a una persona que sigue siendo importante para mi aunque las circunstancias digan lo contrario: Vanessa, y que es un parámetro importante de mi vida académica y secular, aunque es difícil tener control de lo que pasa y de lo que va a pasar, hay que darle el peso especifico justo a las cosas y espero hacerlo con ella siempre, a final de cuentas, creo que cosas ajenas fueron las que deterioraron en cierta forma nuestra amistad, pero tantas veces que nos apoyamos y que compartimos cosas, me hacen decir y pensar esto y he de reconocer que no soy una persona que lo diga de cualquiera, mas bien a nadie y tengo una leve esperanza de poder tener con ella lo que tenía antes, por que en este tiempo de universidad determino muchas cosas que pasaron conmigo.*

*Para ambos casos, la mirada se tienen fija (o se procura) en objetivos inmediatos, que a final de cuentas eso es vivir (entre otras cosas), pero también debe uno de saber donde tiene el corazón, y el mío esta en estas vertientes de mi vida, .que me juzguen mejor ellos y digan como fui y como soy.*

Mario Josué Barajas Mendoza

# ÍNDICE

OBJETIVO (3)

INTRODUCCIÓN (5)

## CAPITULO 1

*EL INVERNADERO COMO HERRAMIENTA DE CULTIVO (8)*

*1.1 Papel de los invernaderos en el cultivo (8)*

*1.2 Problemática de los invernaderos en México (10)*

## CAPITULO 2

*CONSIDERACIONES ACERCA DEL CULTIVO DE TULIPANES (13)*

*2.1 El tulipán (13)*

*2.1.1 Generalidades (13)*

*2.2 Estudio de las necesidades (15)*

## CAPITULO 3

*ECUACIÓN GENERAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL INVERNADERO (22)*

## CAPITULO 4

*TRANSFERENCIA DE CALOR DEBIDA AL CULTIVO (28)*

*4.1 Consideraciones teóricas acerca de los tulipanes (28)*

*4.2 Balance general para el tulipán (32)*

## CAPITULO 5

*FLUJO EXTERNO DE AIRE EN EL INVERNADERO (37)*

*6.1 Generalidades (37)*

## CAPITULO 6

*TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CUBIERTA (47)*

## CAPITULO 7

*INTERFAZ (57)*

*CONCLUSIONES (67)*

*APÉNDICE A (69)*

*APÉNDICE B (88)*

*APÉNDICE C (90)*

*BIBLIOGRAFÍA (93)*

## OBJETIVO

*Analizar los fenómenos de transferencia de masa y calor mediante modelos matemáticos aplicados al cultivo de tulipanes tempranos, intermedios y tardíos para establecer bases teóricas acerca de la producción de las plantas bulbosas, utilizando condiciones de frontera, en el caso particular de un invernadero propuesto con interfaz.*

*Establecer las relaciones matemáticas que se dan debido a dicha interfaz y su interacción con la temperatura interior del invernadero.*

*Presentar conceptos matemáticos que normalmente no se toman en cuenta para modelar el cultivo protegido, tanto en el aspecto de diseño como en el de la transferencia de calor.*

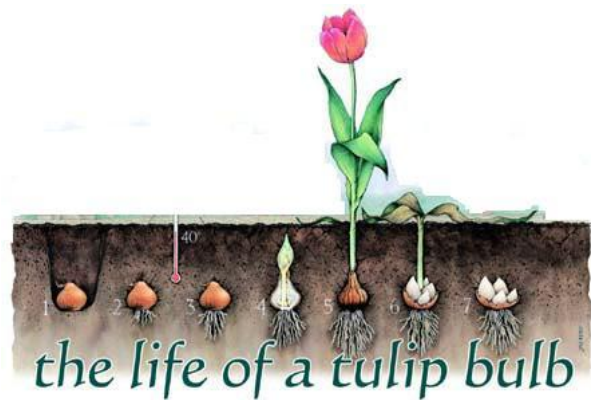
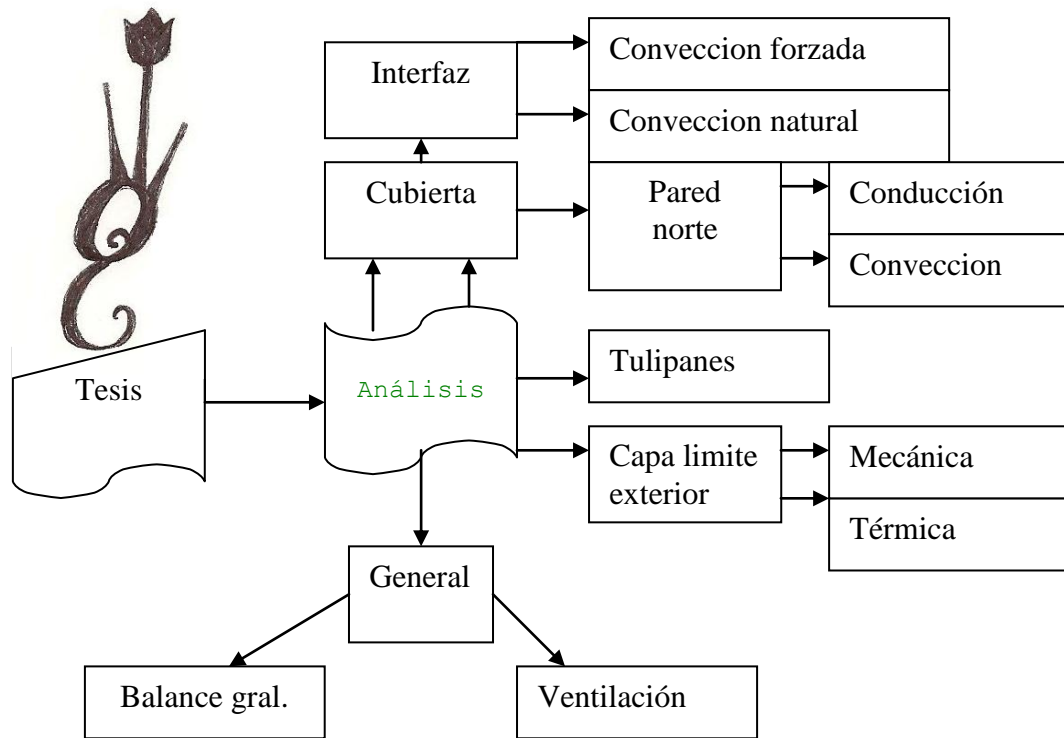
*El objetivo de este trabajo no incluye hacer un benchmarking en el ramo de la fabricación de invernaderos, ni aplicar una metodología estricta de diseño para su dimensionamiento ni fabricación, más bien es un esfuerzo por conjuntar la teoría que existe en cuanto a los fenómenos que aparecen cuando se quiere hacer cultivo protegido y en especial en el modelo que se propone.*

*No intentando ninguna explicación mecanicista de las relaciones entre la temperatura, el calor y la respuesta de los procesos fisiológicos del tulipán y en general de las plantas, por la naturaleza tan compleja y no reconducible a una única reacción química limitante o a proceso solo que generalicen el crecimiento de las flores, simplemente es un intento por unir de cierta forma dos áreas que a primera vista son totalmente diferentes, pero que en realidad no lo son tanto.*

*Pudiéndose optimizar las condiciones psicométricas internas en el invernadero mediante el análisis de calor en la cubierta, se pueden eliminar costos innecesarios para el agricultor, en cuestión de acondicionamiento del aire con equipo, logrando así un invernadero amigable al medio ambiente y reduciendo la inversión con respecto a la agricultura protegida que se vende en el mercado.*

*Las características del análisis tienen que ver con la naturaleza del tulipán, esto es, el tulipán es una planta nativa de la región de Turquía, sin embargo en el siglo XVI se llevo a los Países Bajos con gran resultado, en consecuencia el tulipán como lo conocemos ahora (el que se cultiva en invernadero, Darwin y Triumph principalmente) tiende a ser una flor fría, por lo tanto el análisis se lleva a cabo de acuerdo a lo que muestra el cuadro inferior.*

*Todo esto con el más honesto afán de hacer trabajo matemático formal para aquellas personas que se dedican a la agricultura controlada y que no han tenido un acercamiento a la teoría del sistema complejísimo que es un invernadero.*



## INTRODUCCIÓN

*Es necesario iniciar este trabajo con un enfoque general, debido a la pobre capacitación que tiene tanto el campesino como el técnico agrónomo acerca de detalles que le competen al cultivo del tulipán, como es, los ciclos fenológicos y las características particulares del cultivo, la falta de información es la mas urgente necesidad a cubrir. En los tres primeros capítulos presentamos de manera muy general estas cuestiones, que por las características multidisciplinarias de este texto no se pueden omitir.*

*En los siguientes capítulos se da un análisis de cómo el calor depende íntimamente de factores físicos que son perfectamente predecibles mediante modelos matemáticos y que por lo anteriormente mencionado, son desconocidos por los profesionales del campo y el cultivo, y así, dar un enfoque general del parámetro mas importante de un cultivo protegido: el calor.*

*Cuando hablamos de tulipán, inmediatamente nos viene a la cabeza el nombre de Holanda y efectivamente la zona comprendida entre Haarlem y Leiden es conocida como la 'región del bulbo', aunque en muchas regiones de este país se tiene producción aceptable de esta planta.*

*En las últimas décadas el número de hectáreas dedicadas al cultivo de esta flor aumento dramáticamente en los países bajos de 10, 000 hectáreas en la década de los sesenta hasta mas de 21, 000 en 2002 y el numero de hectáreas por agricultor se incremento de 1 a 8 en el mismo lapso de tiempo, esto debido a la tecnificación en el cultivo y a las condiciones climatologicas del país. Además de proveer empleo a 20,000 trabajadores, ya que el escalonamiento del cultivo les permite estar ocupados todo el año. Lo que a todas luces nos indica que es rentable invertir en el negocio de las flores.*

*Más del 75% de la producción de bulbo y flor es exportada por los agricultores neerlandeses, siendo los principales consumidores de esta flor Estados Unidos, seguido de Alemania, Japón, Reino Unido, Italia y Francia.*

*En Holanda hay 5,000 productores de flores, 7,625 hectáreas cultivables, de las cuales el 70% es de invernadero. La mayor parte de su producción florícola es obtenida a través de invernaderos.*

*Este negocio tiene dos vertientes que se dan en el mercado internacional y que, de proponerse los agricultores, podrían ser aplicables al comercio en México:*

*-El llamado forcing market, que tiene que ver con la flor cortada y plantas en maceta.*

*-El llamado dry sale market, que tiene que ver con el consumo individual, parques y el hogar.*



En el caso de los productores holandeses, distribuyen su producción de la siguiente manera de acuerdo al mercado al que se destine la flor, y se puede adoptar esta condición para determinar el nivel de producción que se quiere tener aquí,

	Dry sales (%)	Forcing (%)
supermercados	20	16
Pedido por la red	26	-
productores	18	6
Tiendas	11	-
parques	3	-
florerías	2	62
mercados	1	11
otros	20	5

En 2008 Holanda produjo mas de 10 billones de bulbos, y es aproximadamente le 65% de la producción mundial, lo que hace que el costo de estas plantas sea alto por cuestiones de logística y transporte; en América, los productores que mas o menos tienen buena producción son Chile y Argentina, con la desventaja de que los bulbos que se producen en el cono sur son inservibles para el cono norte, por cuestiones de reloj biológico, si se quiere producir tulipán se deberá pensar seriamente en producir nuestro propio bulbo.

Es por todo lo anterior que los productores en México deben aprovechar nuestra condición geográfica con Estados Unidos, que aunque, junto con Canadá son los consumidores primarios de México, no se tiene una variedad de flor para satisfacer las necesidades del vecino del norte, además, se ha olvidado el mercado europeo que igualmente puede ser un punto de venta fuerte, pero el desconocimiento de las leyes de exportación y la falta de interés por una regulación gubernamental no terminan por aquejar el desarrollo de el sector florícola mexicano.

Alrededor del 90% de la producción nacional se destina a los mercados nacionales y el resto es enviado a los mercados internacionales. Las características principales de la comercialización nacional son:

-Inexistencia de índices de calidad.

-En el manejo post-cosecha las flores son atadas o depositadas en cajas y trasladadas en camiones descubiertos, junto con otros productos, repercutiendo en la vida de anaquel del producto.

Para alcanzar un aumento de producción sería necesario una adecuación de líneas de financiamiento para la floricultura, la liberación a la importación de diversos consumos requeridos, un real fomento a la organización de productores y por supuesto la instauración de una promoción en el exterior de la floricultura nacional.

No obstante, la respuesta de la floricultura no es la esperada debido a factores como:

- Parcial intercambio tecnológico entre productores.
- Baja respuesta a la organización para integrar un transporte en bloque a la exportación.
- Escasa seriedad y fiabilidad ante el importador.
- Deficiente transporte aéreo comercial para la floricultura.

Si se solucionaran los problemas anteriores, la participación de la floricultura nacional incrementará su participación en el mercado externo, no tan sólo en flores de corte, sino también en esquejas y plantas de follaje.

En México el problema principal del cultivo de las flores en general es la calidad (tamaño, forma, color, duración de la flor), pero a pesar de todo se ha dado un crecimiento en la producción de flor cortada, sobretodo en la época de 14 de febrero y fechas típicas de consumo de flor, lo que hace un buen mercado también, aunque los números siguen siendo pobres en comparación con otros países como Colombia, Israel, etc.

No obstante en 2008 se posiciona el tulipán como la cuarta flor de demanda, solo debajo de la clásica rosa, la gerbera, y el liliium, teniendo una producción de 4.2 millones de tallos (en las épocas mencionadas) con un costo de 100 pesos promedio los diez tallos. Destinando 14 hectáreas contra las 10, 000 que se cultivan en Holanda.

Es imperante abrirse mercado ofreciendo nuevos productos que han demostrado ser rentables y que pueden satisfacer en gran porcentaje las necesidades de productores y de consumidores.

Todo gira en torno de satisfacer las necesidades y de hacer mercado en México y cultura del tulipán.

# Capítulo I

## EL INVERNADERO COMO HERRAMIENTA DE CULTIVO

### 1.1 PAPEL DE LOS INVERNADEROS EN EL CULTIVO

*Cada vez más los invernaderos forman parte de procesos productivos que involucren a especies vegetales; tanto en grandes empresas como en el hogar para producción de hortalizas para el autoconsumo.*

*Hasta hace un tiempo, los invernaderos eran una práctica costosa, que solo se justificaba para cultivos muy valiosos. Hoy, gracias a la existencia en el mercado de nuevos materiales, los invernaderos constituyen una herramienta útil y económica con la cual es posible prolongar los periodos de crecimiento de las plantas en general.*

*Un invernadero es una construcción de estructura cubierta, cuyo ambiente interior puede ser controlado debido a que los materiales utilizados son transparentes y permiten el paso de la luz solar. El invernadero es un factor de protección para los cultivos establecidos.*

*En verano, el papel del invernadero es más complejo. A pesar de que la protección reduce considerablemente la radiación incidente, que a menudo puede ser excesiva (efecto de sombreo), la temperatura del invernadero puede mantenerse con dificultad dentro de los límites aceptables por el cultivo. Éste es actualmente uno de los problemas más serios de la técnica. Merece mencionarse el efecto cortavientos, pues actúa, sobretodo en zonas áridas, a dos niveles: reduce los efectos mecánicos del viento y mejora las condiciones higrométricas dentro de los invernaderos.*

*La cubierta actúa como reductor de la evapotranspiración de los cultivos. En el invernadero alcanza aproximadamente el 70 % de la registrada en el exterior en un cultivo de invierno, mientras que el consumo de agua por Kg. de fruto puede ser la mitad (por ejemplo en tomate).*

*Cuando los vientos secos y cálidos barren las zonas áridas, se cierran las estructuras de protección y la evaporación de la cubierta vegetal hace que la humedad relativa del invernadero aumente considerablemente y que la temperatura suba ligeramente.*

*El papel principal de los invernaderos varía con el clima; consiste en mejorar las condiciones de temperaturas necesarias para producir fuera de estación (se pretende intensificar la producción alargando el período de cultivo intensivo), o bien, en permitir un uso mejor del agua disponible. Siendo este efecto nada despreciable y capaz de mejorar considerablemente la producción.*

*Las características climáticas de una zona deben analizarse en relación con las necesidades de las plantas que se intentan cultivar.*

Las especies cultivadas bajo protección son principalmente especies de estación cálida, adaptadas a temperaturas de aire con medias mensuales que fluctúan de 17 a 27 °C, que aproximadamente corresponden con los siguientes límites: temperaturas mínimas medias de 12 °C y temperaturas máximas medias mensuales de 32 °C.

Las heladas destruyen a las especies de estación cálida. Se acepta, generalmente, que el riesgo de que la temperatura descienda por debajo de cero durante un período suficientemente largo, para destruir los cultivos, puede despreciarse si la temperatura mínima media mensual excede de 7 °C.

Las temperaturas por debajo de 10 a 12 °C, durante una serie de días consecutivos, no destruyen los cultivos, pero afectan a su comportamiento y condicionan la productividad- tanto cualitativa, como cuantitativamente.

Las temperaturas por encima de 30 °C (si la humedad del aire es muy baja) o por encima de 35° (si la humedad relativa es alta) no son fácilmente toleradas por las plantas y causan daños extensivos en las cosechas.

Los cultivos requieren cierta amplitud o variación diaria de temperatura para que su comportamiento fisiológico sea normal. La diferencia mínima entre las temperaturas medias del día y de la noches alrededor de 5 a 7 °C.

La latitud del lugar y la estación del año condicionan que las necesidades de horas luz de los cultivos queden satisfechas o no; necesidad ligada a la duración de la noche más que a la del día. En caso de que sea preciso, la duración de la noche puede modificarse con facilidad, utilizando las técnicas de sombreo o de iluminación intermitente para acortar la noche.

En México, los primeros invernaderos con interés comercial fueron instalados en la región oriente del Estado de México por emigrantes alemanes y japoneses; destacaron la casa Matsumoto y la familia Barto como las empresas pioneras en la construcción y manejo de invernaderos. Entonces sus construcciones eran de concreto, herrería y cristal.

A finales de los 70, se promovió el uso y construcción de invernaderos, sobre todo de estructura de madera y cubierta de películas de plástico. Asimismo, se empezaron a adoptar otras tecnologías basadas en la fibra de vidrio y estructuras metálicas. En la década de los 80, se presenta un auge en el desarrollo de los invernaderos, principalmente para floricultura, viverismo y producción de plántulas de hortalizas, con la formación de varias empresas, que se instalaron en el sur del Estado de México, concretamente en la región de Villa Guerrero y en otras partes del país. Desarrollo que se basa en la construcción de estructuras multicapilla a dos aguas con ventila cenital tipo colombiano.

Para la década de los 90, ya existen todo tipo de invernaderos en México país, que adoptan avances e innovaciones tecnológicas de vanguardia consistentes en el uso de invernaderos con estructuras de materiales más ligeros con

cubiertas de plástico en sustitución del vidrio, sistemas sencillos de control climático-automatizado y equipos de riego automatizado con fertirrigación.

Es a partir del 1995, durante la etapa de crisis económica generada por la devaluación ocurrida en México, cuando se presentan las condiciones oportunas para la inversión en producción hortícola bajo invernadero, y cobran gran interés entre los mayores productores de hortalizas de los estados de Sinaloa, Sonora, Baja California, Jalisco, en la zona de El Bajío y algunos otros estados del sur del país. Es en los últimos años, cuando los productores nacionales requieren de mayores avances en lo referente a controles y automatización de operaciones en invernaderos.

## 1.2 PROBLEMÁTICA DE LOS INVERNADEROS EN MÉXICO

El diseño de un invernadero consiste en generar nuevas ideas a partir de diferentes necesidades teniendo como requisito los materiales nacionales que existen en el mercado, los cuales le darán una característica particular. En México el diseño se desarrolla lentamente, la mayor parte de los modelos que existen son copiados de invernaderos importados debido a la falta de crecimiento de las empresas nacionales. En nuestro país no hay una escuela que se dedique a diseñar invernaderos. Las empresas nacionales han estado estancadas durante varios años en la cuestión del diseño porque se dedican más a comercializar invernaderos y no se preocupan por diseñarlos. En México sólo existen 15 empresas dedicadas a la venta de invernaderos, según los datos de la Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos (AMCI).

Los costos de los invernaderos varían dependiendo del nivel tecnológico; un invernadero nacional cuesta alrededor de 370 pesos el metro cuadrado; incluye la construcción, el sistema de riego y la calefacción. Pero el precio puede variar según la empresa fabricante. El clima en el territorio mexicano es muy variado, y por lo tanto se convierte en el factor primordial para elegir un invernadero; se debe pensar en seleccionar un tipo de estructura que mejore el ambiente del exterior en su interior para que los cultivos se desarrollen satisfactoriamente. Cada región requiere un invernadero diferente.

El viento es algo elemental. En el ambiente del invernadero el aire debe circular entre 210 y 240 metros por minuto (14.4 km por hora), según los cánones estadounidenses, para que exista una atmósfera adecuada. La idea de diseñar invernaderos ventilados parte de observar los problemas que presentan los cultivos debido a la falta de ventilación. Al crear un ambiente dentro del invernadero, buscamos características muy definidas para un cultivo, que le permita expresar genéticamente todo su potencial. En el momento en que las condiciones ambientales no son las adecuadas el cultivo no va a lograrlo. Por ello hay que diseñar una construcción que no deforme el ambiente natural sino que lo mejore. La belleza del cambio que tuvo el invernadero tipo cenital fue que se rompió el centro para desfasarlo y lograr la ventila que se conoce actualmente en el mercado. Esta estructura puede ser eficiente en invernaderos pequeños, pero en construcciones muy grandes no es tan funcional, porque a la mitad del invernadero la válvula de escape ya no permite la entrada de aire.

