

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA**



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE
BETERRAGA (*Var. Dark Red Detroit*) EN CAMAS BAJAS
ATEMPERADAS EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA**

Autor: Cesar Augusto Altamirano Bustillos

La Paz, Bolivia
2005

**Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Agronomía
Carrera de Ingeniería Agronómica**

**EVALUACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE
BETERRAGA (*Var. Dark Red Detroit*) EN CAMAS BAJAS
ATEMPERADAS EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA**

*Tesis de Grado presentado como requisito
parcial para optar el Título de Licenciado en
Ingeniería Agronómica*

Egr. Cesar Augusto Altamirano Bustillos

Asesores:

Ing. M.Sc. René Chipana

Ing. Ph.D. Magali García

Comité Revisor:

Ing. Paulino Ruiz

Ing. M.Sc. Roberto Miranda

Ing. Rolando Céspedes

Decano:

Ing. M.Sc. Jorge Pascuali

Dedicatoria

*Para ti: mi creador y Cristo, Dios consolador.
Y para las luces de mi vida
para Eloy, mi amigo y papá.
para mi Sonia, amada mamita y mi amiga.
para mi querida hermanita Pamela.
para mi amada Janneth,
para mi niña hermosa Adrianita,
para mis tíos y primos y
para mis amigos y amigas
todos dignos seres de amor.*

AGRADECIMIENTOS:

A mi patria Bolivia, a todos quienes con su palabra de bendición me alentaron y al mismo lo hicieron materialmente.

A mi primerísima Universidad Mayor de San Andrés y a mi querida y primerísima Facultad de Agronomía, cuyos Docentes, Administrativos y condiscípulos forjaron lo mejor de su estima en mi persona.

A la Universidad de Brigham Young y al Instituto de Ciencias Alimenticias y Agropecuarias Ezra Taf Benson por su ayuda logística y su respaldo al trabajo.

Al Sr. Dr. Paul Jhonston Ex Director Mundial del Instituto Benson, quién me brindó su respaldo y opinión, en sus visitas al trabajo, expresando siempre su interés en el estudio.

Mi agradecimiento especial y eterno a los miembros de la Comunidad de Contorno Centro, quienes me acogieron, permitieron llevar adelante el estudio en su propiedad y colaboraron en la construcción y desarrollo del experimento.

A mis padres Eloy, Sonia, Tios: Ivan Bustillos, Daniel Bustillos, Elba Altamirano, Susana Bustillos, Abel Bustillos, Gastón Aramayo, Fany Bustillos y a mis abuelos, por su apoyo afectivo y ayuda logística y material para hacer efectivo el trabajo. Gracias. Dios los premie.

Al Ing. Luis Espinoza Coordinador para Sud – América del Instituto Benson por su colaboración y su ayuda.

A la Srta. Elizabeth García Coordinadora para Bolivia, por su colaboración cuanto fuera sincera.

Al Sr. Ing. Msc. René Chipana quien desde su enseñanza hasta su dirección en el presente trabajo me proporcionó el respaldo necesario, haciendo con su opinión la base de sostén del experimento.

Al Ing. Msc. Víctor García por su interés especial en el planteamiento, desarrollo y evaluación del experimento.

A la Sra. Ing. Teresa Ruiz por su respaldo, consejo y colaboración efectiva, en cuanto requirió el estudio y mi persona.

A la Sra. Ing. Msc. Magali García por su respaldo y dirección segura que me permitió tomar decisiones acertadas en cuanto al manejo del experimento y análisis de la información y me proporcionó literatura reciente valiosa.

Al Ing. Paulino Ruiz y al Ing. Roberto Miranda por sus valiosas observaciones e interés evaluativo.

A mi compañero y colega Noel Velasco Tamayo. por su respaldo y opiniones.

A admirables y respetables esposos y distinguidos Profesores Alarcón, por su amistad en estima, confirmada en su respaldo permanente y su grata compañía en la Comunidad de Contorno Centro.

A mi Julian Colque por su ayuda oportuna y desinteresada. En quien encontré el amor de un ángel que tomó forma de hombre por el tiempo perfecto. Gracias amigo.