*El invernadero tipo túnel se introdujo en México desde 1970 y fue utilizado hasta fines de los años ochenta como el invernadero de batalla de los productores nacionales. El problema fue que se instaló por igual en zonas secas como en húmedas. Este invernadero es como un “desastre natural”, pues genera en su interior demasiada concentración de calor, humedad relativa y no permite el paso y circulación del aire.*

*La temperatura en el túnel alcanza los 50 grados centígrados entre las 13:00 y las 15:00 horas, condición en la que ninguna planta podría sobrevivir, ni nosotros mismos. Este tipo de invernadero funciona para algunos cultivos pero no para la totalidad. Podría utilizarse en la germinación de semillas pero en ninguna circunstancia sería una buena construcción para cultivar plantas. En una segunda etapa se construyó el denominado verti túnel, modelo que muchas empresas estadounidenses introdujeron al país. Al igual que el anterior presentó problemas de alta temperatura en días soleados, gran cantidad de humedad y poca fluctuación del aire. Este hecho fuerza el metabolismo de las plantas las cuales no llegan a buen fin. La temperatura ideal para una planta debe oscilar entre 20 y 25 grados centígrados, no más.*

*Para saber si un invernadero es adecuado, estar dentro del invernadero entre la una y las tres de la tarde sin sudar, si esto se logra el invernadero es fantástico, pero si se tiene que salir corriendo porque es mucho el calor ese invernadero no sirve. Esta condición está en el 90 por ciento de los invernaderos en el país*

*Los constructores no son diseñadores, edifican algo que ya tiene afinado en su proceso de producción sin importar si funciona o no, lo que les interesa es vender.*

*La agricultura tradicional que se realiza a campo abierto, sin ninguna protección, está expuesta a factores nocivos como la alta radiación solar, alta humedad relativa, lluvia directa, granizadas, heladas, polvo, malezas, lluvia ácida, plagas, enfermedades, daños de animales, variabilidad en la fertilidad del suelo, régimen hídrico inestable y al propio hombre.*

*Cuando se habla de un cultivo protegido en invernadero se hace referencia a cuidar las cosechas de los factores mencionados mediante la utilización de tecnologías y al control del exceso de la radiación solar.*

*La radiación solar es una fuente de energía que aprovechan las plantas para realizar su proceso más importante –la fotosíntesis -. Un invernadero permite controlar la filtración de la radiación solar según el requerimiento de la planta. Los excesos de radiación pueden disminuirse con el uso de plásticos con diferentes niveles de pigmentación, de tal manera que haya cierto porcentaje de sombra, desde el 15 y hasta el 80 por ciento; los hay de diferentes colores: transparentes, verdes, azules, amarillos y blancos.*

*El invernadero debe ser permeable a la luz y al paso del viento, pero no debe permitir los efectos de precipitación, agua, granizo o nieve. El granizo es un*

factor ambiental importante en la estabilidad de las estructuras; cuando éstas han sido mal diseñadas una granizada puede derrumbar las construcciones.

En México es muy importante considerar la ventilación natural como básica en los invernaderos, porque la instalación de sistemas mecánicos de ventilación implica demasiada inversión por consumo de energía y muchos productores no pueden costearla. Sólo en casos especiales podría considerarse la implementación de ventilación artificial como en el cultivo de especies muy rentables, para investigación científica o cuando se desee tener un modelo de invernadero altamente tecnificado.

Al iniciar una producción de cultivos protegidos, el mejor productor es aquel que no sabe nada de agricultura pues así un buen diseñador, fabricante y constructor podría venderle algo adecuado tomando en consideración el clima de la región. La mayoría de las veces los productores están casados con una idea y no se les puede cambiar de paradigma. Los campesinos generalmente atribuyen sus malas cosechas a la mala suerte, plagas y enfermedades. Este pensamiento poco analítico es la causa de que sea más difícil aprovechar los conocimientos sobre el medio ambiente y con ello mejorar sus cultivos.

Los avances tecnológicos en invernaderos hoy están enfocados a la creación de pantallas térmicas para eliminar el problema de la alta radiación y las altas temperaturas en el invernadero, a resolver problemas técnicos como conducción y nutrición de los cultivos, nuevos sistemas de riego y producción, así como a las mejoras en la automatización.

En México, los avances de tecnología para invernaderos son muy lentos debido a que la investigación académica no tiene el acceso a las nuevas tecnologías, a pesar de que sí cuenta con gente capacitada; es más sencillo para una microempresa dedicada a la construcción de invernaderos, pues tiene la posibilidad de realizar cambios en los procesos de fabricación y construcción que le permitan aplicar las nuevas tecnologías.

Hay un divorcio entre las áreas científica, académica e industrial, las grandes empresas no creen en las escuelas oficiales porque saben que no tienen los recursos económicos para acercarse a las tecnologías importadas y copiarlas o rediseñarlas, mucho menos para diseñar lo nacional.

Al elegir un invernadero es importante que sea funcional, resistente, económico, versátil que se pueda dedicar a diversos cultivos, operable por cualquier persona que tenga formación fisiológica y que la temperatura en su interior no rebase los 30 grados centígrados.

## Capítulo II

### CONSIDERACIONES ACERCA DEL TULIPÁN Y SU CULTIVO

#### 2.1 EL TULIPÁN

##### 2.1.1- Generalidades

Reino: *Plantae*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Lilliosida*

Orden: *Liliales*

Familia: *Liliaceae*

Genero: *Tulipa*

*Es una planta bulbosa de floración primaveral. La planta entera; tallo, hojas y flores están comprimidos y encerrados dentro del bulbo, este es el órgano de reserva y multiplicación, formado por un tallo axial, corto y carnoso y cuya parte inferior se denomina placa basal, y una superior o ápice que envuelve a un meristemo recubierto con escamas gruesas, situado en el eje del bulbo que originará el tallo aéreo. Una de las principales características del bulbo son las escamas exteriores secas llamadas "túnicas", cuya función es la defensa contra lesiones mecánicas y la desecación. Las escamas interiores son carnosas, denominadas "láminas", distribuidas en capas contiguas y concéntricas, cuya función es almacenar las sustancias de reserva.*



Corte transversal de bulbo de tulipán

*Sus hojas son escasas, de color verde a verde grisáceo, algo carnosas, de linear-lanceoladas a anchamente ovaladas que carecen de peciolo y nacen de la parte baja de la planta, decreciendo en tamaño hacia la parte superior del tallo. La lámina foliar es sencilla, entera y paralelinervia.*

*Las flores son generalmente solitarias, orientadas hacia arriba, más o menos acampanadas, pudiendo tener tépalos dobles o simples, dispuestos en forma de cáliz y generalmente en número de seis, con una amplia gama de coloridos. Perianto de seis segmentos libres dispuestos en dos verticilos, androceo con seis estambres y estigma tri lobado.*

*Su fruto es una cápsula esférica o elipsoide de tres valvas erectas, conteniendo numerosas semillas planas.*



Existen más de tres mil variedades de tulipanes según la Royal Horticultural Association of Holland, pero la clasificación oficial tiene que ver con las características que presentan, tanto en su aspecto, como en la naturaleza de su desarrollo y por comodidad se han clasificado en 15 clases:



Tulipanes en grabados del siglo XVI

- *tulipanes simples tempranos (single early tulips)*
- *tulipanes dobles tempranos (double early tulips)*
- *tulipanes triumph (triumph tulips)*
- *tulipanes Darwin (Darwin hybrid tulips)*
- *tulipanes simples tardios (single late tulips)*
- *tulipanes dobles tardios (double late tulips)*
- *tulipanes lilium (lily-flowered tulips)*
- *tulipanes desflecados (fringed tulips)*
- *tulipanes viridiflora (viridiflora tulips)*
- *tulipanes parrot (parrot tulips)*
- *tulipanes Rembrandt (Rembrandt tulips)*
- *tulipanes Kaufmanianna (Kaufmanianna tulips)*
- 
- *tulipanes Greigii (Greigii tulips)*
- *tulipanes Fosteriana (Fosteriana tulips)*
- *variedades (botanical tulips)*

Se pueden tener grandes rendimientos en la venta de cualquier tipo de tulipán debido a su belleza intrínseca.

En el mercado internacional se han colocado a los tulipanes triumph como los que mejor se dan en condiciones de invernadero y de forzado, tienen fragancia, son resistentes a malos climas y tienen buena conservación en envases y macetas, por otro lado, los tulipanes Darwin son considerados los mejores para corte gracias a su tamaño enorme en comparación con otros tulipanes y por que pueden cultivarse varios años con el mismo bulbo, por eso se les llama también perennes.

En el apéndice 1 de este texto tenemos una pequeña prueba de algunas de las variedades de tulipán cultivable, aunque muchos de ellos conservan sus tépalos solo dos o tres semanas es evidente el mercado potencial de esta flor turca.

## 2.1-ESTUDIO DE LAS NECESIDADES

El tulipán pertenece a un grupo de bulbáceas que sólo florecerán con una longitud de tallo adecuada si se los ha expuesto durante un cierto tiempo a bajas temperaturas.

Si se trata de cultivos al aire libre en regiones donde el invierno es largo y frío (no menos de 60 días con temperaturas de suelo de 5°C) los bulbos de tulipán reciben el frío necesario de una manera natural y en consecuencia florecerán en primavera con un tamaño de flor y longitud de tallo adecuados a su variedad.

En México, el clima no nos favorece mucho para esperar este tipo de comportamiento, no obstante, el tulipán puede florecer más temprano si se lo somete artificialmente a un proceso de frío y se los cultiva bajo cubierta. Este procedimiento se denomina forzado.

No es el objetivo de este texto dimensionar el invernadero propuesto, simplemente analizarlo matemáticamente junto con los parámetros del cultivo, por lo tanto esto nos lleva a estudiar las dos vertientes que condicionan el cultivo bajo protección.

Dividimos esta sección en dos partes:

- necesidades explícitas
- necesidades implícitas

En la primera se definen las características que el productor desea para el invernadero en cuanto a nivel técnico y costo. La segunda viene dada por las peculiares exigencias de los tulipanes para su cultivo, que son invariables si se quiere tener un corte de flor adecuado.

Necesidades explícitas

Lo único que nos interesaría de las necesidades explícitas es conocer la ubicación geográfica del invernadero que se pretende, pues las características climatológicas del lugar son fundamentales, siendo el principal factor en contra, pues de esto depende que se piense en otros métodos de climatización, se sabe que la región florícola por excelencia en México se ubica en la región centro del país.

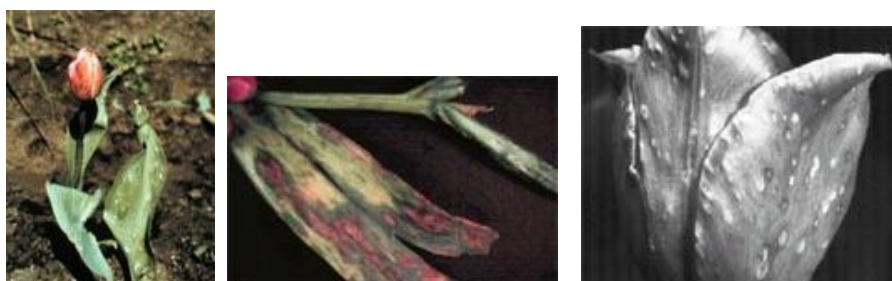
Otra característica que se desearía saber, es la cantidad de flores y las variedades a cultivar, lo óptimo para un invernadero es la producción de un millón de tulipanes, debiendo tener especies tempranas, intermedias y tardías (se denominan así por la época de floración), para permitir el escalonamiento del cultivo. Debemos recordar que la diferencia de las temperaturas de día y de noche no debe ser mayor a 6 o 7 grados centígrados, cuestión por la cual se deben de tener en cuenta las máximas y mínimas registradas para cada región.

#### -Necesidades intrínsecas del cultivo

Los tulipanes son una flor que requiere condiciones específicas para su crecimiento, de acuerdo a esto se tienen parámetros definidos para evitar principalmente la aparición de agentes patógenos o que presente un mal desarrollo, y como consecuencia la pérdida de parcial o total de la producción. Los principales agentes dañinos para las liliáceas en general aparecen por descuidos técnicos:

AGENTE	TIPO
<i>Aphis gossypii</i>	Afido
<i>Myzus persicae</i>	Afido
<i>Botrytis tulipae</i>	Hongo
<i>Fusarium oxysporum f. sp. tulipae</i>	
<i>Erwinia carotovora</i>	Patógenos
<i>Penicillium</i>	Hongo
<i>Phytium</i>	Patógenos
<i>Phytophthora cactorum</i>	Patógenos
Nematodos, <i>Ditylenchus dipsaci</i>	Insectos

Agentes nocivos del tulipán



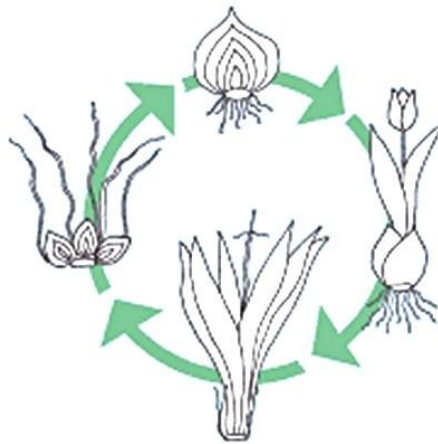
*Botrytis tulipae*

Según la Royal Horticultural of Holland debemos cumplir las siguientes condiciones:

PARÁMETRO	MAGNITUD DESEADA	
Temperatura	De 15 a 20 °C	Se deben evitar fluctuaciones pues esto detiene el crecimiento y aumenta el riesgo de eclosión de la flor, en exceso provoca crecimiento anormal.
Humedad relativa	De 60 a 85 %	Una HR insuficiente atrasa el desarrollo, quema las hojas y se presentan tallos poco rígidos. Un HR excesiva aumenta la incidencia de fúngicos, se da eclosión prematura y flores chicas. Pero que supere el 85%, para evitar la incidencia de ataques fúngicos como <i>Botrytis tulipae</i> .
Acidez del suelo	De 6.5 a 7.5 PH	El tulipán es sensible a las concentraciones de sal,
Temperatura del suelo	De 13 a 16 °C	Sobre éstas incrementan la posibilidad de ataque de <i>Fusarium oxysporum</i> .
Luz	bajo nivel de iluminación	El componente de color azul en las lámparas fluorescentes de luz blanca es indispensable para lograr una buena formación de la flor. En zonas con alta incidencia lumínica y temperaturas altas se produce un adelantamiento de la floración en detrimento del largo de la vara
Bióxido de carbono	De 1000 a 1300 vpm	
K <sub>2</sub> O		Mejora la síntesis y migración de los glúcidos hacia el bulbo y mejora la coloración de las flores
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Favorece el crecimiento

Es necesario garantizar dichas exigencias porque el ciclo del tulipán comprende dos fases perfectamente diferenciadas, la vegetativa y la reproductiva.

En la primera fase los bulbos crecen hasta llegar al tamaño adecuado para florecer. La fase reproductiva comprende la inducción floral, diferenciación de las partes florales, alargamiento del tallo floral y floración. El comienzo de la fase reproductiva se da cuando las hojas se secan y el bulbo está maduro, momento a partir del cual se produce la evolución de las partes florales (normalmente en los locales de almacenamiento), por tanto la formación de la flor se inicia una vez cosechado el bulbo durante el proceso de almacenaje. Podríamos decir entonces que se tienen cuatro estadios también diferenciados (en sentido de las manecillas del reloj)



- Bulbo (siembra)
- Floración (corte de flores)
- Senescencia
- Formación de bulbos hijos (cosecha)

Si se altera el ciclo de cultivo, obviamente las flores perderán turgencia y demás peculiaridades que se desean, lo que no puede ocurrir ya que es el principal atractivo del tulipán.

Para identificar estos estadios se suele tener una nomenclatura que indica el nivel de crecimiento de la yema floral:

- P1, la parte exterior de los pétalos formada
- P2, la parte interior de los pétalos formada
- A1, la parte exterior de las anteras formadas
- A2, la parte interior de las anteras formadas
- A2+, gineceo visible pero aplanado
- G, gineceo enrollado de forma triangular
- G+, todas las partes de la flor visibles



Estadio A2



Estadio G

*Debido a las técnicas de preparación y conservación de bulbos, la plantación de bulbos de tulipán puede realizarse en diferentes momentos, dependiendo fundamentalmente de las condiciones climáticas.*

*La época de plantación varía con la posición geográfica del invernadero y hay que asegurarse de que los bulbos estén de acuerdo al hemisferio en el que se encuentre el futuro productor. De acuerdo con la siguiente tabla:*

	<i>HEMISFERIO NORTE</i>	<i>HEMISFERIO SUR</i>
<i>Siembra (bulbo)</i>	<i>Finales de septiembre, principios de octubre</i>	<i>Principios de mayo</i>
<i>Floración</i>	<i>Finales de marzo, principios de abril</i>	<i>Finales de septiembre, principios de octubre</i>
<i>Cosecha (formación de bulbos hijos)</i>	<i>A mediados de junio</i>	<i>Enero</i>

Ciclo fenológico del tulipán

*Los bulbos que se plantan fuera de su reloj biológico, que depende principalmente del hemisferio en que se forzan, tiene baja productividad no importando que se cumplan con sus condiciones de crecimiento, por lo tanto, el trabajo inicia desde el forzado del bulbo, que se hace mediante tratamiento térmico especial, esto es, desde que se recoge el bulbo del suelo después de una previa cosecha (lo cual para invernaderos no es recomendable pues la*



existencia de bulbos remanentes de previos cultivos, aumenta la posibilidad de infección del suelo o desde que se trae el bulbo en algún estadio en particular.

Podemos también resumir las necesidades de temperatura del tulipán desde la cosecha (si es que se hace) y el forzado, esto de manera muy general en tres puntos fundamentales:

- A partir de la cosecha hasta la fase A2 o G
- tratamiento intermedio
- tratamiento en frío

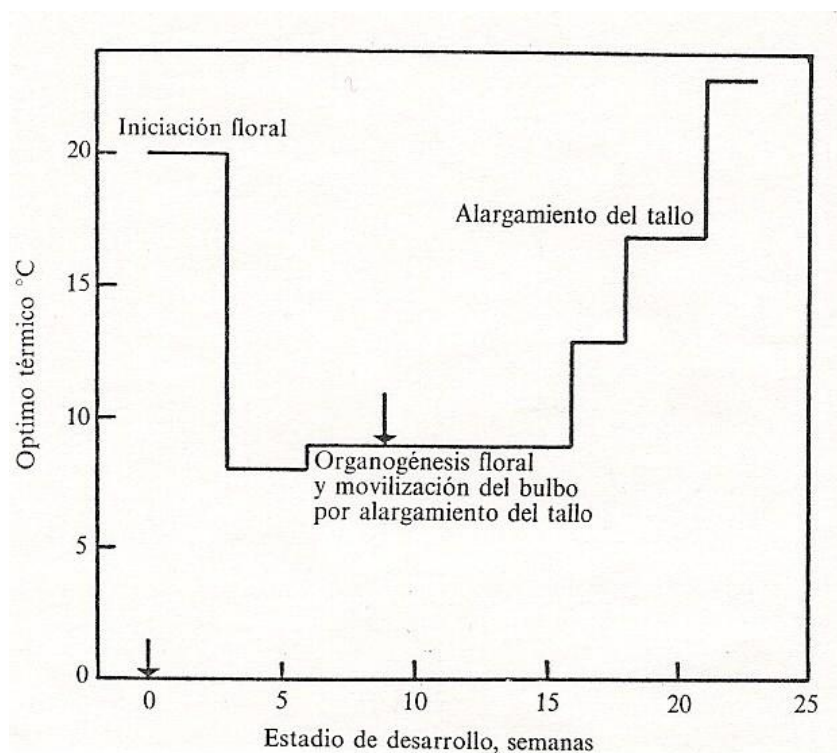
#### A PARTIR DE LA COSECHA HASTA LA FASE A2 O G

-El sustrato debe de tener una temperatura mayor de 13 grados centígrados no mayor a 16.

Inmediatamente después de la cosecha:

- Unos 34 grados centígrados durante 7 días (para la diferenciación del ápice vegetativo en yema floral)
- Unos 17 a 20 grados centígrados de 5 a 6 semanas (para el crecimiento de las partes de la yema floral hasta alcanzar el estadio A2 o G)

#### TRATAMIENTO INTERMEDIO Y FRIO



Grafica de desarrollo del tulipán

- 20 grados centígrados durante un período variable

*El tratamiento intermedio permite almacenar los bulbos durante un tiempo prolongado para programar la entrega escalonada. Es la temperatura a la que deben almacenarse los bulbos durante un transporte largo.*

*-9 grados centígrados durante 6 semanas para bulbos con estadio A2.  
(Destino: cultivo en cajas o en invernaderos climas fríos)*

*-5 grados centígrados durante 9-12 semanas para bulbos con estadio G.  
(Destino: cultivo en invernaderos climas templados)*

*Siendo esta parte importante ya que es una imitación del invierno, el almidón se convierte en azúcar, los azúcares servirán para la elongación de células además de que el bulbo almacena suficiente reservas como para crear una nueva planta con el agregado de agua solamente. El tratamiento de frío asegura el crecimiento del tallo y acelera tasa de crecimiento del cultivo.*

*Es de tener en cuenta que debido a las temperaturas mensuales promedio en nuestro país, el escalonamiento debe pensarse de acuerdo al tiempo de floración de las especies:*

<i>ESPECIE</i>	<i>FLORACION</i>
<i>Tempranos</i>	<i>Mediados de marzo a mediados de abril</i>
<i>Intermedios</i>	<i>Mediados de abril a mediados de mayo</i>
<i>Tardíos</i>	<i>Mediados de mayo</i>

Cultivo del tulipán de acuerdo a su especie



## Capítulo III

### ECUACIÓN GENERAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL INVERNADERO

*El crecimiento de los tulipanes requiere dos tipos de mediciones que se realizan en los cultivos para determinar su óptimo estado, y se basan en dos conceptos muy importantes desde el punto de vista de alometría:*

*-área de hoja (leaf area)*

*-peso seco (dry weight)*

*Las mediciones para determinar estos parámetros se llevan a cabo en dos fases, la primera se hace a un grupo extenso de tulipanes del cultivo y se da cada 1 o 2 semanas, la otra a un grupo mucho menor de flores cada 1 o 2 días, las pruebas se realizan regularmente con métodos fotoeléctricos o cálculos con regresión lineal.*

*Existen muchas cantidades derivadas del peso de la planta y el área de la hoja, los más importantes son:*

*-RGR (relative growth rate): expresa el incremento del peso en seco en un intervalo de tiempo respecto a su peso inicial.*

*-LAR (leaf area ratio): expresa la relación entre la capa fotosintética de la hoja y su biomasa total.*

*-NAR (net assimilation rate): es la ganancia neta de asimilación fotosintética por unidad de área por unidad de tiempo, incluye ganancia de minerales, etc. Disminuye con ambientes adversos.*

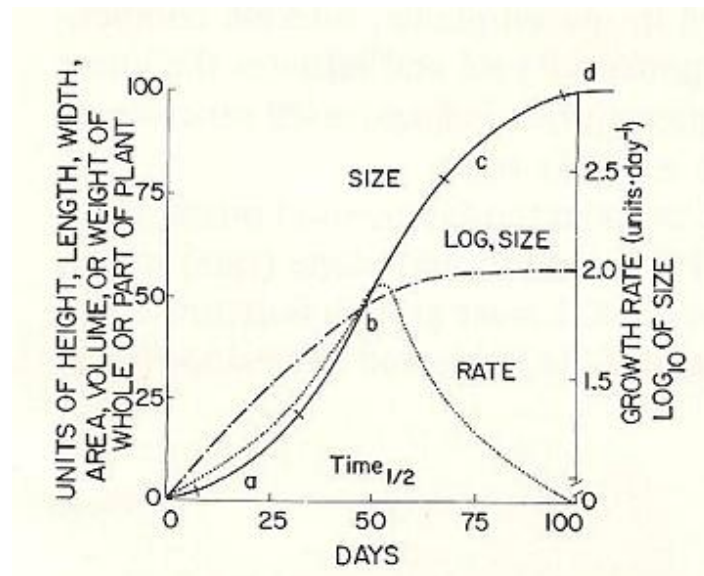
*-LAI (leaf area index): expresa la relación entre la superficie superior de la hoja y el área de piso ocupada por los tulipanes, lo ideal es tuvieran un LAI=1, lo que significaría que esta aprovechando toda la energía que le llega, pero un LAI de 3-5 es perfectamente deseable para una máxima producción de materia seca.*

*Los valores LAI se incrementan con el incremento de radiación solar de ahí que sea tan importante el análisis.*

*-CGR (crop growth rate): es la ganancia de peso del cultivo en una unidad de área y unidad de tiempo.*

*-LAD (leaf area duration): la duración de una hoja durante el periodo de cultivo.*

*Para el cultivo de tulipán en recinto, podemos decir que la curva de crecimiento es lineal hasta la senescencia después de lo cual decae hasta cero.*



Curvas de crecimiento de las partes del tulipán

La temperatura necesaria para el cultivo del tulipán:

ESPECIE	TEMPERATURA OPTIMA DEL SUSTRATO (grados centígrados)	CO <sub>2</sub> (p.p.m.)	HR (%)	INTENSIDAD DE LUZ (lux)
tulipán	8-12	-	70-80	Pleno sol

Temperatura mínima letal	Temperatura mínima biológica	Temperatura óptima noche/día	Temperatura máxima biológica	Temperatura germ/radic
-	4-6	12-18	22-25	-

Necesidades de temperatura del tulipán

En realidad todas las ecuaciones del crecimiento tienen forma exponencial

$$Y = bx^k$$

Y tienen como solución más o menos general

$$\log y = \log b + K \log x$$

Que puede resolverse por regresión lineal o graficando la función.

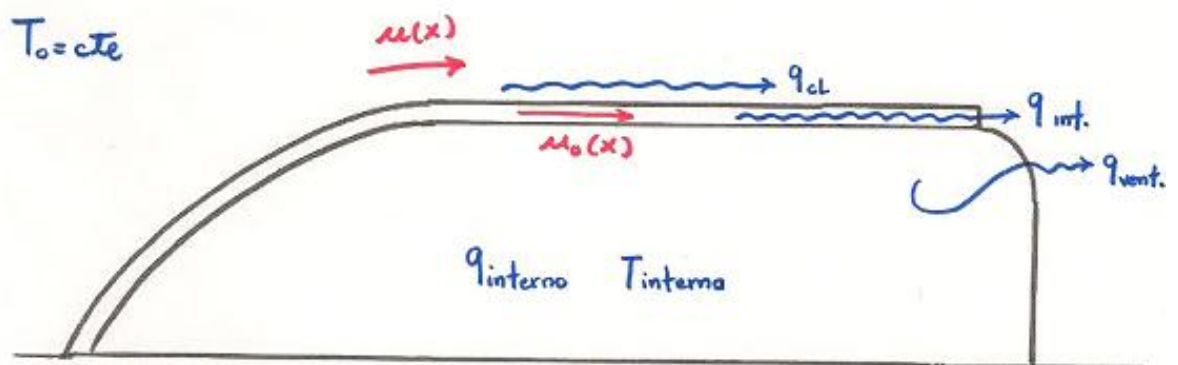
Las ecuaciones para calcular la temperatura optima de cultivo y preveer el tiempo de cosecha resultan ser empíricas, pero por lo regular tienen que ver con las observaciones que se realizan durante años y en regiones determinadas, no obstante casi todas toman la siguiente formula general:

$$T_{tulipan} = X + \ln(C_{CO_2}) + YS$$

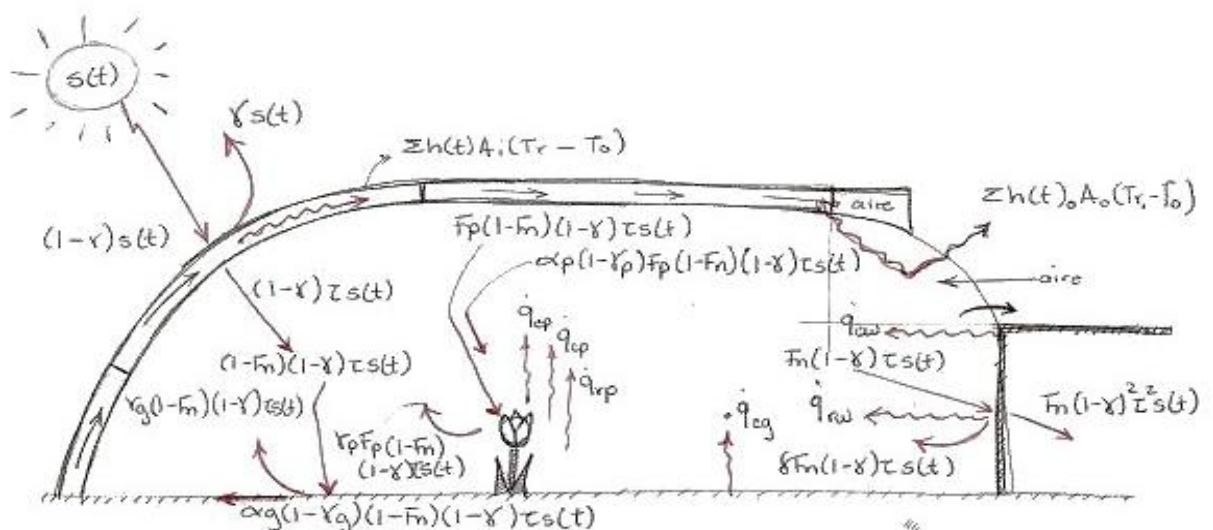
La cantidad de calor y la temperatura interior determinan las características de la cualidad más importante que tienen los tulipanes y por la cual es de interés su cultivo: los tepalos. El tulipán tiene normalmente de seis a siete tepalos que pueden ser simples, dobles, desflecados o tipo parrot (como ya vimos) en condiciones optimas, de no ser asi esto no pasa.

Analizamos la transferencia en general

$$q = q_{cl} + q_{int} + q_{vent}$$



Calor perdido y ganado en el modelo propuesto



Relaciones matemáticas del invernadero propuesto

Donde  $T_{int\ ermo}$

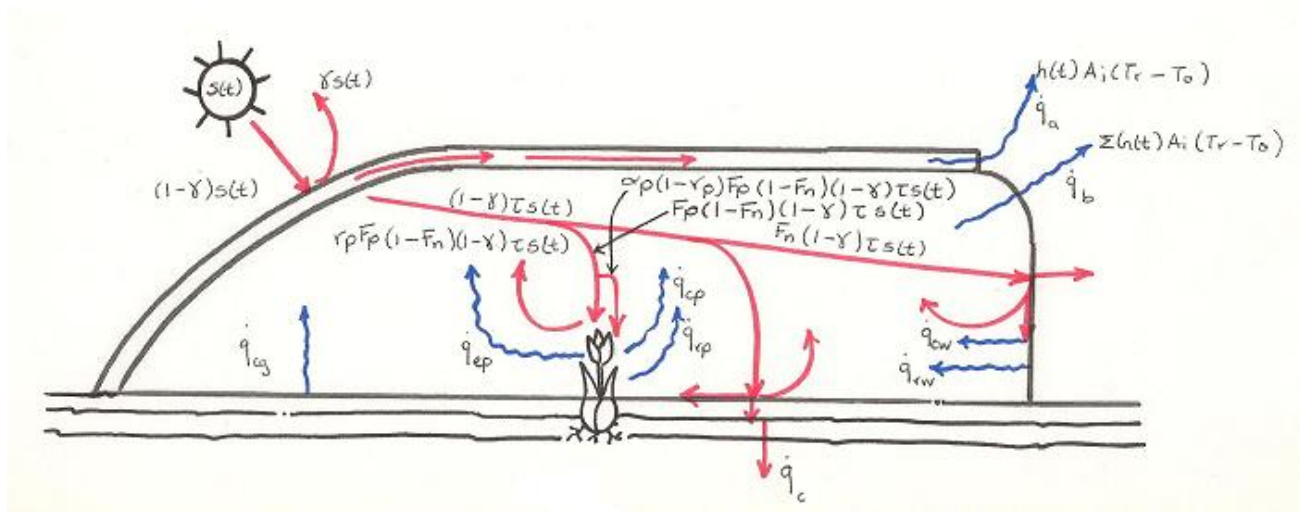
$$\frac{dT_p}{dt} + aT_p = f \bar{\epsilon}$$

$$\dot{V}_{cw} + q_{rw} \bar{A}_n + \dot{V}_{ep} + q_{cp} + q_{rp} \bar{A}_p + \dot{V}_{cg} A_g = \sum h_i \bar{A}_i (\bar{\epsilon}_r - T_a) + \sum h_o \bar{A}_o (T_{r1} - T_0) + cooling$$

Para nuestro caso la demanda de calor para tulipanes

$$q_{tulipanes} = k A_g (\bar{\epsilon}_{tulipanes} - T_{ext.})$$

$$q_{tulipanes} = k K_{int\ erfaz} \left( \frac{A_g}{A_{tulipan}} \right) (\bar{\epsilon}_{tulipanes} - T_{ext.})$$



Balance general en el invernadero

Debida al cultivo

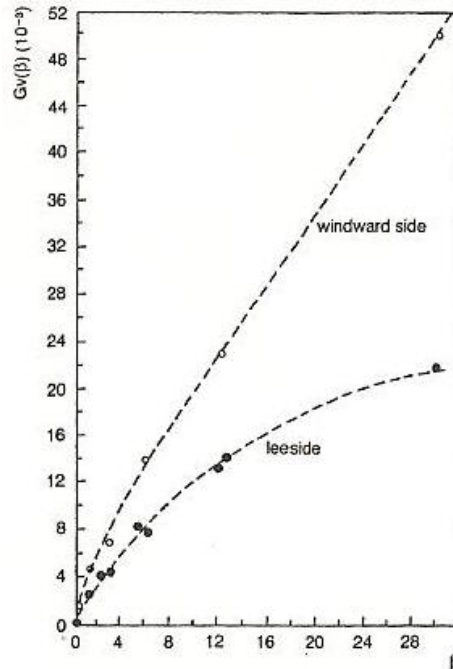
$$\alpha_p (-r_p) \bar{F}_p (-F_n) (-r) \bar{\epsilon} = \dot{V}_{ep} + q_{cp} + q_{rp} \bar{A}_{p,tulipanes} + m_{p,tulipanes} c_{p,tulipanes} \frac{dT_p}{dt}$$

Para el piso

$$\alpha_g (-r_g) (-F_p) (-F_n) (-r) \bar{\epsilon} = q_g A_g + h_g A_g (\bar{\epsilon}_{x=0} - T_\infty)$$

Pared interior

$$\alpha_n (-r_w) \bar{E}_n (-r_w) \bar{E}_n \left( \frac{1}{h_{cw}} + q_{rw} \bar{A}_n + h_{bn} A_n \right) (T_{y=0} - T_a)$$



Numero de Grashof para distintos ángulos de apertura

Energía perdida por infiltración de aire (cooling)

Para  $q_{vent}, q_b$

$$q_{cl} = q_1 + q_2 + q_3$$

Sensible

$$q_1 = \frac{V \omega \rho_{aire} c_p (T_{int} - T_{ext})}{3600}$$

Latente

$$q_2 = \frac{V \omega \rho_{aire} r (\chi_{int} - \chi_{ext})}{3600}$$

Por conveccion natural

$$q_3 = c_d \sum A_{\text{ventilacion}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{\text{aire}}}} \Delta P$$

Donde

$$\Delta P = P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$$

Forzada

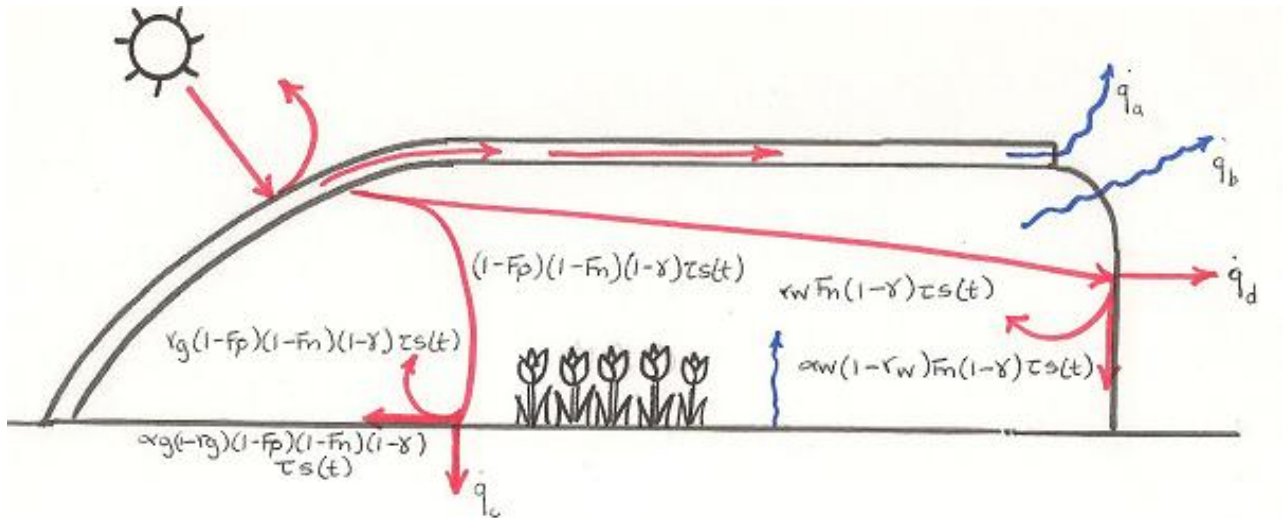
$$q_3 = 0.33 N_{\text{tulipanes}} V (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

En caso de tener una pantalla evaporativa

$$q_3 = 0.33 N V (T_i - T_{\text{agua}})$$

En el caso de enriquecer el aire con quemadores de combustible

$$q = \frac{V_i \Delta T \rho c_p}{H \eta_b \eta_t}$$



Perdidas de calor por ventilación



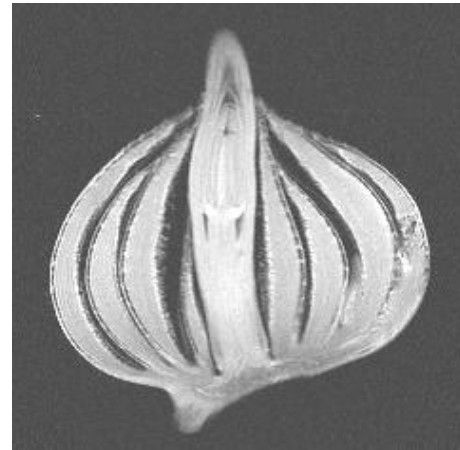
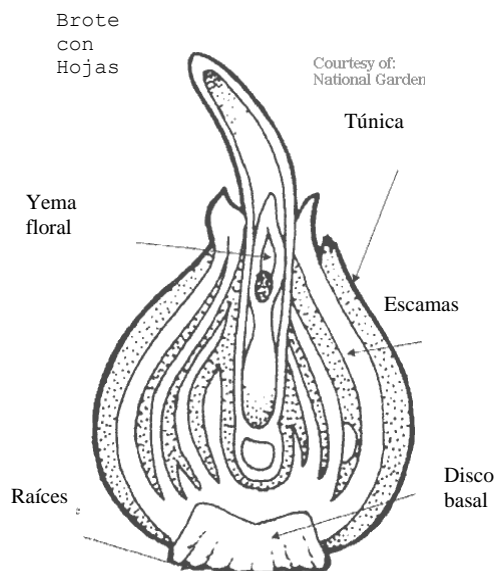
## Capítulo IV

### TRANSFERENCIA DE CALOR DEBIDA AL CULTIVO

#### 4.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS ACERCA DE LOS TULIPANES

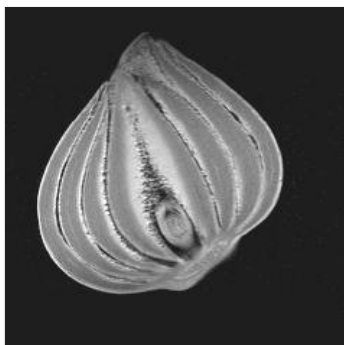
##### Fase vegetativa

Los tulipanes, como se ha dicho, son plantas bulbosas tunicadas, que necesitan esta configuración para proteger la yema floral de los factores adversos que pudieran impedir el buen desarrollo, también se ha dicho que es específico el calor y la temperatura necesarias en cada fase de diferenciación.



Bulbos de tulipán

Entonces, para garantizar una buena flor tenga una buena calidad el bulbo tiene que forzarse o en su defecto tener la temperatura adecuada (que es baja) para cubrir su fase vegetativa, y esto depende del lugar en el que se plante, ya sean macetas o sustrato. A continuación se muestra una secuencia de imágenes de cada etapa de desarrollo de los bulbos.







El bulbo podemos decir, tiene el siguiente modelo:

-en el caso de sustrato

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k_{\text{sustrato}}}{\rho_{\text{sustrato}} \sigma_{\text{sustrato}}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

Ya que el bulbo esta sometido a variaciones de temperatura en las tres direcciones del sustrato, podemos obtener una expresión general para el crecimiento del bulbo, que a todas luces es la parte mas importante del tulipán:

$$\frac{k_{\text{sustrato}}}{\rho_{\text{sustrato}} \sigma_{\text{sustrato}}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \text{div} T_{\text{tulipan}}$$

$$\alpha^2 \nabla^2 u = \text{div} T_{\text{tulipanes}}$$

Esto es, la cantidad de calor que fluya del sustrato al interior de la yema floral debe ser igual a la necesidad especifica del bulbo en el momento fenológico en el que se encuentre (32 semanas a 5 grados).

Esta expresion por su dificultad no puede ser resuelta en la forma en que se encuentra, por lo tanto es imposible tener una ecuación tan general para el crecimiento del bulbo.

-en el caso de macetas

Restringimos los límites de la transferencia de calor y tenemos ahora:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

Por lo tanto

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\rho\sigma} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Y condiciones de frontera

$$u(0, t) = 0$$

$$u(a, t) = 0$$

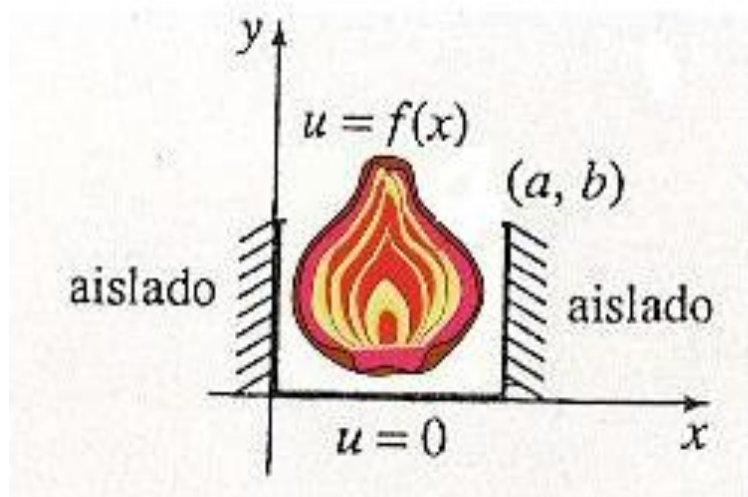
Para toda  $t$

Con la condición inicial

$$u(x, 0) = f(x)$$

Obtenemos la ecuación diferencial ordinaria

$$G' + c^2 p^2 G = 0$$



La solución

$$F(x) = A \cos px + B \sin px$$

Los fase bulbosa del tulipán es considerada clave para su desarrollo, la utilización de macetas que eviten la transferencia de calor al interior del sustrato de la maceta puede ayudar a reducir la energía que se necesita para forzar el bulbo, es recomendable también, usar el sustrato expuesto pero solo con las condiciones de invernadero previstas.