A mis niños de la Escuela de Contorno Centro de quienes recibí el regalo de su alegría y de quienes espero no menos que la victoria.

Y antes que a todos los citados, a mi Señor Jesucristo
Quien merece toda la Honrra, el Honor y Gloria por lo pequeño y lo grande, y por su gran verdad.

Cesar A. Altamirano Bustillos

INDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo general.....	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Hipótesis.....	2
II.	Revisión Bibliográfica.....	3
2.1.	Cambio climático y el agua.....	3
2.2.	Características ecológicas del altiplano boliviano.....	3
2.2.2.	Precipitaciones.....	4
2.2.3.	Radiación.....	4
2.2.4.	Temperaturas.....	4
2.2.5.	Humedad relativa.....	4
2.2.6.	Velocidad del viento.....	5
2.2.7.	Advección y evapotranspiración.....	5
2.2.8.	Agua sub.-superficial como fuente de agua para riego.....	5
2.2.9.	Agroecología del altiplano.....	5
2.3.	Ambientes de invernadero de subsuelo y eficiencia térmica.....	6
2.4.	Ambientes protegidos en el altiplano boliviano.....	6
2.4.1.	Importancia de la producción hortícola en invernaderos en el altiplano boliviano.....	6
2.5.	Camas bajas.....	8
2.5.1.	Origen e importancia de las camas bajas.....	8
2.5.2.	Investigaciones de las camas bajas.....	8
2.6.	Bases teóricas y físicas de parámetros de riego.....	9
2.6.1.	Déficit de humedad del suelo (DHS - SMD).....	9
2.6.2.	Lámina de riego (Zn).....	9
2.6.3.	Estados de humedad del suelo.....	9
2.6.4.	Saturación.....	10
2.6.5.	Capacidad de campo (CC – FC).....	10
2.6.6.	Punto de Marchites Permanente (PMP – WP).....	10
2.6.7.	Estados de energía del agua en el suelo.....	10
2.6.7.1.	Potencial total (Ψ_T).....	10
2.6.7.2.	Potencial gravitacional (Ψ_g).....	11
2.6.7.3.	Potencial matricial o de presión (Ψ_m).....	11
2.6.7.4.	Potencial osmótico (Ψ_o).....	12
2.6.8.	Curva de retención de humedad Van Genuchten.....	12
2.6.9.	Requerimiento de riego neto (Rin).....	13
2.6.10.	Agua disponible total.....	13
2.6.11.	Agua fácilmente disponible (RAW – Readily available water) AFD.....	14
2.6.12.	Depleción hídrica (Dr).....	15
2.6.13.	Déficit permitido de manejo.....	16
2.7.	Bases teóricas para la utilización de lisímetros.....	16
2.7.1.	Cálculo directo de ETC con lisímetros.....	17
2.7.2.	Lisímetros de drenaje libre.....	17
2.7.2.1.	Perturbación del suelo.....	17
2.7.2.2.	Discusión y conclusiones sobre el diseño de lisímetros.....	18
2.7.2.3.	Profundidad de los lisímetros.....	18
2.7.2.4.	Paredes de los lisímetros.....	18
2.7.2.5.	Área de los lisímetros.....	18
2.7.3.	Balace hídrico del suelo.....	19
2.8.	Evapotranspiración.....	20
2.8.1.	Evapotranspiración de cultivo (ETc) en condiciones normales.....	20
2.8.2.	Evapotranspiración de referencia.....	20
2.9.	Factores que afectan la evapotranspiración.....	21
2.9.1.	Factores metereológicos.....	21
2.9.1.1.	Radiación solar.....	22
2.9.1.2.	Temperatura del aire.....	22