Fase reproductiva

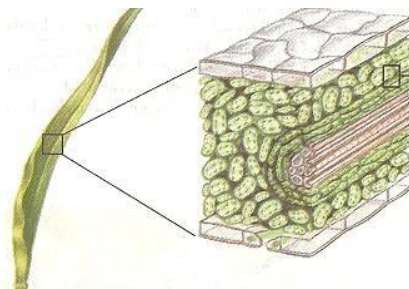
A pesar de todo, se puede decir que es una flor que tiene buena resistencia a condiciones un poco extremas, la aparición de la yema floral es una buena señal de adecuadas condiciones de invernadero, en esta fase, que se conoce como fase reproductiva, intervienen además de los factores de calor y temperatura, otros como dióxido de carbono, humedad, la luz, etc.

El calor y la temperatura influyen directamente en el cierre y apertura de los estomas de la planta, es evidente que se intentan reducir en un invernadero las oscilaciones diurnas de temperatura, así como el exceso o deficiencia de esta, y precisamente el cierre de estomas evitan que el dióxido de carbono así como otros nutrientes entren a la hoja donde son necesarios para llevar a cabo la fotosíntesis, tanto en su fase luminosa como oscura, la intensidad fotosintética es directamente proporcional a este parámetro, una temperatura alta termina por cerrar los estomas para evitar la transpiración de agua en la hoja, reduce el transporte de electrones fotosintéticos a los cloroplastos y aumenta la fotorespiración, aunque también esta respuesta se ve influenciada por la cantidad de bióxido de carbono en el aire y la luz incidente.

A temperaturas muy elevadas la relación peso seco/peso fresco disminuye y hay detrimento de la producción, de ahí la importancia de mantener la temperatura en los niveles óptimos de día y de noche ya que un índice LAR (que se vera en la sección siguiente) mayor se traduce en una actividad fotosintética mayor, y es distinta para la 'edad' de cada planta.

La temperatura como la luz interactúan con la constitución genética de las plantas en la regulación de la ordenada secuencia de casos que constituyen su desarrollo, el tulipán en particular requiere para completar su desarrollo una secuencia de temperatura, la iniciación floral requiere temperaturas relativamente altas en torno a los veinte grados, el óptimo térmico para el desarrollo de los principios florales es menor a 9 o diez grados después de dieciséis semanas se completa el desarrollo floral, el óptimo térmico aumenta gradualmente hasta que se alargamiento del tallo y se da la floración.

Otros factores intervienen en el crecimiento del tulipán y es difícil tener modelos que satisfagan cabalmente su comportamiento, aunque los tulipanes son una planta del tipo C4 que regularmente tiene buen grado de tolerancia en cuanto a sus necesidades se refiere.



Corte de planta C4

Algunas características de los cultivos se grafican para tener una mejor idea de su comportamiento y todas ellas depende de la cantidad de calor que llega al tulipán o de la temperatura de su entorno.

## 5.2 BALANCE GENERAL PARA EL TULIPÁN

Cabe destacar la importancia comercial de la vara (intensidad de color, calibre, sanidad y vida postcosecha) la cual se asocia a los niveles de calor absorbidos por la planta y el suelo de cultivo además de su tipo, aunque depende mucho más de la temperatura, el suelo también es importante como vemos en el siguiente cuadro:

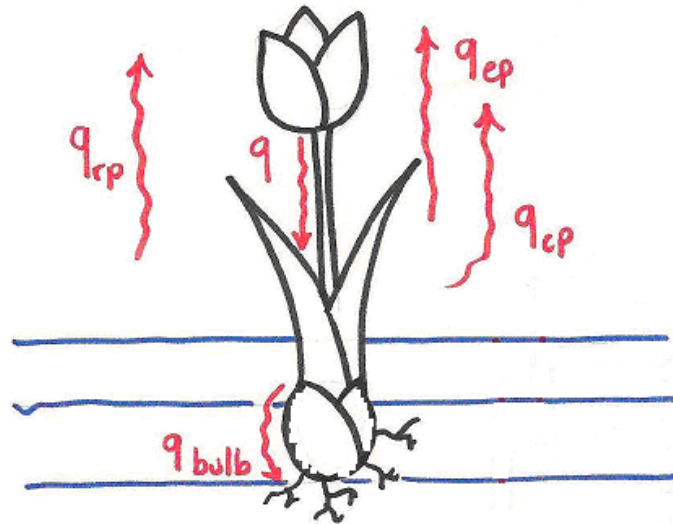
Largo de la vara (cm)	Tipo de sustrato			
	arena	Suelo	50% suelo/50% compost	compost
	20.1	34.3	34.4	33.7

Largo de vara de acuerdo a sustratos



Desarrollo del tulipán

$$\alpha_p (-r_p) \bar{F}_p (-F_n) (-r) \bar{S} \bar{C} = \dot{V}_{ep} + q_{cp} + q_{rp} \bar{A}_{p,tulipanes} + m_{p,tulipanes} c_{p,tulipanes} \frac{dT_p}{dt}$$



Relaciones energéticas de cultivo

El calor perdido por Transpiración del cultivo es importante ya que es un traspaso de agua por parte de la planta hacia la atmósfera que presenta un gradiente de humedad menor que el de la planta. Es un mecanismo muy importante porque refresca las hojas de la planta y dirige los nutrientes desde las raíces a su destino, algunos factores que afecta la transpiración excesiva son la luz excesiva, la temperatura muy elevada y la velocidad del viento.

$$q_{ep} = \frac{2LAI\rho_{aire}c_p}{\gamma_{tulipan} \left( \frac{1}{s_{tulipan}} - r_{a,tulipan} \right)} \left( e_{tulipan} - e_{aire} \right)$$

Si

$$e_{tulipan} = e_{hoja} \left( \frac{T_i}{T_a} \right)^{0.3}$$

$$q_{ep} = \frac{2LAI\rho_{aire}c_p}{\gamma_{tulipan} \left( \frac{1}{s_{tulipan}} - r_{a,tulipan} \right)} \left( e_{tulipan} \left( \frac{T_i}{T_a} \right)^{0.3} + e_{hoja} - e_{aire} \right)$$

Donde

$$e_{aire} = \left( \frac{X_i}{18} \right) \left( \frac{1}{\frac{1}{29} + \frac{X_i}{18}} \right)^{0.3} \quad e_{hoja} = \left( \frac{X}{18} \right) \left( \frac{1}{\frac{1}{29} + \frac{X}{18}} \right)^{0.5}$$

Calor perdido por convección del tulipán

$$q_{cp} = \alpha_{conv} \left( LAI \left( T_i - T_a \right) \right)$$

Calor perdido por radiación del sustrato y los tulipanes

$$q_{rp} = \alpha_s LAI \left[ F_{cr} (T_r - T) + F_{cg} (T_g - T) \right]$$

Calor absorbido por los tulipanes

$$q_{tulipan} = \left[ \epsilon_{tulipan} (0.2 LAI) + F_r F_g (-0.2 IAF) \right] R_g$$

-Balance general para el sustrato

El sustrato es parte importante del cultivo de tulipán ya que sirve de soporte al sistema radicular y además puede o no ayudar a la nutrición óptima de la planta, de ahí la importancia de mantener en buenas condiciones de temperatura el suelo para el desarrollo del bulbo. Algunos sustratos que se ocupan normalmente son:

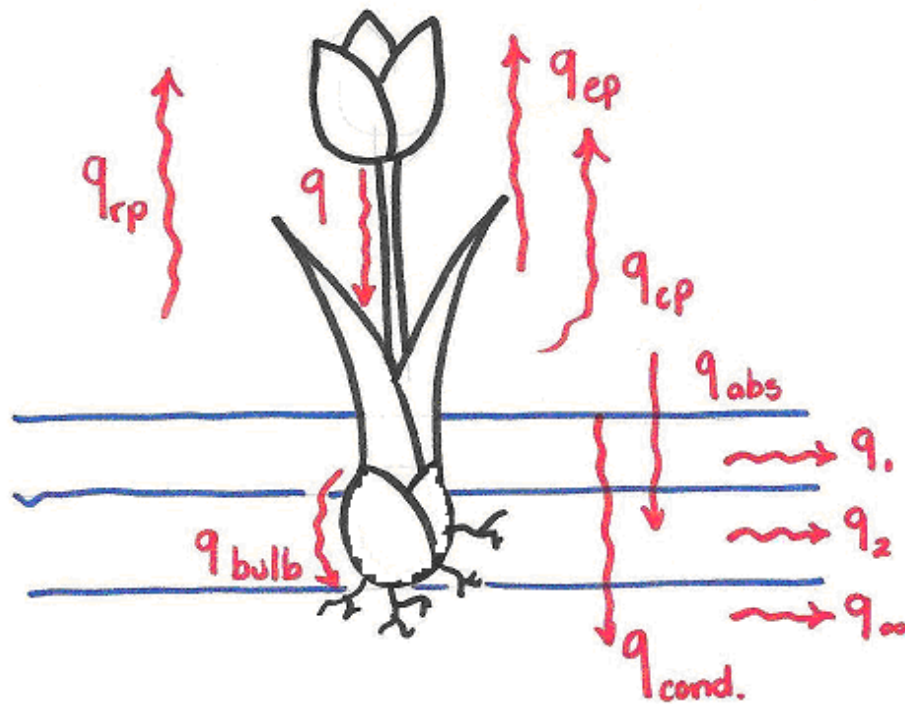
agua	turba	perlita
gravas	Corteza de pino	vermiculita
arenas	Fibra de coco	Arcilla expandida
Tierra volcánica	Lana de roca	Poliestireno expandido

Tipos de sustrato

No es el objetivo discutir sus características en este trabajo, pero regularmente los bulbos se ubican en canteros sobre nivel, preparados con tierra + 20% de turba rubia a fin de obtener un pH levemente ácido, y se realiza una fertilización de base con 150 gr / m<sup>2</sup> de Superfosfato Triple de Ca. La densidad de plantación es de 100 bulbos / m<sup>2</sup> y luego de plantados los bulbos se cubre el cantero con una capa de 3 cm de arena para prevenir que los bulbos salgan del medio de enraizamiento durante su desarrollo, causando la caída de las plantas y con el fin de mantener más baja la temperatura del suelo y controlar malezas. No obstante hay muchas técnicas utilizadas

Por lo tanto ayuda el sustrato sirve para controlar la temperatura que requiere el bulbo. Entonces, el balance general de calor en el sustrato es:

$$\alpha_g (r_g) - F_p (F_n) - r \left( \epsilon_g A_g + h_g A_g (T_{x=0} - T_\infty) \right)$$



Variables en sustrato y tulipán

Calor absorbido por el sustrato

$$q = F_s \varepsilon_g \tau_r R_g \left( 0.2LAI \right)$$

Calor emitido por radiación y convección al aire del invernadero

$$q_g = \alpha_s \left[ AI \left( \varepsilon_{cg} (T_g - T_g) \right) + A_r \left( \varepsilon_{rg} (T_r - T_g) \right) \right] + \alpha_{conv} (T_g - T_i)$$

Como ya vimos es común el uso de capas para el cultivo tanto en maceta como en suelo raso.

Calor absorbido por el sustrato y sus capas inferiores

$$q_{capa} = \frac{\lambda_g}{\delta_g} (T_g - T_{g1})$$

$$q_{capa1} \Rightarrow \frac{\lambda_g}{\delta_g} (T_g - T_{g1}) + (T_{g2} - T_{g1}) = \delta_g \rho_{gr} c_{gr} \frac{dT_{g1}}{dt}$$

$$q_{capa2} \Rightarrow \frac{\lambda_g}{\delta_g} (T_{g1} - T_{g2}) + (T_{g3} - T_{g2}) = \delta_g \rho_{gr} c_{gr} \frac{dT_{g2}}{dt}$$

$$q_{\text{capas}} \Rightarrow \frac{\lambda_g}{\delta_g} (T_{g2} - T_{g\infty}) + (T_{g\infty} - T_{\text{exterior}}) = \delta_g \rho_{gr} c_{gr} \frac{dT_{g\infty}}{dt}$$

### Calor total del sustrato

$$q_{\text{total}} = q_{\text{conducido}} - q_{\text{bulbo}}$$

Además es importante conocer la densidad de flujo de calor por evaporación del suelo

$$q = \alpha_{\text{conv},i} F_s \left( \frac{\lambda}{c_p} \right) (x_{g^*} - x_i)$$

### -Balance de humedad debida al sustrato y al cultivo

Durante el proceso de evaporación del tulipán y el suelo en que se cultiva se produce gran cantidad de vapor de agua que se acumula con el tiempo y luego es desalojado por la ventilación.

### El balance de masa

$$\phi_{m,pro} - \phi_{m,salida} = V_i \rho_a \frac{dx_i}{dt}$$

El vapor de agua se produce por el tulipán y el suelo

$$\phi_{m,pro} = \frac{q_{ep} + q}{\lambda}$$

Y la transferencia de masa debida a la ventilación

$$\phi_{m,salida} = \frac{\phi_w}{A_g} \rho_a (x_i - x_o)$$

Es importante reconocer que las necesidades van cambiando con el nivel de crecimiento de la planta, por lo que podemos introducir todas las cantidades que describimos anteriormente en cuanto a alometria se refiere, es decir, utilizar esos índices como indicadores en magnitud del crecimiento de la planta en relación con la cantidad de calor que necesitan.

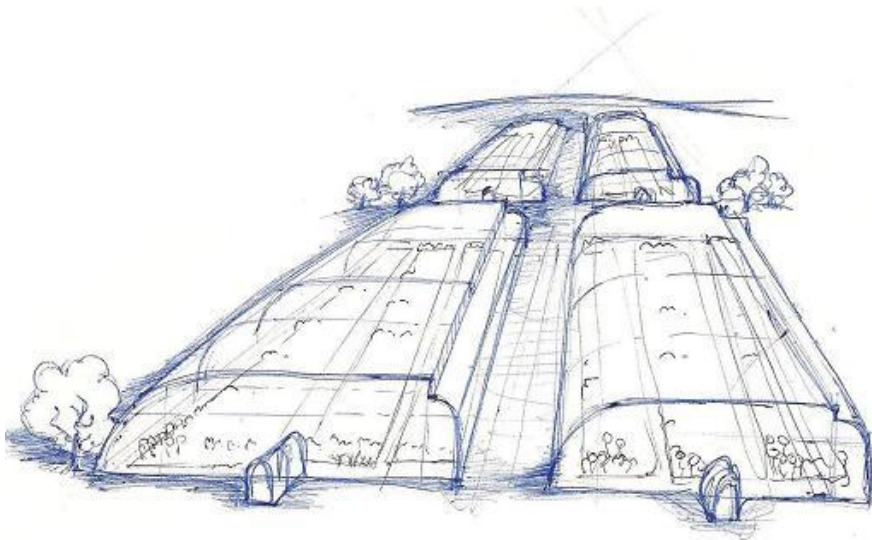


## Capítulo V

### FLUJO EXTERNO DE AIRE EN EL INVERNADERO

#### 6.1-Generalidades

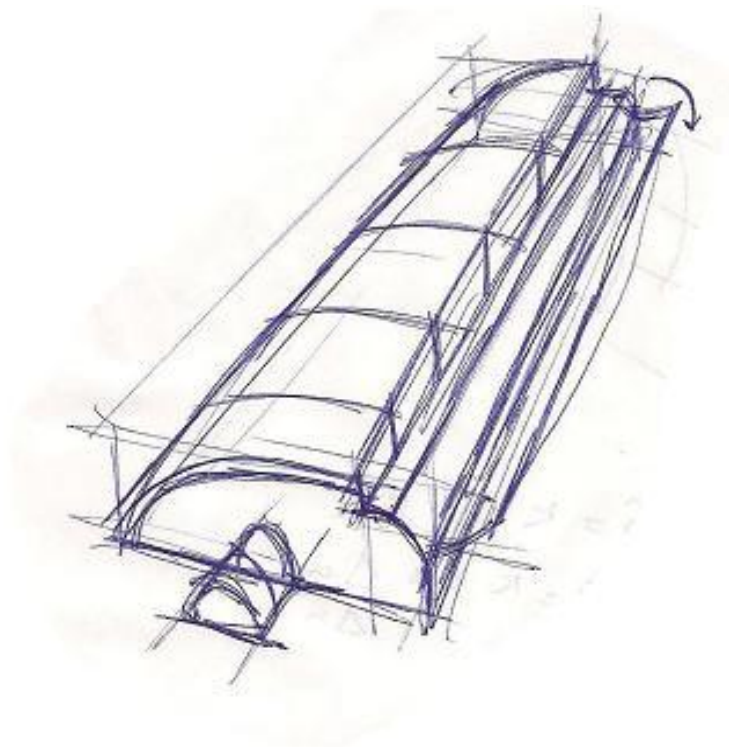
*Para definir las características físicas del invernadero para tulipanes es bueno recordar que queremos tener un modelo innovador que tenga pocas semejanzas con los que ya existen en el mercado, de hecho, las formas que adoptan son muy variadas, pero poco obedecen a criterios definidos. No obstante, tampoco es el objetivo de este trabajo hacer un benchmarking en el ramo y mucho menos dimensionarlo, el enfoque es mas bien analítico y propositivo, teniendo en cuenta solo la parte teórica.*



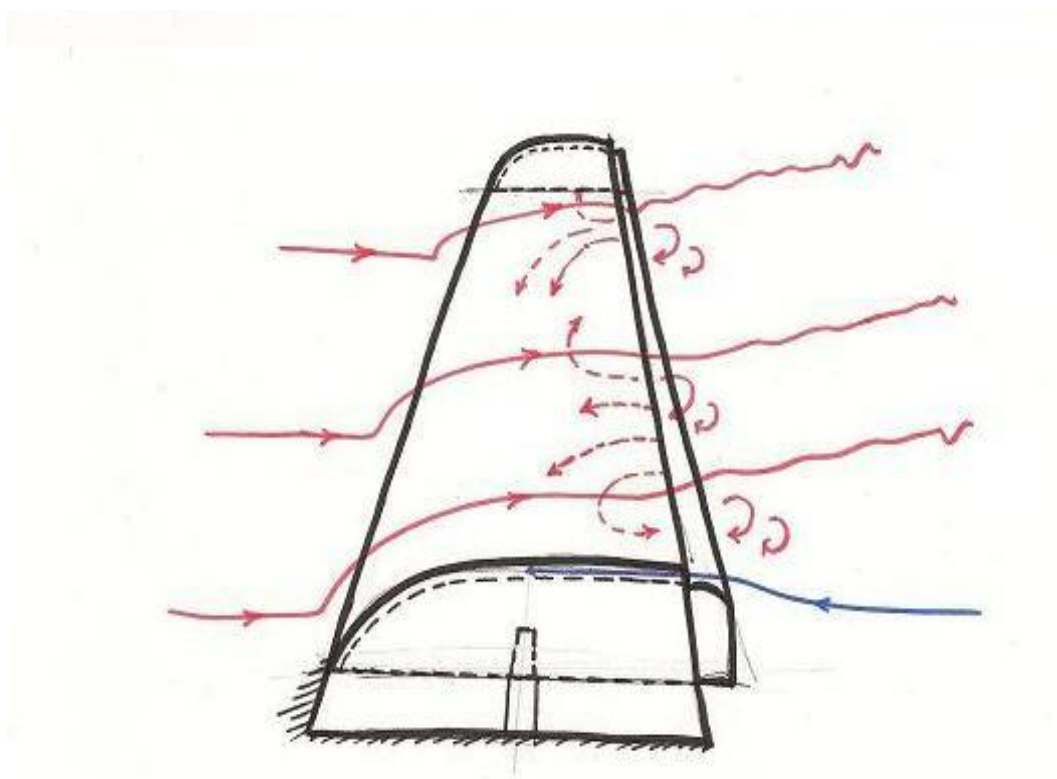
Conjunto de invernaderos con interfaz

*Se pensó en aprovechar el viento como agente que ayude a enfriar un poco el aire interior, sobre todo en situaciones en las que la temperatura y la radiación solar sean altas, no tomando en cuenta efectos como el albedo o los setos que puedan existir en una región determinada.*

*El flujo exterior es de gran ayuda siempre y cuando la cubierta y la estructura estén pensadas para soportar los esfuerzos provocados por la circulación del aire sobre la superficie del invernadero, además de que los perfiles manejados por los comerciantes de estos recintos pues toman poco menos en cuenta esta situación, de ahí la necesidad de romper con esta convencionalidad y aprovecharla. Un perfil semielíptico y una pared norte se han considerado adecuados para constituir la estructura del invernadero, siendo que permiten mejor interacción entre los factores externos y el diseño del invernadero, además de contar con ventilación lateral (cenital si se quiere)*



Vista superior de invernadero



Circulación de aire en el invernadero

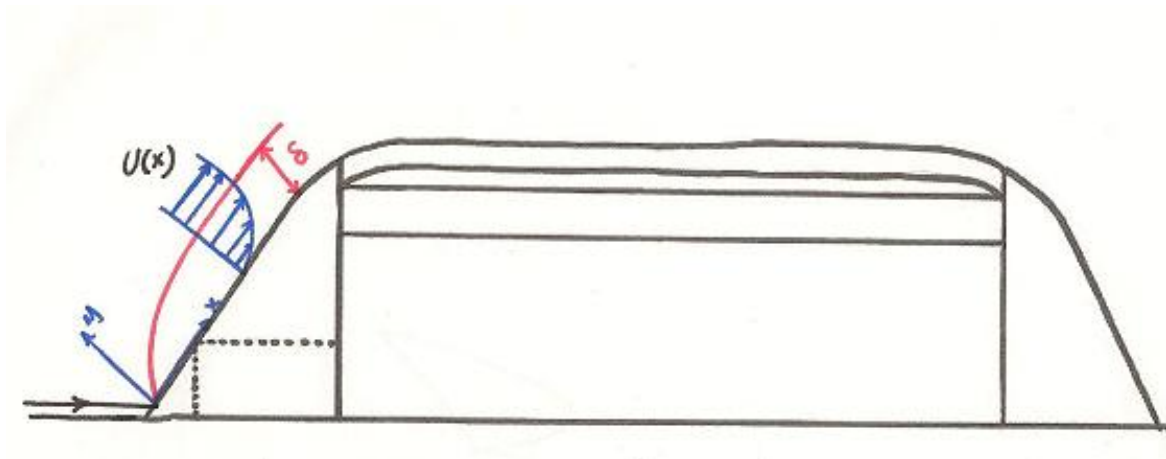
También se ha propuesto una interfaz de aire en la cubierta que tenga un flujo que retire un porcentaje del calor que se origine en el sistema, teniendo flujos forzados o naturales, de acuerdo a la situación en particular, y también se ha pensado en espacios de succión que sirvan para ventilar el interior del espacio.