2.9.1.3.	Humedad del aire	22
2.9.1.4.	La velocidad del viento	23
2.9.2.	Factores de la especie	23
2.9.2.1.	Variedad y estado de desarrollo	24
2.9.2.2.	Densidad, altura y cobertura (IAF)	24
2.9.2.3.	Rugosidad.....	24
2.9.2.4.	Resistencia estomática (rI)	24
2.9.2.5.	Características radiculares del cultivo	24
2.9.2.6.	Otros factores que influyen en la absorción de agua	26
2.9.3.	Balance de energía	26
2.9.3.1.	Radiación neta (Rn).....	27
2.9.3.2.	Flujo de calor latente (λ ET)	28
2.9.4.	Factores de resistencia de los cultivos	30
2.9.4.1.	Resistencia aerodinámica.....	31
2.9.4.2.	Resistencia estomática.....	31
2.9.5.	Factores del ambiente de invernadero subterráneo	31
2.9.5.1.	Temperatura	31
2.9.5.2.	Humedad relativa.....	32
2.9.5.3.	Velocidad del viento.....	32
2.9.5.4.	Vientos fuertes secos y calientes	32
2.9.6.	Factores del suelo	32
2.9.6.1.	Horizontes duros o impermeables	33
2.9.6.2.	Contenido de agua en el suelo	33
2.9.6.3.	Manejo del suelo.....	33
2.9.6.4.	Manejo y condiciones ambientales.....	33
2.9.6.5.	Evaporación máxima	33
2.10.	La beterraga o remolacha	33
2.10.1.	Variedades de mesa y su importancia	33
2.10.2.	Variedad Dark Red Detroit (tipo globular u ovalado).....	34
2.10.3.	Origen y clasificación.....	34
2.10.4.	Morfología y tipificación	34
2.10.5.	Fisiología y fenología.....	35
2.10.5.1.	Absorción de agua	35
2.10.5.2.	Duración de las fases de crecimiento	35
2.10.6.	Índice de cosecha	36
2.10.7.	Agroecología de la producción de remolacha	36
2.10.8.	Requerimiento de agua de las beterragas de mesa.....	36
III.	Localización	36
IV.	Materiales y Métodos.....	37
4.1.	Localización	37
4.2.	Materiales.....	37
4.2.1.	Equipo e instrumentos utilizados.....	37
4.2.2.	Agua para riego.....	38
4.2.3.	Sustrato de cultivo	38
4.2.3.1.	Retención de humedad :.....	38
4.2.3.2.	Capacidad de campo y humedad gravimétrica instantánea	40
4.3.	Metodología	41
4.3.1.	Diseño experimental.....	43
4.3.2.	Tratamientos.....	44
4.3.3.	Diseño de la estación de Contorno / construcción de Camas Bajas Atemperadas.....	44
4.3.3.1.	Elección de la categoría	44
4.3.3.2.	Orientación de las unidades	45
4.3.3.3.	Instalación de los lisímetros.....	45
4.3.3.4.	Preparación del sustrato	46
4.3.3.5.	Construcción de cubiertas	47
4.3.4.	Labores de cultivo	47
4.3.4.1.	Siembra.....	47
4.3.4.2.	Retiro del mulch y raleo	47

4.3.4.3.	Labores culturales	48
4.3.4.4.	Control de plagas y enfermedades.....	48
4.3.5.	Cosecha	48
4.3.6.	Control ambiental	48
4.3.7.	Metodología de mediciones y registros.....	49
4.3.7.1.	Medición de temperaturas dentro y fuera de las CBAs.....	49
4.3.7.2.	Medición de humedad ambiental.....	50
4.3.7.3.	Medición de la evaporación externa.....	50
4.3.7.4.	Medición de la insolación.....	50
4.3.7.5.	Medición contenido de agua del suelo	50
4.3.7.6.	Medición del potencial matricial.....	51
4.3.8.	Manejo analítico de los parámetros de respuesta	52
4.3.8.1.	Variables de respuesta	52
4.3.8.2.	Balance hídrico	52
4.3.8.3.	Balance de energía.....	52
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
5.1.	Rendimientos.....	53
5.2.	Variables climáticas	54
5.3.	Percolación por lisimetría	60
5.4.	Lámina de riego	61
5.5.	Comportamiento del potencial matricial.....	62
5.6.	Riego neto.....	64
5.7.	Evapotranspiración de cultivo.....	65
5.8.	Balance de agua del suelo	66
5.9.	Balance de energía.....	67
5.10.	Morfología foliar en relación con la limitación de agua.....	68
5.11.	Interrelaciones que influyen en el rendimiento de la planta	69
5.12.	Correlación entre factores que afectan al rendimiento.....	69
5.13.	Interrelaciones que afectan a la Evapotranspiración.....	70
5.14.	Correlación entre factores que afectan la Evapotranspiración.....	70
5.15.	Evaporación tanque clase A vs evapotranspiración de las Camas Bajas Atemperadas.....	70
5.15.	Otros factores	72
VI.	CONCLUSIONES	73
VII.	RECOMENDACIONES.....	75
VIII.	Bibliografía.....	77
IX.	ANEXOS.....	80
	Fotografías	94

Índice de Gráficos

Gráfico 1	Curva de retención de humedad del sustrato.....	40
Gráfico 2	Climadiagrama de la época en la zona (Año 2000)	41
Gráfico 3	Rendimientos por tratamiento y repetición	53
Gráfico 4	Líneas de tendencias de temperaturas máximas.....	54
Gráfico 5	Medias de temperaturas máximas en las fases de cultivo.....	55
Gráfico 6	Líneas de tendencias de temperaturas mínimas.....	56
Gráfico 7	Medias de temperaturas mínimas en las fases de cultivo.....	57
Gráfico 8	Líneas de tendencias de humedades máximas	58
Gráfico 9	Medias de humedades máximas en las fases de cultivo	58
Gráfico 10	Líneas de tendencias de humedades mínimas	59
Gráfico 11	Medias de humedades mínimas en las fases del cultivo.....	59
Gráfico 12	Promedios de percolación (mm / m ²)	60
Gráfico 13	Eventos de percolación	60
Gráfico 14	Frecuencia de riego bruto.....	61
Gráfico 15	Evolución del potencial matricial del tratamiento 1.....	62
Gráfico 16	Evolución del potencial matricial del tratamiento 2.....	63
Gráfico 17	Evolución del potencial matricial del tratamiento 3.....	63
Gráfico 18	Evolución del potencial matricial del tratamiento 4.....	64
Gráfico 19	Riego neto de tratamientos (mm)	64
Gráfico 20	Evapotranspiración de tratamientos (mm).....	65
Gráfico 21	Balance de agua del suelo	67
Gráfico 22	Componentes acumulados del balance de energía de los tratamientos (MJ / m ²)	68
Gráfico 23	Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase inicial	71
Gráfico 24	Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase de desarrollo	71
Gráfico 25	Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase media	72
Gráfico 26	Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase final	72

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1	Déficit de Humedad del Suelo.....	9
Ecuación 2	Lámina de riego	9
Ecuación 3	Potencial Total	11
Ecuación 4	Potencial gravitacional	11
Ecuación 5	Humedad volumétrica en función de la tensión matricial	11
Ecuación 6	Potencial osmótico	12
Ecuación 7	Curva de Retención de Humedad.....	12
Ecuación 8	Humedad Volumétrica.....	13
Ecuación 9	Agua Disponible Total	13
Ecuación 10	Agua Fácilmente Disponible	14
Ecuación 11	Fracción de ADT	15
Ecuación 12	Depleción Hídrica.....	16
Ecuación 13	Déficit Permitido de Manejo	16
Ecuación 14	Depleción hídrica diaria.....	19
Ecuación 15	Evapotranspiración de referencia (Penman Monteith)	21
Ecuación 16	Ecuación de Balance de energía	27
Ecuación 17	Radiación Neta.....	27
Ecuación 18	Flujo de Calor Latente.....	28
Ecuación 19	Pendiente de saturación de vapor	28
Ecuación 20	Densidad del aire atmosférico.....	29
Ecuación 21	Presión media de saturación de vapor	29
Ecuación 22	Presión de vapor	29
Ecuación 23	Presión actual de vapor	29
Ecuación 24	Resistencia aerodinámica.....	30
Ecuación 25	<i>Modelo estadístico</i>	43
Ecuación 26	Balance hídrico adaptado a lisímetros de volumen	52