No descartamos la posibilidad de usar algún equipo de acondicionamiento de aire para asegurara la producción y como mera seguridad y respaldo, pero se trata de evitar en lo que mas se pueda.

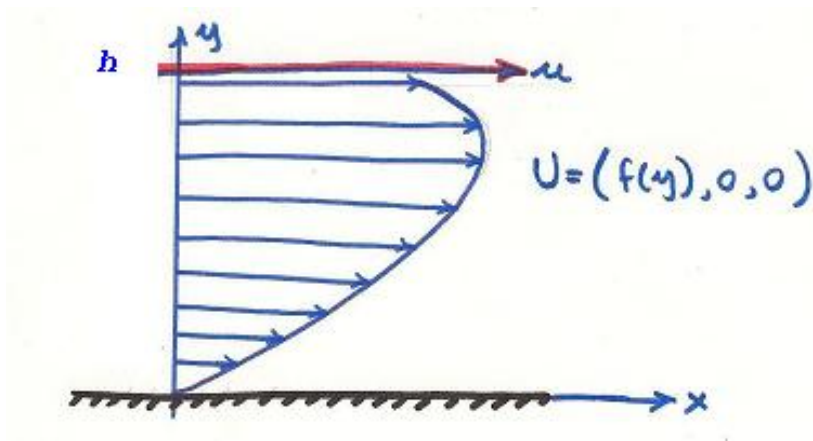
Tomando las siguientes consideraciones

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad \text{y} \quad M \leq 0.3$$

El perfil de velocidad sobre la cubierta suele admitirse como un flujo combinado de Couette – Poiseuille, por lo tanto:



Perfil de velocidad de la capa limite



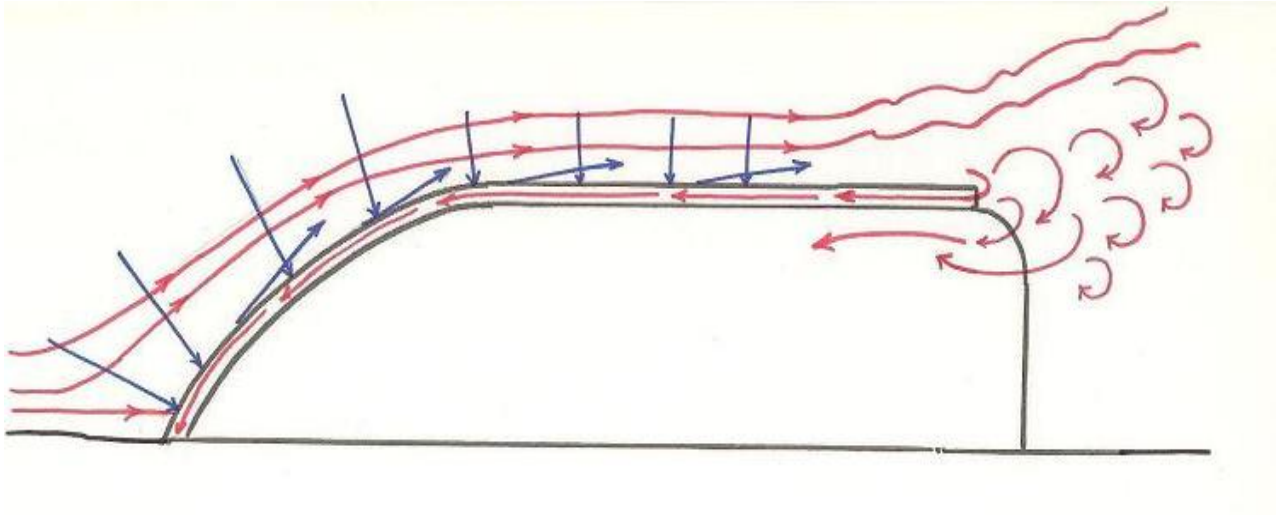
$$\text{Con } \frac{\partial p}{\partial x} = \text{cte} = -k$$

$$u(y) = -\frac{k}{2\mu} h^2 \left[ 1 - \frac{y}{h} \right] \frac{y}{h} + U \frac{y}{h}$$

Para la capa limite laminar utilizamos las ecuaciones de Prandtl

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$



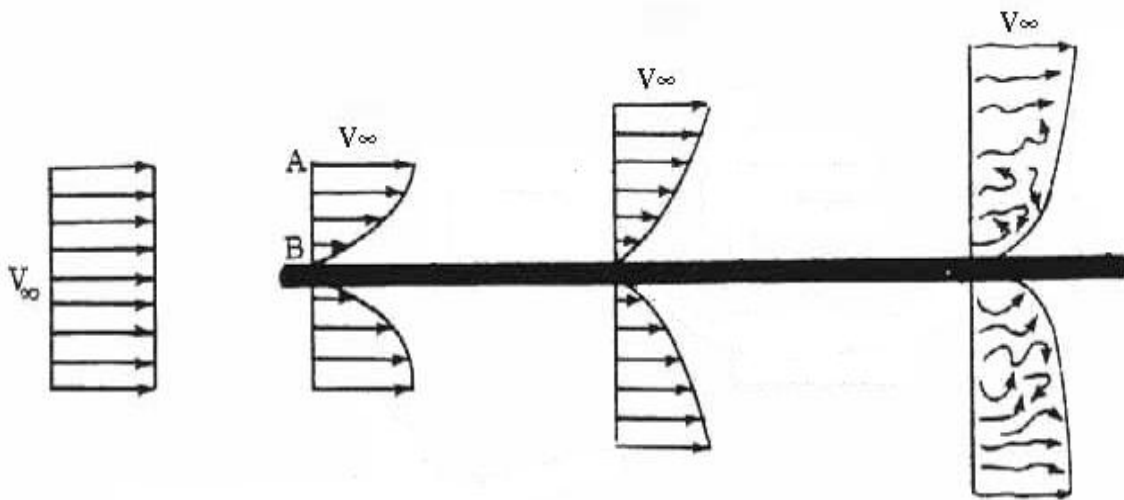
Transición en la cubierta

Para  $t=0$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Para nuestro caso, podemos considerar una placa plana

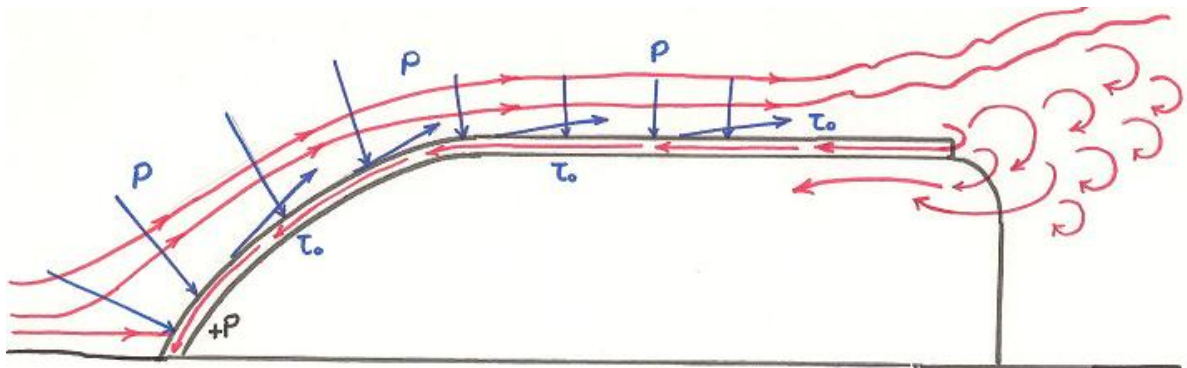


Transición en placa plana

Por lo tanto las ecuaciones se convierten

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

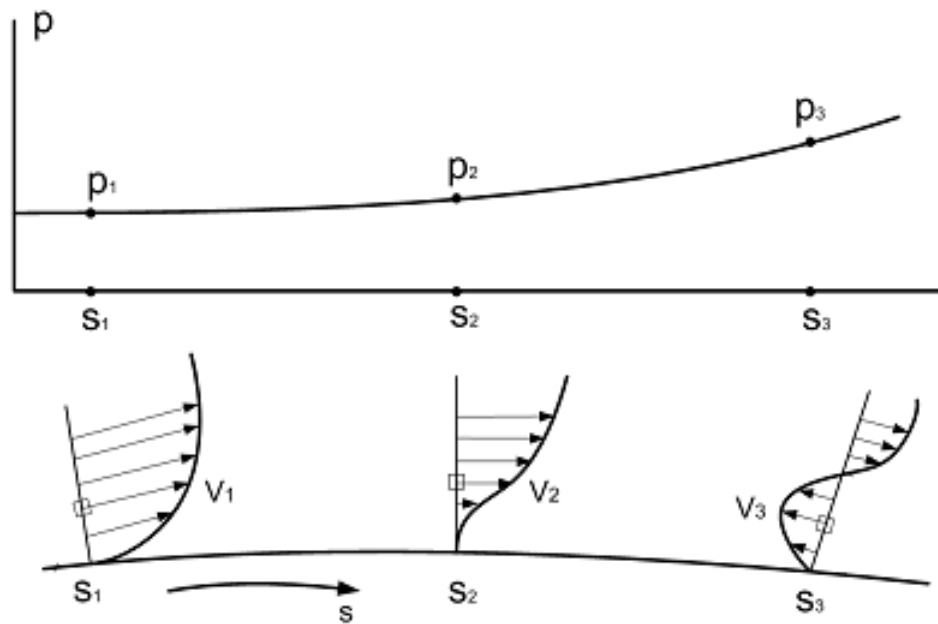
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$



Presión y esfuerzo cortante

Para el gradiente de presión

$$U \frac{dU}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}$$



Presión adversa en capa limite

Nos interesa el esfuerzo cortante provocado que en la capa limite no se puede ignorar y puede ser causante de ruptura de la película que suele ser plástica y delgada.

Para  $\tau_o$  y  $D_f$

$$\tau_o = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$$

$$F_D = D_f = b \int_{x=0}^l \tau_o \cos \phi ds$$

$$\text{Si } \frac{\tau_o}{\rho U^2} = -\frac{d\theta}{dx}, \quad \frac{u}{U} = \frac{3}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^3$$

Por lo tanto

$$\tau_o = \frac{3\mu U}{2\delta} \quad \text{Y} \quad \delta = \frac{4.64x}{\sqrt{\text{Re}_x}}$$

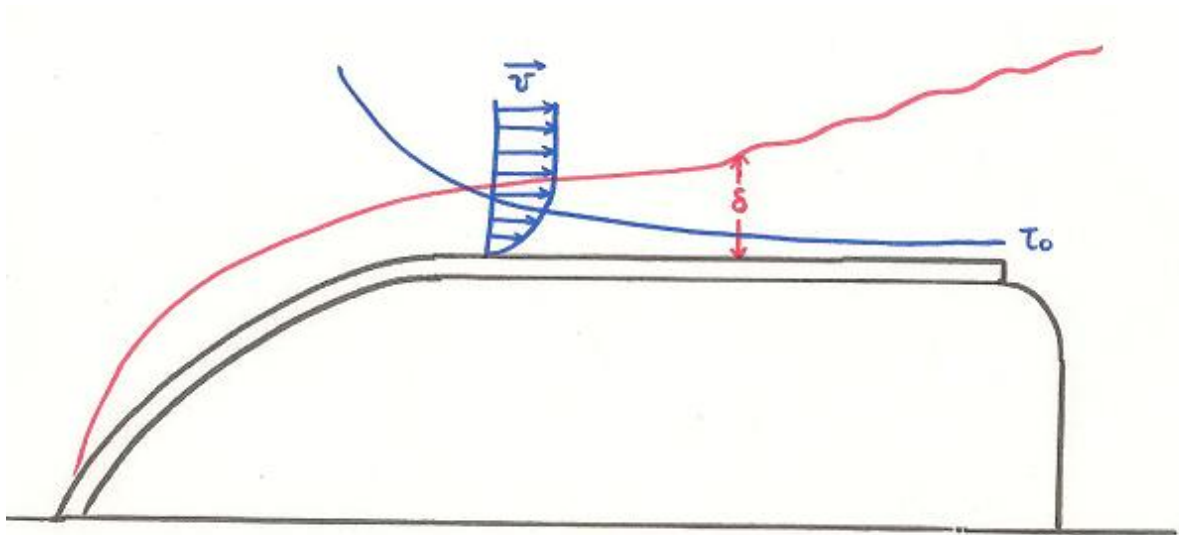
$$\tau_0 = 0.323 \frac{\mu U}{x} \sqrt{\text{Re}_x}$$

$$y \quad F_D = \int_0^L \tau_0(B) dx = 0.646 \mu U \sqrt{\frac{\rho U^2}{\mu}} B \quad y$$

$$C_D = \frac{1.292}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad y \quad C_L = 0$$

Dimensiones de la capa limite (Blasius)

$$\delta = \frac{4.91x}{\sqrt{\text{Re}_x}}$$



Variación de presión y esfuerzo cortante

Para los puntos de separación

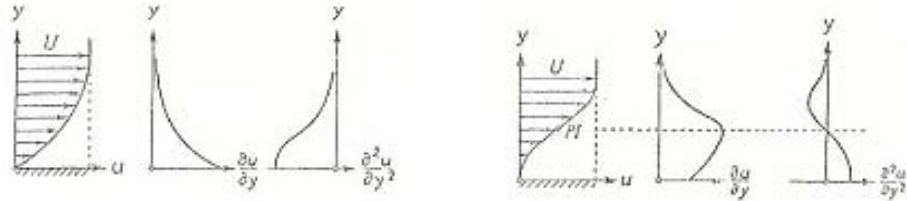
$$\left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$$

$$\mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{dp}{dx} \quad \text{En } y=0$$

$$\text{Si } \frac{dp}{dx} \leq 0 \quad \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \leq 0$$

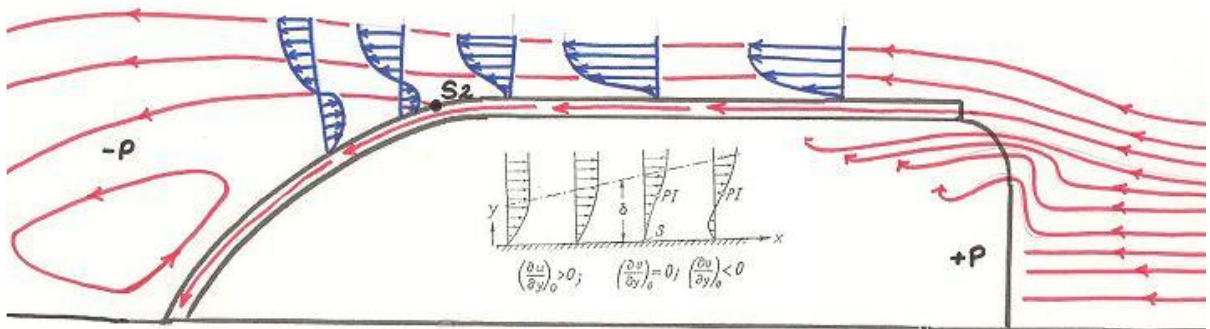


$$\text{Si } \frac{dp}{dx} \geq 0 \quad \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \geq 0$$

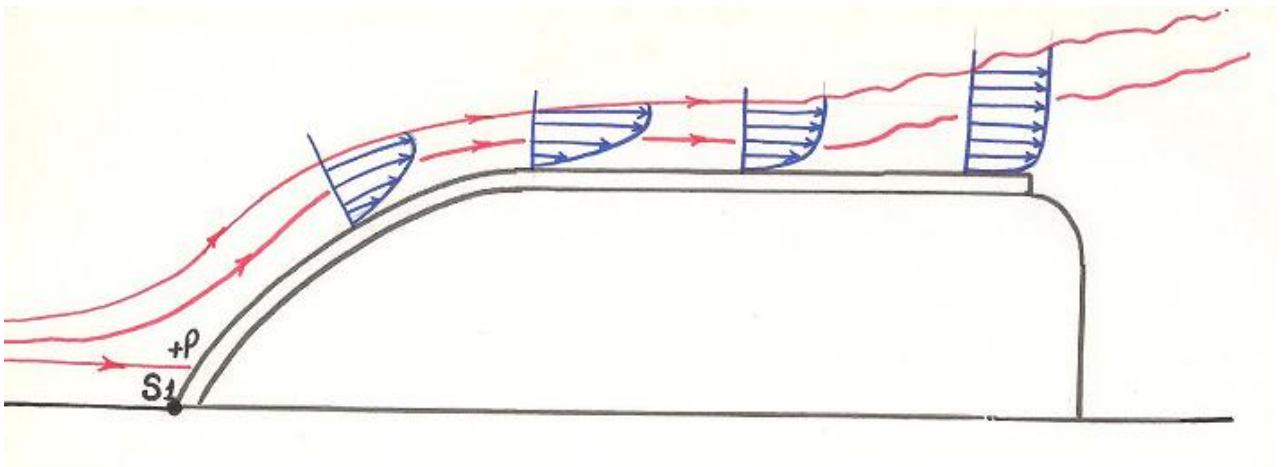


Entonces el punto de inflexión S2 y S1

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0$$



Puntos de separación



Perfil de velocidad en la transición



Para la succión en la separación

$$v \left( \frac{\partial^2 y}{\partial y^2} \right)_{y=0} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + v_0 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$$

Velocidad de succión

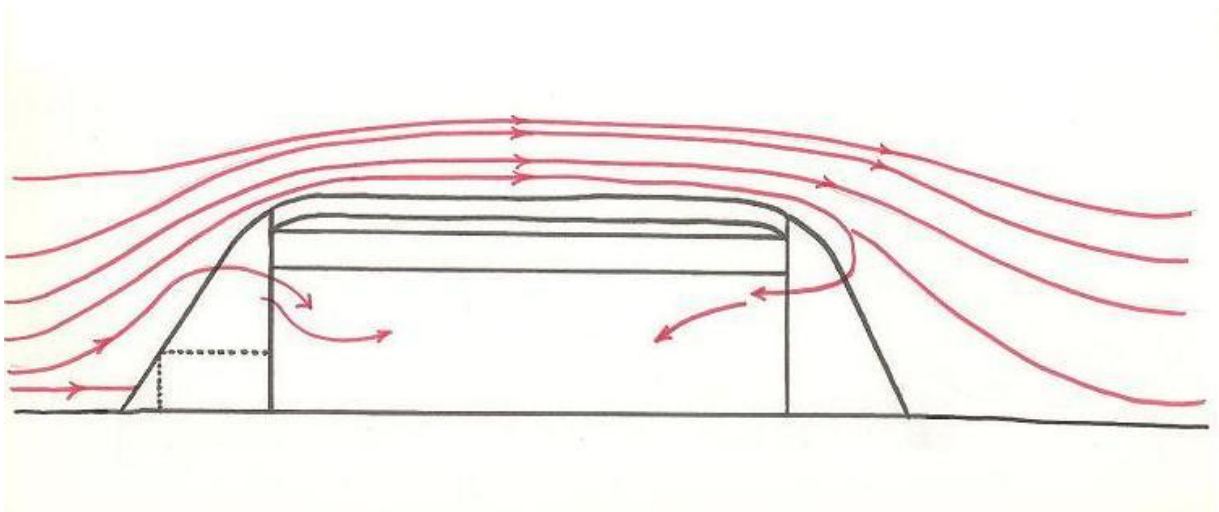
$$u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u(y) = U_\infty [1 - \exp(v_0 y / \nu)] \quad v(x, y) = v_0 \leq 0$$

El esfuerzo cortante

$$\tau_0 = \rho(-v_0)U$$



Succión

Para la capa límite térmica

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

Calor transmitido

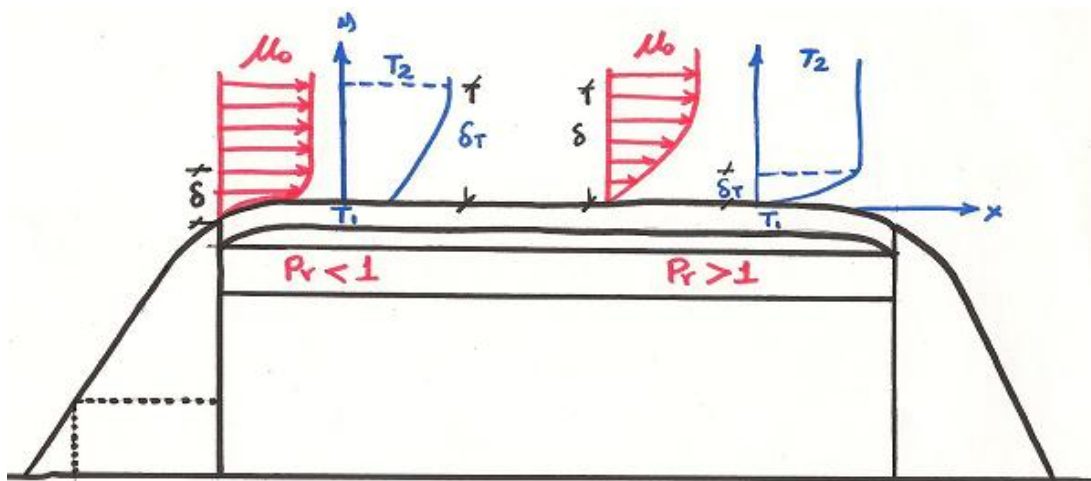
$$Nu = \frac{Q}{ks(T - T_c) / L}$$

Para nuestro caso

$$q_{cl} = Nu = \frac{1}{U} \int_0^L \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} dx = 0.332 \int_0^L \sqrt{U / (\nu x)} dx = 0.664 \left( \frac{UL}{\nu} \right)^{1/2}$$

$$Nu = 1.128 \sqrt{Pr} \sqrt{Re_x} \quad (Pr \leq 1)$$

$$Nu = 0.664 \sqrt{Pr} \sqrt{Re_x} \quad (Pr \geq 0.6)$$



Capa térmica

## Capítulo VI

### TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CUBIERTA

Podemos considerar el problema del invernadero como una función hiperbólica o como una elíptica.

$$\Delta u = 0$$

$$u_1 = k\Delta u$$

Para el primer caso

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

Para el segundo caso

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = 0$$

Si

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n}$$

El problema está definido en cierto dominio de  $\Omega$  con ciertas condiciones de frontera  $\partial\Omega$

$$u|_{\partial\Omega} = f$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} |_{\partial\Omega} = f$$

$$\left( u + h \frac{\partial u}{\partial n} \right) |_{\partial\Omega} = f$$

$$h \in R$$

-Balance general de transferencia de calor en la cubierta

$$\sum q = \delta_r A_r \rho_r c_r \frac{dT_r}{dt}$$

La energía neta

$$s \text{ (W/m}^2\text{)}$$

La energía reflejada

$$rs \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Calor absorbido por la cubierta exterior

$$(-r_s) \text{ (W/m}^2\text{)} = q = \left[ F_r + (F_r) - Br(F_o) - \sigma Ar(-k_a) \right]$$

Donde  $Br = a + b\sqrt{e_o}$

Intercambio de energía entre cubierta y cultivo

$$F_p(-F_n) \text{ (W/m}^2\text{)} = q = \left[ F_{cr} IAF(-T_r) \right]$$

Energía reflejada por los tulipanes a la cubierta

$$r_p F_p(-F_n) \text{ (W/m}^2\text{)} = q = Ar \left[ F_r + \Gamma_c \tau_r (0.2 IAF) R_g \right]$$

Energía reflejada por el sustrato a la cubierta

$$r_g(-F_p) \text{ (W/m}^2\text{)} = q = Ar R_g \left[ \Gamma_r \Gamma_g \tau_r (-0.2 IAF) \right]$$

Flujo de calor por convección interna y externa

$$\sum h(A) \text{ (W/m}^2\text{)} = q = Ar \left[ \alpha_{conv,o} (T_r - T_o) + \alpha_{conv,i} (T_{tunnel} - T_i) \right]$$

Flujo de calor por convección en el túnel

$$\sum h(A) \text{ (W/m}^2\text{)} = q = Ar \left[ \alpha_{tunnel} (T_r - T_{tunnel}) \right]$$

Donde los coeficientes de transferencia de calor

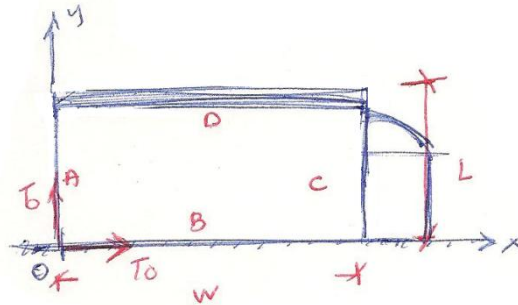
$$\alpha_s = \left( \frac{4\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2} \right) \sigma \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3$$

$$\alpha_{conv} = 2.8 + 1.2v_v \quad \text{Para } v_v \leq 5 \frac{m}{s}$$

$$\alpha_{conv} = 1.35 + 2.07v_v \quad \text{Para } v_v \geq 5 \frac{m}{s}$$

-Ecuaciones de potencial para transferencia de calor en la cubierta

Obtenemos las condiciones de frontera para el caso general de interfaz de acuerdo con lo siguiente



Dado que

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Para  $T_R$

Las condiciones de frontera

$$T = T_0 \text{ En } x=0$$

$$T = T_0 \text{ En } y=0$$

$$T = T_0 \text{ En } x=w$$

$$\sigma (T_r^4 - T^4) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \text{ En } y=L$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h (T_A - T_{\text{fluido}}) \text{ En } y=L/2$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ En } x=w/2$$

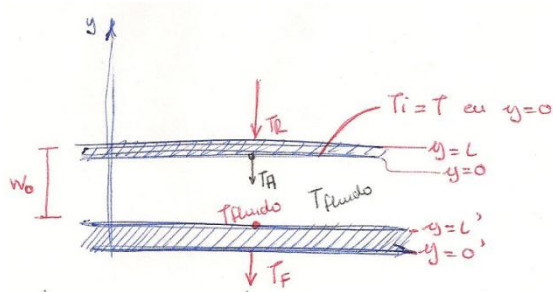
Para  $T_2 = T_{R2}$

$$T = T_0 \text{ En } x=0$$

$$T = T_0 \text{ En } y=0$$

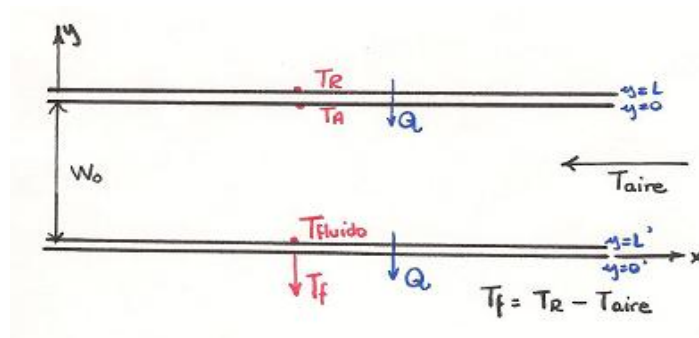
$$T = T_0 \text{ En } y=L$$

$$\sigma \left( T_r^4 - T_s^4 \right) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \text{ En } x=w$$



$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h \left( T_A - T_{\text{fluido}} \right) \text{ en } x=w/2$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ en } y=L/2$$



Interfaz

La ecuación de energía que depende de la distancia y el tiempo

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$L = T_R \text{ en } y=L$$

$$T = T_i \text{ En } t=0$$

$$\text{Si } y=w_0$$

$$\sigma \left( T_A^4 - T_{\text{fluido}}^4 \right) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \text{ En } y=L$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h (T_A - T_{\text{fluido}}) \quad \text{En } y=0$$

Discriminando el efecto del fluido

$$T_i = T_{\text{fluido}} \quad \text{En } t=0$$

$$h (T_A - T_{\text{fluido}}) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{En } y=L'$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h (T_F - T_{\text{int}}) \quad \text{En } y=0'$$

Para la zona curva del invernadero aplicamos coordenadas cilíndricas

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

$$\sigma \epsilon (T_A^4 - T_R^4) = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{En } -x=r$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_F - T_{\text{int}}) \quad \text{En } -x=r/2$$

$$T = T_0 \quad \text{En } r=0 \text{ si } y=w_0$$

Cuando se presenta repentinamente el fluido

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$L = T_R \quad \text{en } r=L$$

$$\text{Si } T = T_i \quad \text{en } t=0$$

$$\sigma \epsilon (T_A^4 - T_R^4) = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{En } r=L$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_A - T_{\text{fluido}}) \quad \text{En } r=0$$

Despreciando el efecto de la interfaz

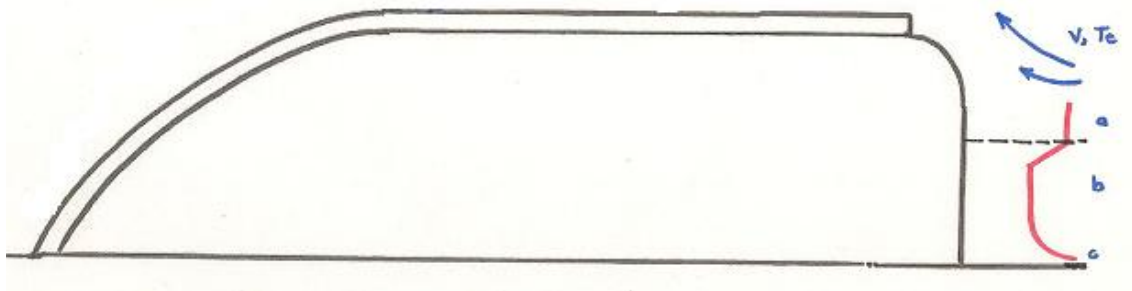
$$T_i = T_{\text{fluido}} \quad \text{en } t = 0$$

$$h \left( T_A - T_{\text{fluido}} \right) = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{En } r=L'$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h \left( T_F - T_{\text{int}} \right) \quad \text{En } r=0$$

-Pared norte

Con esto podemos deducir la transferencia de calor en la pared norte debido a la conveccion.



Conveccion en pared norte

Si  $\Delta T = T_s - T_e$

$$h_c = 1.07 \left( \frac{\Delta T}{x} \right)^{1/4} \quad \text{si } 10^4 \leq Gr \leq 10^9$$

$$h_c = 1.3 \left( \frac{\Delta T}{x} \right)^{1/3} \quad \text{Si } 10^9 \leq Gr \leq 10^{12}$$

$$dQ = h_c \left( T_s - T_e \right) dx$$

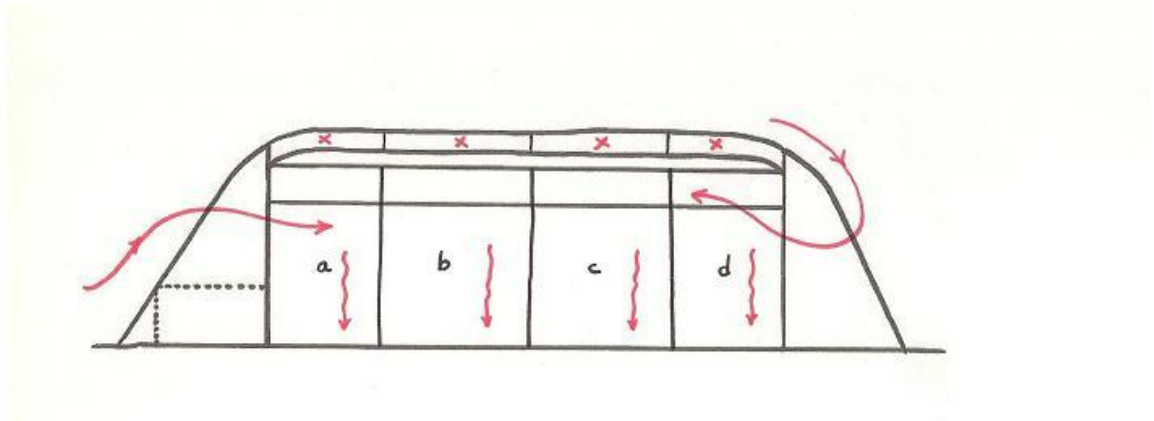
Desde cero hasta x, por la definición de Gr por lo tanto

$$x = \left[ \left( \frac{10^6 v^2}{\frac{\Delta T}{T} g} \right) \right]^{1/3}$$

$$q = \frac{4}{3} \Delta T^{5/4} \left( Wx^{3/4} + \frac{40}{39} \Delta T^{4/15} (-x) \right)$$

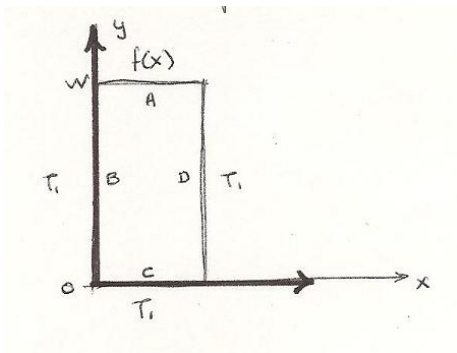
La transferencia debida ala conducción.





Conducción en pared norte

Las paredes son secciones rectangulares de película en donde tenemos temperatura  $f(x)$  asumimos un régimen estacionario pues solo nos interesa el intervalo de tiempo máximo de irradiación solar y controlar el calor transferido en este intervalo de tiempo.



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad \psi = T - T_1$$

$$T = T_1 \text{ En } x=0, \quad \psi = 0$$

$$T = T_1 \text{ En } y=0, \quad \psi = 0$$

$$T = T_1 \text{ En } x=L, \quad \psi = 0$$

$$T = f(x) \text{ En } y=w \quad \psi = F(x)$$

$$\psi(x, y) = \sum X(x)Y(y)$$

Por lo tanto la distribución de temperatura

$$T - T_1 = T_2 \frac{\operatorname{senh}\left(\frac{\pi y}{L}\right)}{\operatorname{senh}\left(\frac{\pi w}{L}\right)} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{L}$$

$$\text{Si } dq_y = -k dA_y \frac{\partial T}{\partial y}$$

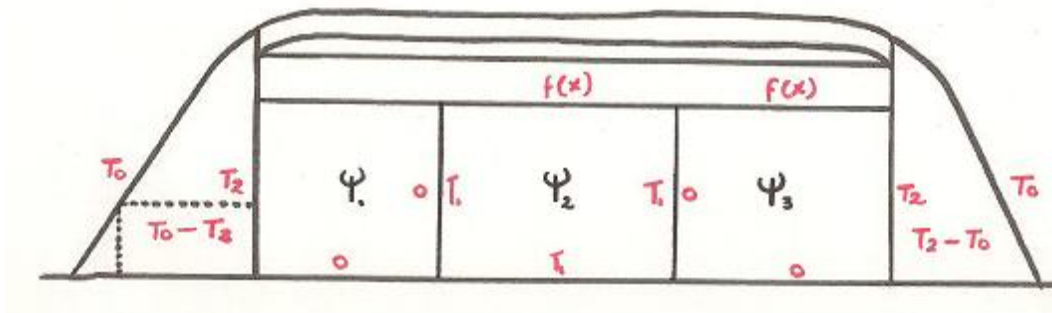
$$q_y = \int_0^L -k \frac{\partial T}{\partial y} \delta x = -k \delta x T_2 \frac{\pi}{L} \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{L}\right)}{\operatorname{senh}\left(\frac{\pi w}{L}\right)} \left(-\frac{L}{h} \cos \frac{\pi x}{L}\right)^L$$

$$q_y = -2k \delta T_2 \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{L}\right)}{\operatorname{senh}\left(\frac{\pi w}{L}\right)}$$

La transferencia de calor a través de la superficie A y C

$$q_A = -2k \delta T_2 \coth \frac{\pi w}{L}$$

$$q_c = -2k \delta T_2 \frac{1}{\operatorname{senh}\left(\frac{\pi w}{L}\right)}$$



Divisiones de la pared norte

De nuevo

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad \psi = T - T_1$$

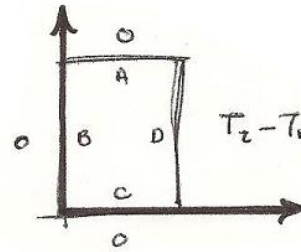
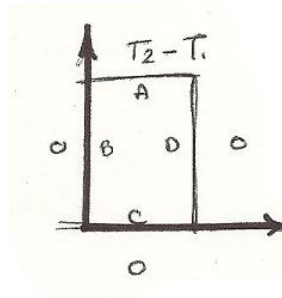
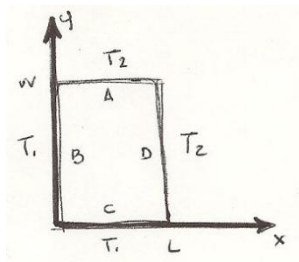
Para

$$\psi = 0 \quad \text{En } x=0$$

$$\psi = 0 \quad \text{En } y=0$$

$$\psi = T_2 - T_1 \quad \text{En } x=L$$

$$\psi = T_2 - T_1 \quad \text{En } y=w$$



$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial y^2} = 0$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 0 \quad \text{en } x=0$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 0 \quad \text{En } y=0$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 0 \quad \text{En } x=L$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 0 \quad \text{En } y=w$$

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial y^2} = 0$$

$$\psi_1 = 0 \quad \text{En } x=0$$

$$\psi_1 = 0 \quad \text{En } x=L$$

$$\psi_1 = 0 \quad \text{En } y=0$$

$$\psi_1 = T_2 - T_1 \quad \text{En } y=w$$

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial y^2} = 0$$

$$\psi_2 = 0 \quad \text{En } x=0$$

$$\psi_2 = 0 \quad \text{En } y=0$$

$$\psi_2 = 0 \quad \text{En } y=w$$

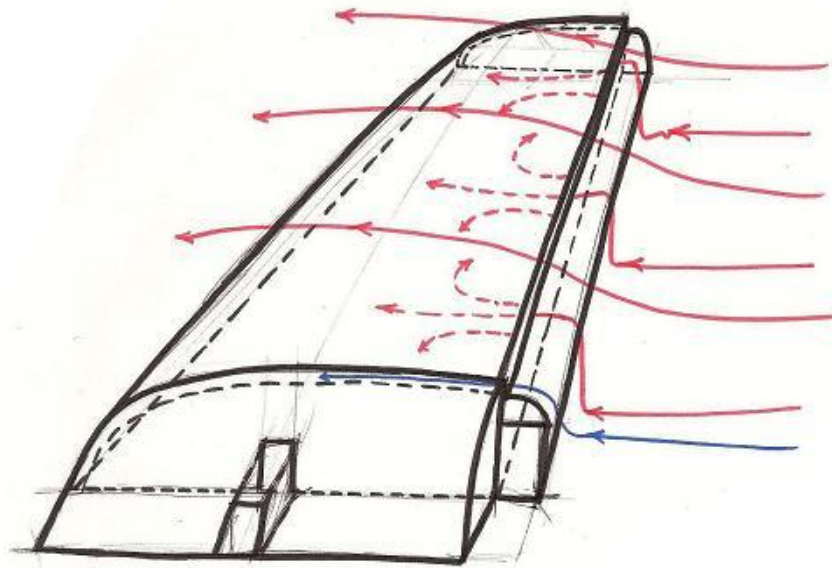
$$\psi_2 = T_2 - T_1 \quad \text{En } x=L$$

La solución general

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = (T_2 - T_1) \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{n} \left[ \frac{\sinh\left(\frac{n\pi y}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi w}{L}\right)} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} + \frac{\sinh\left(\frac{n\pi x}{w}\right)}{\sinh\left(\frac{n\pi L}{w}\right)} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{w} \right]$$

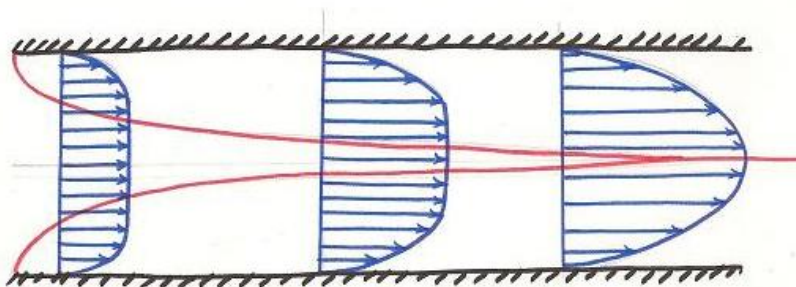
## Capítulo VII INTERFAZ

Es la parte más importante del análisis ya que el flujo nos permite conocer la cantidad de calor ganado o perdido debida a la naturaleza del aire.



Circulación de aire en la interfaz

Cuando el flujo entra en la interfaz debe recorrer cierta longitud antes de alcanzar un flujo desarrollado, nos interesa mantener un flujo laminar y evitar la transición.



Desarrollo del flujo

Donde la longitud de entrada es

$$\Xi = 0.05 \operatorname{Re}_x \left( \text{ancho} \right)$$

Para el flujo laminar desarrollado podemos tener los siguientes casos:

a) conveccion forzada

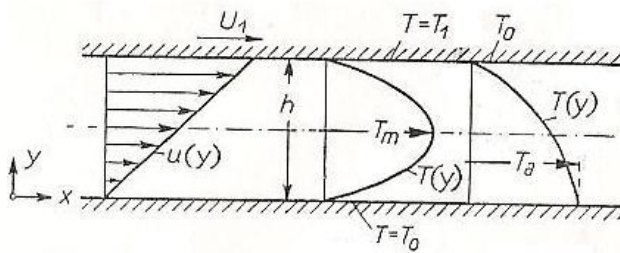
a. flujo de Couette

b. flujo de Poiseuille

b) conveccion natural

-En el caso de conveccion forzada

Para flujo de Couette



$$u \left( \overline{\cdot} \right) = U_1 \frac{y}{h} \quad v \equiv 0, \quad P = \text{Cte}$$

Con las siguientes condiciones de frontera

$$T = T_0 \quad \text{En } y=0$$

$$T = T_1 \quad \text{En } y=h$$

La distribución de temperatura cuando las paredes están a la misma temperatura

$$T \left( \overline{\cdot} \right) - T_0 = \frac{\mu U_1^2}{2k} \frac{y}{h} \left( 1 - \frac{y}{h} \right)$$

Por lo tanto podemos decir que si el calor transmitido viene de la pared superior al fluido tenemos

$$\frac{\mu U_1^2}{2k} \leq T_1 - T_0 \quad \text{o} \quad \operatorname{Pr} \left( \overline{\cdot} \right) \geq 2$$

O si tenemos que el fluido calienta las paredes del ducto

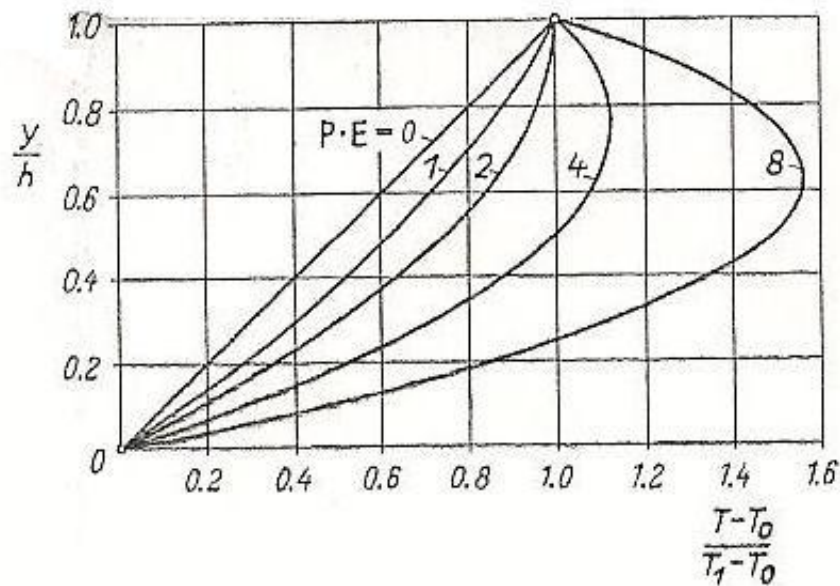
$$\frac{\mu U_1^2}{2\lambda} \geq T_1 - T_0 \quad \text{o} \quad \text{Pr} \cdot \text{Eck} \geq 2$$

Si suponemos que solo hay insolación de un lado de la cubierta, que es lo que nos interesaría.

$$T = T_0 \quad \text{En } y=0$$

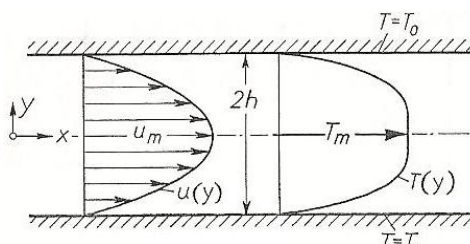
$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{En } y=h$$

$$T - T_0 = \mu \frac{U_1^2}{2k} \left( 1 - \frac{y^2}{h^2} \right)$$



P. E. para el ducto

Para flujo de Poiseuille

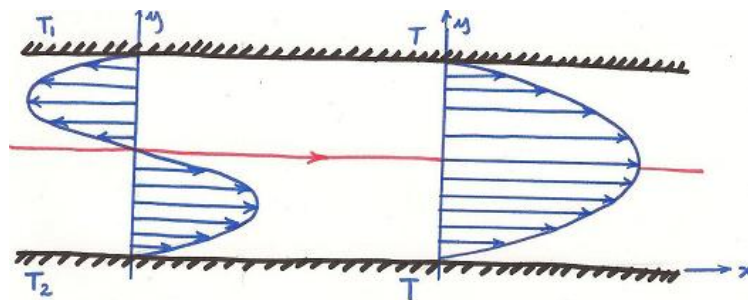


$$u \curvearrowright = u_m \left( 1 - \frac{y^2}{h^2} \right)$$

Asumimos que existe una misma temperatura en las paredes

$$T \curvearrowright T_0 = \frac{1}{3} \frac{\mu u_m^2}{k} \left[ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^4 \right]$$

-Para el caso de convección natural



Convección natural y forzada

La separación entre paredes será llamada  $2B$ ,  $B$  la línea central, con las siguientes condiciones de frontera:

$$T = T_2 \text{ En } y = -B$$

$$T = T_1 \text{ En } y = B$$

La distribución de temperatura viene dada por

$$T = T_m - \frac{1}{2} \Delta T \frac{y}{B}$$

Al hacer un balance de cantidad de movimiento y con la ayuda de una serie de Taylor nos da

$$\mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = \left( \frac{dp}{dx} + \rho g \right) + \frac{1}{2} \rho g \beta \Delta T \frac{y}{B}$$

Resolviendo con las condiciones de frontera

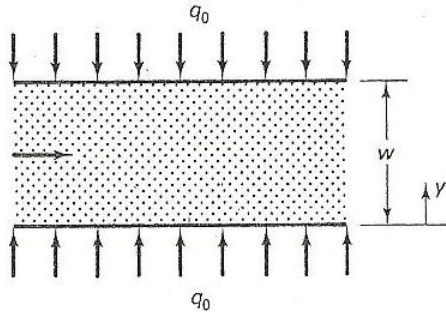
$$v_x = \frac{\rho g \beta \Delta T B^2}{12 \mu} \left[ \left( \frac{y}{B} \right)^3 - \left( \frac{y}{B} \right) \right]$$



Por lo tanto

$$v_x = \frac{1}{12} Gr \left[ \left( \frac{y}{B} \right)^3 - \left( \frac{y}{B} \right) \right]$$

Para TFD entre las placas del ducto



$$v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = 0$$

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

Para condiciones Standard

$$u = 0 \quad \text{En } y=0$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \quad \text{En } y=0$$

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad \text{En } y=w/2$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{En } y=w/2$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_b}{dx}$$

Integramos dos veces para el perfil de velocidad

$$v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = 0$$

Por lo tanto

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} y + C_1$$

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2$$

Por las condiciones de frontera

$$u = 0 \quad \text{En } y=0$$

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad \text{En } y=w/2$$

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \left( \frac{y^2}{2} - \frac{yw}{2} \right)$$

Entonces si

$$U_b = \frac{1}{w} \int_0^w u dy$$

$$U_b = -\frac{w^3}{12} \frac{1}{w} \frac{dP}{dx}$$

Expresamos  $dP/dx$  en términos de  $U_b$

$$u = 6U_b \left[ \frac{y}{w} - \left( \frac{y}{w} \right)^2 \right]$$

Para el esfuerzo en la pared y factor de fricción

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} \Big|_0 = 6U_b \left[ \frac{1}{w} - 2 \left( \frac{y}{w} \right) \right] = \frac{6\mu U_b}{w} = \rho U_b^2 \frac{f}{2}$$

$$Y \quad f = 12 \frac{\nu}{w U_b}$$

Diámetro hidráulico para el ducto

$$D_h = \frac{4A}{p} = \frac{4wZ}{2z} = 2w$$

$$f = 24 \frac{v}{D_h U_b} = \frac{24}{\text{Re}_x}$$

Si

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_b}{dx} \quad \text{y} \quad \frac{dT_b}{dx} = \frac{q_0 P}{m c_p} = \frac{q_0 2Z}{\rho c_p U_b Z w} = \frac{2q_0}{\rho c_p U_b w}$$

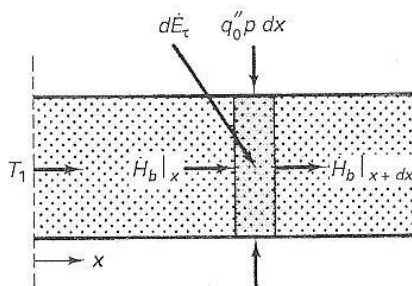
Por lo tanto

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = \frac{12 q_0}{w k} \left( \frac{y}{w} - \left( \frac{y}{w} \right)^2 \right)$$

Integramos dos veces

$$\frac{dT}{dy} = \frac{12 q_0}{w k} \left( \frac{y^2}{2w} - \frac{y^3}{3w^2} \right) + C_1$$

$$T = \frac{12 q_0}{w k} \left( \frac{y^3}{6w} - \frac{y^4}{12w^2} \right) + C_1 y + C_2$$



Ahora

$$q_0 + dE_\tau = q_0'$$

$$dE_\tau = \int u \left( \frac{du}{dy} \right)^2 dV = Z dx \int_0^w 36 \frac{\mu U_b^2}{w^2} \left[ 1 - 4 \frac{y}{w} + 4 \left( \frac{y}{w} \right)^2 \right] dy = 12 \frac{\mu U_b^2}{w} z dx$$

Sustituyendo en el perímetro ( $p$ ) en

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

$$2q_0 + 12\left(\frac{\mu U_b}{w}\right) = \rho c_p U_b w \frac{dT_b}{dx} \quad \circ$$

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{1}{\rho c_p U_b w} \left( 2q_0 + 12 \frac{\mu U_b^2}{w} \right)$$

Si

$$v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = 0$$

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = \frac{12}{w} \frac{q_0}{k} \left[ \frac{y}{w} - \left( \frac{y}{w} \right)^2 \right] + 36 \frac{\mu U_b^2}{kw^2} \left[ -1 + 6 \frac{y}{w} - 6 \left( \frac{y}{w} \right)^2 \right]$$

Con

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \quad \text{En } y=0$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{En } y=w/2$$

$$T - T_s = \frac{q_0 w}{k} \left[ -\frac{y}{w} + 2 \left( \frac{y}{w} \right)^3 - \left( \frac{y}{w} \right)^4 \right] + \frac{\mu U_b^2}{k} \left[ -18 \left( \frac{y}{w} \right)^2 + 36 \left( \frac{y}{w} \right)^3 - \left( \frac{y}{w} \right)^4 \right]$$

$$T_b = \frac{1}{U_b w} \int_0^w u T dy = T_s - \frac{17}{70} \frac{q_0 w}{k} - \frac{54}{70} \frac{\mu U_b^2}{k}$$

$$T_s - T_b = \frac{17}{70} \frac{q_0 w}{k} + 0.771 \frac{\mu U_b^2}{k} \quad y \quad Nu = \frac{q_0}{T_s - T_b} \frac{2w}{k} = \frac{140}{17} \left[ 1 - 0.771 \frac{\mu U_b^2}{k (T_s - T_b)} \right]$$

$$Nu = 8.24 \left( -0.771 Pr Ec \right)^{-1/4}$$

Para completar el análisis integramos

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{1}{\rho c_p U_b w} \left( 2q_0 + 12 \frac{\mu U_b^2}{w} \right)$$

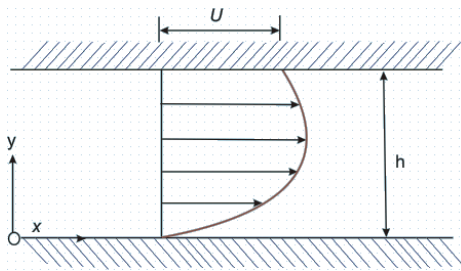
$$T_b = T_1 + \left( 2q_0 + 12 \frac{\mu U_b^2}{w} \right) \frac{x}{\rho c_p U_b w}$$

Para  $T_s$

$$T_s = T_1 + \left( 2q_0 + 12 \frac{\mu U_b^2}{w} \right) \frac{x}{\rho c_p U_b w} + \frac{17 q_0 w}{70 k} + 0.771 \frac{\mu U_b^2}{k}$$

Para el aire totalmente desarrollado

Ahora analizamos el flujo de Couette que requiere una temperatura mayor en la superficie superior



$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$v = 0 \quad \text{En } x=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{En } x=L$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma_{xx} - P \right) - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0$$

$$\sigma_{xx} = 0 \quad v = \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad v = 0$$

Por la ecuación de momento en x

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

$$\int \partial^2 u = \int \partial y^2$$

$$u \int \int = C_1 y + C_2$$

$$\text{Si } u \int = 0 \quad u \int = U$$

$$u \stackrel{y}{=} \frac{y}{L} U$$

Aplicando la ecuación de la energía con

$$v = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad q = 0$$

$$\rho u \frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + u \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$

$$\text{Si } \rho u \frac{\partial i}{\partial x} = 0 \quad \text{y} \quad k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\mu \left( \frac{du}{dy} \right)^2 = -\mu \left( \frac{U}{L} \right)^2$$

Integramos dos veces

$$T \stackrel{y}{=} -\frac{\mu}{24} \left( \frac{U}{L} \right)^2 y^2 + C_3 y + C_4$$

$$\text{Si } T \stackrel{0}{=} T_0 \quad T \stackrel{L}{=} T_L$$

$$T \stackrel{y}{=} T_0 + \frac{\mu}{24} U^2 \left[ \frac{y}{L} - \left( \frac{y}{L} \right)^2 \right] + T_L - T_0 \frac{y}{L}$$

Para el calor en las superficies

$$q_y = -k \frac{dT}{dy} = -k \left[ \frac{\mu}{2k} U^2 \left( \frac{1}{L} - \frac{2y}{L^2} \right) + \frac{T_L - T_0}{L} \right]$$

$$q_0 = -\frac{\mu U^2}{2L} - \frac{k}{L} (T_L - T_0) \quad \text{y} \quad q_0' = \frac{\mu U^2}{2L} - \frac{k}{L} (T_L - T_0)$$

La temperatura máxima esta en:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{\mu}{2k} U^2 \left( \frac{1}{L} - \frac{2y}{L^2} \right) + \frac{T_L - T_0}{L} = 0$$

$$T_{\text{maxima}} = \left[ \frac{k}{\mu U^2} (T_L - T_0) + 1/2 \right] L = \frac{kL(T_L - T_0)}{2\mu U^2}$$

## CONCLUSIONES

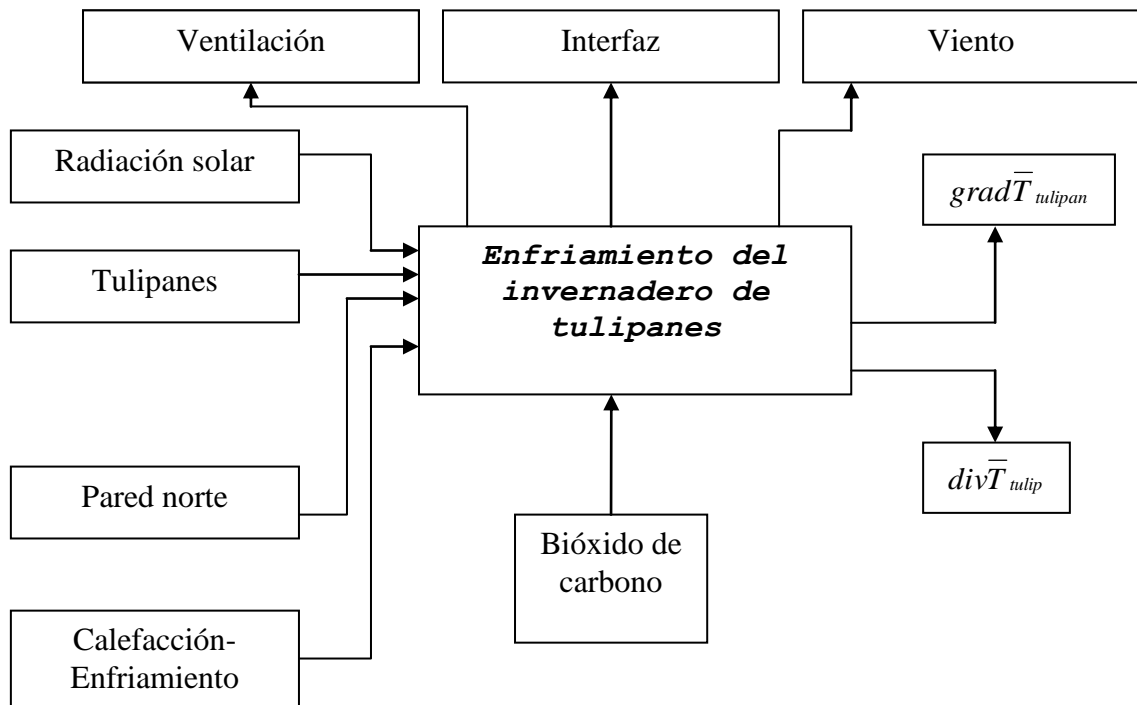
*El análisis de los fenómenos que se llevan a cabo en un cultivo en general son complicados y a veces poco predecibles con exactitud, no obstante se pudo vincular la parte fenológica del tulipán con los criterios ingenieriles acerca de dinámica, termodinámica de fluidos, transferencia de calor y teoría de capa limite, así obtuvimos un enfoque mas completo acerca de las relaciones que se presentan en el cultivo de esta genial flor.*

*Las ecuaciones de potencial junto con las condiciones de frontera específicas de cada situación permiten hacer modelos matemáticos que pueden ayudar al biólogo o al agrónomo para la construcción de invernaderos de tulipanes y de otras especies, adecuados y amigables al medio ambiente, y que disminuyan los costos para el productor.*

*Asociar la alometria con el desarrollo matemático formal resulta ser poco mas que difícil debido a la naturaleza un poco empírica de los modelos con los que se trabaja en el cultivo del tulipán, pero se obtuvo un resultado satisfactorio, pues se cubrieron los mas importantes mecanismos que se llevan a cabo en invernadero, aunque es mas que evidente que el trabajo por hacer todavía es mucho.*

*Otra observación importante fue poder introducir los índices de alometria en las ecuaciones de calor, de hecho estos índices nos permitirían tener distintas ecuaciones que solamente variarían de acuerdo al parámetro que se estuviera ocupando, el NAR por ejemplo, nos daría una estimación energética en base a su naturaleza y así para todas las cantidades.*

*El tulipán representa una fuente de ingresos en potencia para los floricultores de México, y basta con ver el apéndice A para darse cuenta de ello, planteamos de manera muy superficial el problema del cultivo de flor en México, aunque para ser sinceros, podemos hablar del problema de la agricultura en general, no toco a este trabajo ese tópico, pero es interesante conocer como ni a los ingenieros ni a los científicos mexicanos les interesa intervenir en este mercado, que puede ser muy lucrativo, hace falta mas vinculación y trabajo interdisciplinario entre ingenieros mecánicos, agrónomos y biólogos. De todo lo anterior podemos resumir que el sistema queda determinado así:*





APÉNDICE A: TULIPANES

TEMPRANOS (*A. simples*)



Apricot beauty



Christmas dream



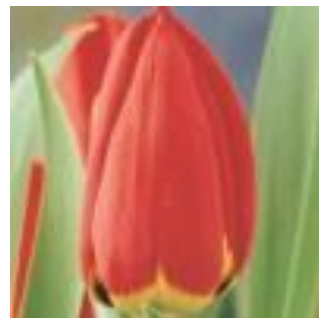
Christmas marvel



Flair



Coquette



Brilliant star



Bellona



Burning love



Candy prince



Diana



Flaming coquette



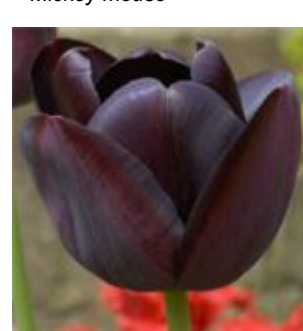
Mickey mouse



Coeur cardinal



Princess Irene



Cafe noir



Christmas sweet



Keizerskroon



Red revival



General de Wet



Grand perfection



Orange surprise



Queen of Holland



Hermitage  
(B. dobles)



Christmas beauty



Abba



Montecarlo



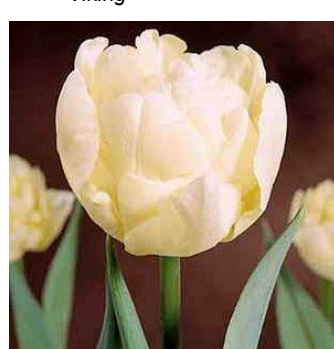
Viking



Verona



Blue diamond



Montreux





Orange princess



Queen of marvel



Peach blossom



Mondial



Monse



Red princess

*INTERMEDIOS (A. triumph)*



Anna José



Barcelona



Carnaval de Rio



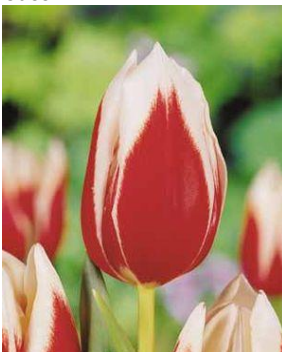
Cassini



Don Quijote



Francoise



Full house



Golden present



Hemisphere



Hillary Clinton



Hot pants



Ile de France



Inzell



Jackpot



Jimmy



Kees Nelis



Key west



Lucky strike



National velvet



Negrita



New design



Page polka



Passionale



Rem's favorite





Shirley



Synaeda amor



Tequila Sunrise



Van Eijk



Veronique Sanson



Washington



Yellow present



Bastogne



Blenda



Brigitta



Ganders Rhapsody



Lee van der Mark



Lustige



White dream



Vanessa Rivera



Purple Prince



Purple flag



Orange Cassini



Ben van Zanten



Strong gold



Sevilla



Silver dollar



Bellow flight



Yokohama



Silentia



Verandi



Synaeda blue



Atilla graffiti



African queen



Cheers





*Dynasty*



*Gavota*



*Hollandia*



*Jan Reus*



*Makassar*



*Rossalie*



*Prima vista*



*Purple rain*



*Rousillion*



*Royal ten*



*Royal virgin*



*Seadov*



*Zurel*



*Snow lady*



*Cairo*



Judith Leyster



El Cid



Wildhof

(B. Darwin)



Apeldoorn



Apeldoorn elite



Golden Apeldoorn



Beauty of Apeldoorn



Ad rem



Marit



Banja Luca



Apricot impression



Golden Oxford



Oxford



Oxford elite



Parade





*Pink impression*



*Ivory floradale*



*Lightin sun*



*Ollioules*



*Red impression*



*Golden parade*



*Gudoshnik*



*Juliette*



*Salmon impression*



*World's favourite*



*Royal Ad rem*



*American dream*

**TARDIOS (A. Simples)**



*Avignon*



*Dordogne*



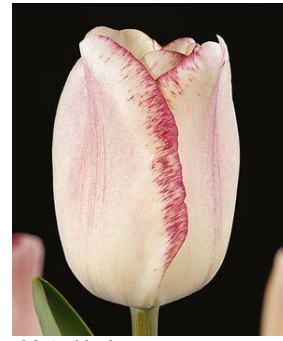
*Esther*



*Kingsblood*



*La courtine*



*Mata Hari*



*Maureen*



*Menton*



*Queen of night*



*Renown*



*Sancerre*



*Blushing lady*



*Catherina*



*Deep river*



*Perestroika*



*Pink diamond*



*Princess Victoria*

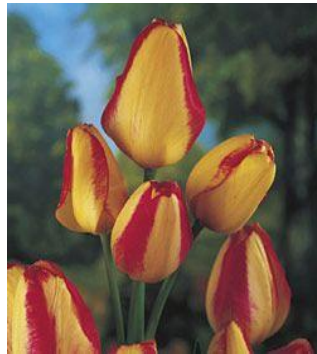


*India*





Toyota



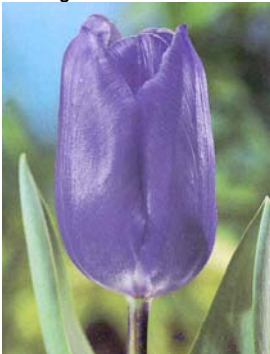
Georgette



City of Vancouver



Recreado



Blue ribbon

(B. lilium)



Temple of beauty



Ballade



Ballerina



Burgundy



Ellegant lady



Mariette



Mona lisa



Nicollette



Claudia



Lilac ti



Marilyn



Red shine



West point



White elegance



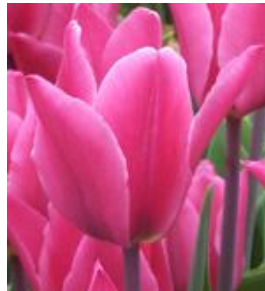
Aladin



Sonne



Sapporo



Jazz



China Pink



Pieter De Leur



White triumphator



Ballade lady



Purple dream



Pretty woman



Burgundy



(C. desflecados)



Blue heron



Curly Sue



Fancy frills



Hamilton



Arma



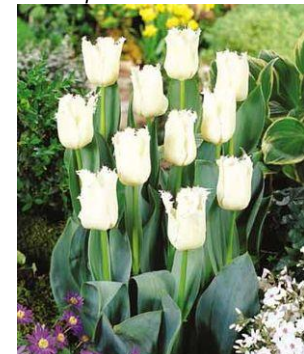
Davenport



Canasta



Carrousel



Daytona



Lambada



Mascotte



Fabio



Valerie Gergiev



Cummings



Fringed beauty





Happy hour



Maroon



Swan wings



Black jewel



Burgundy lace



Dallas



Fringed elegance



Bell song



Pink fountain

(D. viridiflora)



Doll's minuet



Greenland



Spring green



China town



Golden artista



Deidre





*Violet bird*



*Esperanto*



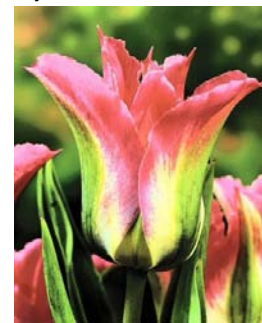
*Hollywood*



*Eye catcher*



*Virichic*



*Green village*

*(E. dobles)*



*Angelique*



*Carnaval de Nice*



*Chato*



*Lilac perfection*



*Creme upstar*



*Double focus*



*Mount Tacoma*



*Top lips*



*Uncle Tom*





Upstar



Casablanca



Black hero

(F. Rembrandt)



(G. parrot)



Apricot parrot



Blue parrot



Fantasy



Flamin parrot



Red parrot



White parrot



Black parrot



Blue parrot



Estela Rinjveld





Orange favourite



Texas gold



Weber's parrot



Black parrot



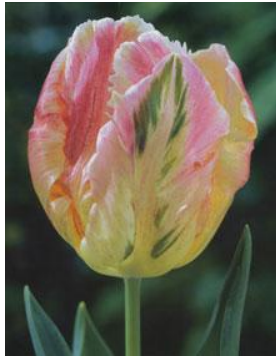
Rococo



Professor Roentgen



Texas flame



Libretto



Lucky parrot



Snow parrot



Rai

(H. greiijqi)



Bright parrot



First impression



Gold west



Mixed





Pinoccio



Princess Charmante



Red ridin hood



Calypso



Early star



Toronto



Casa grande



Oratorio



White fire

(I. kaufmanianna)



Early harvest



Hearts delight



Showwinner



Stresa



Ancilla



Giuseppe Verdi





Johann Strauss



Shakespeare  
(J. fosteriana)



Scarlet baby



Albert Heyn



Juan



Orange emperor



Purissima

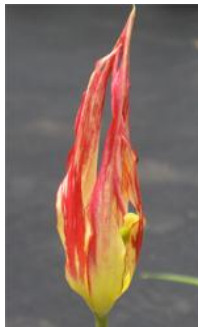


Red emperor

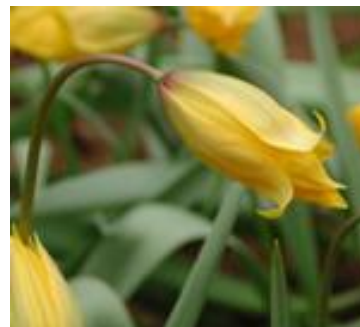


Salut

VARIEDADES (K. acuminata)



*silvestris*



(L. clusiana)



Cynthia



Lady Jane

## APENDICE B: TABLAS

Derived Quantity	Symbol	Instantaneous Value <sup>a</sup>	Formula for Mean Value over Time Interval ( $T_2 - T_1$ ) <sup>b</sup>	Unit
Relative growth rate	RGR	$1/W \cdot dw/dt$	$\overline{\text{RGR}} = (\ln W_2 - \ln W_1)/(T_2 - T_1)$	$W \cdot W^{-1} \cdot T^{-1}$
Leaf area ratio	LAR	$L_A/W$	$\overline{\text{LAR}} = (L_{A_2}/W_2 + L_{A_1}/W_1)/2$	$A \cdot W^{-1}$
Specific leaf area	SLA	$L_A/L_w$	$\overline{\text{SLA}} = (L_{A_2}/L_{w_2} + L_{A_1}/L_{w_1})/2$	$A \cdot W^{-1}$
Specific leaf weight	SLW	$L_w/L_A$	$\overline{\text{SLW}} = (L_{w_2}/L_{A_2} + (L_{w_1}/L_{A_1})/2$	$W \cdot A^{-1}$
Net assimilation rate	NAR	$1/L_A \cdot dw/dt$	$\overline{\text{NAR}} = [(W_2 - W_1)/(T_2 - T_1)] \cdot (\ln L_{A_2} - \ln L_{A_1})/(L_{A_2} - L_{A_1})$	$W \cdot A^{-1} \cdot T^{-1}$
Leaf area index	LAI	$L_A/G_A$	$\overline{\text{LAI}} = [(L_{A_2} + L_{A_1})/2] \cdot (1/G_A)$	dimensionless
Crop growth rate	CGR	$1/G_A \cdot dw/dt$	$\overline{\text{CGR}} = 1/G_A \cdot (W_2 - W_1)/(T_2 - T_1)$	$W \cdot A^{-1} \cdot T^{-1}$
Leaf area duration (leaf area basis)	LAD	None	$\overline{\text{LAD}} = (L_{A_2} + L_{A_1})(T_2 - T_1)/2$	$A \cdot T$
Leaf area duration (leaf area index)	LAI <sub>D</sub>	None	$\overline{\text{LAI}_D} = (LAI_1 + LAI_2)(T_2 - T_1)/2$	$T$
Biomass duration	BMD	None	$\overline{\text{BMD}} = [(W_2 + W_1)/2] \cdot (T_2 - T_1)$	$W \cdot T$
Absolute growth rate	AGR	$dw/dt$	$\overline{\text{AGR}} = W_2 - W_1/T_2 - T_1$	$W \cdot T^{-1}$
Leaf fraction	LF	$L_w/W$	$\overline{\text{LF}} = (LF_1 + LF_2)/2$	%

<sup>a</sup> $L_A$  = leaf area,  $L_w$  = leaf weight,  $G_A$  = ground area,  $T$  = time,  $W$  = weight,  $A$  = area.

<sup>b</sup>Approximate except for relative growth rates.

## 1.- Índices de alometria

GROUP	DEFINITION	INTERPRETATION
Eckert number ( $Ec$ )	$\frac{V^2}{c_p(T_s - T_\infty)}$	Kinetic energy of the flow relative to the boundary layer enthalpy difference.
Fourier number ( $Fo$ )	$\frac{\alpha t}{L^2}$	Ratio of the heat conduction rate to the rate of thermal energy storage in a solid. Dimensionless time.
Mass transfer Fourier number ( $Fo_m$ )	$\frac{D_{AB}t}{L^2}$	Ratio of the species diffusion rate to the rate of species storage. Dimensionless time.
Friction factor ( $f$ )	$\frac{\Delta p}{(L/D)(\rho u_m^2/2)}$	Dimensionless pressure drop for internal flow.
Grashof number ( $Gr_L$ )	$\frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$	Ratio of buoyancy to viscous forces.
Colburn $j$ factor ( $j_h$ )	$StPr^{2/3}$	Dimensionless heat transfer coefficient.
Colburn $j$ factor ( $j_m$ )	$St_mSc^{2/3}$	Dimensionless mass transfer coefficient.
Jakob number ( $Ja$ )	$\frac{c_p(T_s - T_{sat})}{h_{fs}}$	Ratio of sensible to latent energy absorbed during liquid-vapor phase change.
Lewis number ( $Le$ )	$\frac{\alpha}{D_{AB}}$	Ratio of the thermal and mass diffusivities.
Nusselt number ( $Nu_L$ )	$\frac{hL}{k_f}$	Dimensionless temperature gradient at the surface.
Peclet number ( $Pe_L$ )	$\frac{VL}{\alpha} = Re_L Pr$	Dimensionless independent heat transfer parameter.
Prandtl number ( $Pr$ )	$\frac{c_p\mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$	Ratio of the momentum and thermal diffusivities.
Reynolds number ( $Re_L$ )	$\frac{VL}{\nu}$	Ratio of the inertia and viscous forces.
Schmidt number ( $Sc$ )	$\frac{\nu}{D_{AB}}$	Ratio of the momentum and mass diffusivities.
Sherwood number ( $Sh_L$ )	$\frac{h_m L}{D_{AB}}$	Dimensionless concentration gradient at the surface.
Stanton number ( $St$ )	$\frac{h}{\rho V c_p} = \frac{Nu_L}{Re_L Pr}$	Modified Nusselt number.
Mass transfer Stanton number ( $St_m$ )	$\frac{h_m}{V} = \frac{Sh_L}{Re_L Sc}$	Modified Sherwood number.
Weber number	$\rho V^2 L$	Ratio of inertia to surface tension
Biot number ( $Bi$ )	$\frac{hL}{k_s}$	Ratio of the internal thermal resistance of a solid to the boundary layer thermal resistance.
Mass transfer Biot number ( $Bi_m$ )	$\frac{h_m L}{D_{AB}}$	Ratio of the internal species transfer resistance to the boundary layer species transfer resistance.
Bond number ( $Bo$ )	$\frac{g(\rho_l - \rho_v)L^2}{\sigma}$	Ratio of gravitational and surface tension forces.
Coefficient	$\tau_s$	Dimensionless surface shear stress.

## 2.- Coeficientes de transferencia

## APÉNDICE C: MAGNITUDES

$\alpha_c$	Coeficiente de transferencia de calor por conveccion	$Wm^{-2}$
$\alpha_{cond}$	Coeficiente de transferencia de calor por conducción	$Wm^{-2}$
$\alpha_{conv,o}$	Coeficiente de transferencia de calor por conveccion exterior	$Wm^{-2}$
$\alpha_{conv,j}$	Coeficiente de transferencia de calor por conveccion interior	$Wm^{-2}$
$\alpha_s$	Coeficiente de transferencia de calor por radiación	$Wm^{-2}$
$\beta$	Coeficiente de expansión térmica del aire	K
$\delta$	espesor	M
$\delta_c$	Espesor de hoja	0.02 m
$\delta_g$	Espesor de primera capa de suelo	M
$\delta_r$	Espesor de la cubierta	M
$\delta^*$	Pendiente de la presión de vapor saturado en la hoja	Pa K
$\Delta P$	Diferencia de presión entre abertura de ventanas	Pa
$\varepsilon_c$	Coeficiente de absorción de los tulipanes	0.80
$\varepsilon_g$	Coeficiente de absorción del sustrato	0.83
$\varepsilon_r$	Coeficiente de absorción de la cobertura	0.08
$\varepsilon_1$	Factor de absorción de sustrato 1	-
$\varepsilon_2$	Factor de absorción del sustrato 2	-
$\xi_c$	Factor de fricción independiente del área foliar	-
$\lambda$	Calor latente de vaporización del agua	$Jkg^{-1}$
$\lambda_a$	Conductividad térmica del aire	$Wm^{-2}K$
$\lambda_{cond}$	Conductividad térmica	$Wm^{-2}K$
$\lambda_g$	Conductividad térmica del sustrato	$Wm^{-2}K$
$\rho_a$	Densidad del aire	$kgm^{-3}$
$\rho_c$	Densidad de la hoja	$kgm^{-3}$
$\rho_g$	Densidad del sustrato	$kgm^{-3}$
$\rho_r$	Densidad de la cubierta	$kgm^{-3}$
$\Gamma_c$	Coeficiente de reflexión de los tulipanes	0.05
$\Gamma_g$	Coeficiente de reflexión del suelo	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	$5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}$
$\tau_r$	Coeficiente de transmisividad de cubierta	-
$\phi_m$	Vapor de agua producido en el invernadero	$kg s^{-1} m^2$
$\phi_m^s$	Vapor de agua saliente	$kg s^{-1} m^2$
$\phi_v$	Flujo de aire através de ventanas	$m^3 s^{-1}$
$a$	constante	0.51
$Ag$	Superficie del suelo cubierta	$m^2$
$Ar$	Índice de relación cubierta / área del suelo	$m^2 m^2$

$A_v$	Sección de apertura ventana extra	$m^2$
$A_1$	Área de sección transversal invernadero	$m^2$
$b$	Constante	0.088 mbar
$Br$	Numero de Brunt	-
$C_g$	Calor específico del suelo	$Jkg^{-1}K$
$C_c$	Calor específico de la hoja	$Jkg^{-1}K$
$C_p$	Calor específico del aire a presión cte.	$Jkg^{-1}K$
$C_r$	Calor específico de la cubierta	$Jkg^{-1}K$
$e_{d,c}$	Presión de vapor promedio de la hoja	Pa
$e_i$	Presión de vapor promedio en el volumen de aire	Pa
$e_{0*}$	Presión externa de vapor de agua del aire saturado	Pa
$e_0$	Presión externa de vapor de agua del aire	Pa
$e_{i*}$	Presión de vapor saturado en la superficie externa de la hoja	Pa
$F_\varepsilon$	Factor del coeficiente de absorción del suelo	-
$F_\Gamma$	Factor de coeficiente de reflexión del suelo	-
$F_{cg}$	Factor de visibilidad cultivo - suelo	-
$F_{cr}$	Factor de visibilidad cultivo - cubierta	-
$F_{rg}$	Factor de visibilidad cubierta - suelo	-
$F_o$	Factor de fricción de la ventana	-
$k_a$	Nubosidad	-
$r_a$	Resistencia aerodinámica de las hojas	-
$r_s$	Resistencia estomatosa de las hojas	-
$R_g$	Radiación global	-
$s$	Factor de superficie	-
$T_a$	Temperatura del aire	$sm^{-1}$
$T_{tulipan}$	Temperatura de cultivo	K
$T_g$	Temperatura del suelo	K
$T_{g1}$	Temperatura capa 1	K
$T_{g2}$	Temperatura capa 2	K
$T_{g3}$	Temperatura capa 3	K
$T_{gw}$	Temperatura del agua en el suelo	K
$T_i$	Temperatura interna	K
$T_o$	Temperatura externa	K
$T_r$	Temperatura de la cubierta	K
$T_s$	Temperatura del sustrato	K
$T_1$	Temperatura de la superficie 1	K
$T_2$	Temperatura de la superficie 2	K
$v_i$	velocidad promedio del aire en el invernadero	$ms^{-1}$

$v_w$	Velocidad del viento	$ms^{-1}$
$v_l$	Razón de volumen de aire/volumen de suelo	$m^3 m^{-2}$
$x_i$	Humedad absoluta del aire interno	$kgm^{-3}$
$x_o$	Humedad absoluta externa	$kgm^{-3}$
$x_{i^*}$	Humedad absoluta de saturación del volumen de aire a una temperatura	$kgm^{-3}$
$x_{g^*}$	Humedad absoluta de saturación a una temperatura del suelo	$kgm^{-3}$
$Cd$	Coefficiente de difusión	-
$P$	Presión parcial	$Pa$
$A_v$	Área de ventilación	$m^2$
$N$	Numero de cambios de aire	-
$V$	Volumen del invernadero	$m^3$
$\rho C_p$	Capacidad de calor volumétrica	$MJm^{-3} K^{-1}$
$H$	Razón de calentamiento del gas natural	$MJm^{-3}$
$V_i$	Volumen del tanque de gas natural	$m^3$
$\eta_b$	Eficiencia del quemador con condensador	0.88
$\eta_i$	Eficiencia del quemador	0.90
$Ec$	Numero de Eckert	-
$Pr$	Numero de Prandtl	-
$Re$	Numero de Reynolds	-
$\tau_0$	Esfuerzo cortante	$Pa$
$C_d, F_d$	Coefficiente y fuerza de arrastre	-
$q_{eq}$	Transpiración de los tulipanes	$Wm^{-2}$
$q_{cp}$	Conveccion de los tulipanes	$Wm^{-2}$
$q_{rp}$	Radiación de los tulipanes	$Wm^{-2}$
$q_{cg}$	Radiación del sustrato	$Wm^{-2}$
$q_{rw}$	Radiación de la pared norte	$Wm^{-2}$
$q_{cw}$	Radiación del aire	$Wm^{-2}$
$r$	Reflectividad de la cubierta	-
$r_p$	Reflectividad de los tulipanes	
$r_g$	Reflectividad del sustrato	-
$r_w$	Reflectividad de la pared norte	-
$\tau$	Transmisividad de la cubierta	-
$\alpha_p$	Absorvitividad de los tulipanes	-
$\alpha_g$	Absorvitividad del piso	-
$\alpha_w$	Absorvitividad de la pared norte	-
$F_p$	Radiación solar sobre los tulipanes	$Wm^{-2}$
$F_n$	Radiación solar sobre la pared norte	$Wm^{-2}$
$\mu$	viscosidad	





**BIBLIOGRAFIA Y  
FOTOS**

[www.wiltfang.net](http://www.wiltfang.net)  
[www.theplantexpert.com](http://www.theplantexpert.com)  
[www.royalvanzanten.com](http://www.royalvanzanten.com)  
[www.adrbulbs.com](http://www.adrbulbs.com)  
[www.Matthverdegaal.com](http://www.Matthverdegaal.com)  
[www.tulipworld.com](http://www.tulipworld.com)  
[www.hollandbulbfarms.com](http://www.hollandbulbfarms.com)  
[www.kvbwholesale.com](http://www.kvbwholesale.com)  
[www.vanbloem.com](http://www.vanbloem.com)  
[www.basmeelker.com](http://www.basmeelker.com)  
[www.keukenhof.nl](http://www.keukenhof.nl)  
[www.tabblo.com](http://www.tabblo.com)  
[www.hightunnels.com](http://www.hightunnels.com)  
[www.mullerwenskaarten.com](http://www.mullerwenskaarten.com)  
[www.saxion.edu](http://www.saxion.edu)  
[www.janvanmeer.com](http://www.janvanmeer.com)  
[www.oregonflowers.com](http://www.oregonflowers.com)  
[www.wholefoodsmarket.com](http://www.wholefoodsmarket.com)  
[www.dbnl.org](http://www.dbnl.org)  
[www.volkstrant.com](http://www.volkstrant.com)

-LEIDLO (Dutch agricultural economics research institute) 1996, *Holland statistics*, Holanda.

-Cooperative Netherlands Bulb Centre, *bulbs*, mayo 2002

Javier Salinas Cesáreo, '*la producción de flores en el Estado de México*' en la jornada en línea, México, D.F., febrero de 2008

'*flores preferidas el día de San Valentín*' en *estadodemexico.com*, Metepec, Estado de México, febrero de 2008

Gerardo García, Citlali Hernández, Lizbeth Martínez, '*Floricultura en México y entorno mundial*' en *Proyecciones ITESM-CEM*, año 1, número 1, junio – agosto 1999

Nora Francescangeli, '*el cultivo del tulipán*' presentación, Centro Regional Buenos Aires Norte EEA San Pedro, 2005

UDINK TEN CATE, A. J., *analysis and synthesis of greenhouse climate controllers*, dissertation, Wageningen Agricultural University, 1985

VAN HENTEN, E. J., *greenhouse climate management: an optimal control approach*, PhD thesis, Wageningen Agricultural University

Z. P. BOTSCHANTZEVA, H. Q. VAREKAMP, *tulips: taxonomy, morphology, cytology, phytogeography and physiology*, 1a ed. Ed. Balkema – Rotterdam

PREVOST, John, *tulips*, 1a ed. Ed. Abdo and daughters, 1996

BONNAR, Ann, *Tulips: A Guide to Cultivation*, 1a ed. Ed. Pavillion, 1993

ASWATHA, P.A., SEETHARAWN, K. N., engineering fluid mechanics, 1a ed. New York, Ed. Alpha science international, 2005.

YOUNG, A. D., boundary layers, 1a Ed. AAIA education series, 1989.

ZILL, Dennis, ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado, 6a. ed. Ed. Thompson editores, 1997

WEINBERGER, Hans, F., ecuaciones diferenciales con derivadas parciales, 1ª ed. Ed. Reverte, 1992

GUSTAFFSON, Bertil, KREISS, Heinz-Otto, time dependent problems and difference methods, 1ª ed. Ed. Willey interscience, 1995

SAGAN, Hans, boundary and eigenvalue problems in mathematical physics, 1a ed. Ed. John Wiley and sons

KREYSZIG, Erwin, advanced engineering mathematics, 7a ed. Ed. John Wiley and sons, 2000

RAHMAN, Matiur, applied vector analysis, 4a ed. Ed. CRC Press, 2001

GALAN GARCIA, J.L., análisis vectorial para la ingeniería, 3a ed. Ed. Bellisco, 1998

SCHLICHTING, Herman., GERSTEN, Klaus., boundary layer theory, 8a. Ed. Germany, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.

GARDNER; F., PEARCE B., MITCHELL, R., physiology and crop plants, Iowa State University Press, 1989

BOT, G.P.A., greenhouse climate: from physical process to a dynamic model, Ph.D thesis, Waningen Agricultural University, Holanda 1983

TAKAKURA, T., technical models of greenhouse enviroment, Acta horticulturae, 1989

INCROPERA, P. Frank, DE WITT, P., fundamentals of heat and mass transfer, 4 ed. Ed. John Wiley and sons, 2000.

POTTER, Merle, WIGGERS, C. David, mecanica de fluidos, 3a ed. New York, Ed. Thompson, 2002

BIRD. Byron, R., fenómenos de transporte, 3ª ed. Ed. Limusa Wiley, 2000

WEINBERGER, Hans, F., ecuaciones diferenciales con derivadas parciales, 1ª ed. Ed. Reverte, 1992

LINDON, C. T., heat transfer, 3 ed. Ed. Prentice Hall, 1992.