Índice de Cuadros

Cuadro 1	Líneas de investigación en CBAs del Instituto Benson	8
Cuadro 2	Rangos de máxima depleción en la zona radicular efectiva (Zr), y fracción de agua del suelo que evitaría el estrés (p) en Beterragas de mesa.....	15
Cuadro 3	Valor nutricional de la beterraga.....	34
Cuadro 5	Duración de fases de desarrollo de la Beterraga para varios periodos de siembra y regiones climáticas (en días).	35
Cuadro 6	Componentes químicos del agua de riego	38
Cuadro 7	Valores de humedad del suelo según tensión aplicada	39
Cuadro 8	Parámetros de riego utilizados	41
Cuadro 9	Densidades de Siembra (Criterio de máxima utilización del espacio)	44
Cuadro 10	Rutina diaria de manejo y medición	51
Cuadro 11	Análisis de Varianza de Rendimiento.....	54
Cuadro 12	Análisis de contrastes ortogonales de Rendimientos	54
Cuadro 13	Análisis de Varianza de Percolación	61
Cuadro 14	Análisis de Varianza de Riego Neto.....	65
Cuadro 15	Análisis de contrastes ortogonales de Riego Neto T1	65
Cuadro 16	Análisis de Varianza de Evapotranspiración (mm).....	66
Cuadro 17	Análisis de contrastes ortogonales de Evapotranspiración T2	66
Cuadro 18	Análisis de contrastes ortogonales de Evapotranspiración T2 y T4	66
Cuadro 19	Promedios de peso follaje (peciolos y hojas)	68
Cuadro 20	Análisis de Varianza de componentes de Regresión Rendimiento.....	69
Cuadro 21	Matriz de Correlación.....	69
Cuadro 22	Análisis de Varianza de componentes de Regresión Evapotranspiración.....	70
Cuadro 23	Matriz de Correlación.....	70

Índice de Figuras

Figura 1	Modelos técnicos de invernaderos implementados en Bolivia	7
Figura 2	Componentes del Balance Hídrico.....	20
Figura 3	Efecto de la velocidad del viento en la evapotranspiración en condiciones climáticas secas-calientes (hot-dry) y húmedas-calurosas (humid-warm).....	22
Figura 4	Procesos de absorción radicular de agua en la planta	25
Figura 5	Representación simplificada de la resistencia superficial y aerodinámica al flujo de vapor de agua 30	
Figura 6	Localización del experimento	36

Índice de Anexos

Anexo 1	Lista de materiales del experimento.....	81
Anexo 2	Croquis del Experimento	89
Anexo 3	Diseño del lisímetro de drenaje libre acondicionado al modelo de cama baja atemperada, en cada una de las unidades.	90
Anexo 4	Precipitación registrada en la Estación de IBTEN durante el experimento	91
Anexo 5	Temperaturas (°C) e Insolación (%) dentro de las CBAs.....	92
Anexo 6	Temperaturas registradas dentro las Camas Bajas Atemperadas de los Cuatro Tratamientos	92
Anexo 7	Esquema de Operación de Lisímetro.....	93

Índice de Fotografías

Fotografía 1	Inicio de Excavación (Escuela de Contorno Centro)	95
Fotografía 2	Diseño propuesto de Cama Baja Atemperada	96
Fotografía 3	Estación experimental instalada (etapa de incorporación de abono).....	97
Fotografía 4	Instalación de lisímetros (impermeabilización y drenaje)	98
Fotografía 5	Sistema de Riego y Drenaje	99
Fotografía 6	Composición de Fotografías de Experiencia en la Estación de Letanías (Instituto Benson)	100

RESUMEN

El déficit del recurso agua es una preocupación creciente y es de interés para el estado su eficiente, adecuado e integral aprovechamiento. En este sentido y considerando la oportunidad de evaluar su eficiente utilización para la producción de hortalizas de los agricultores pequeños del altiplano central de Bolivia (área de influencia del Instituto Benson), el Instituto Benson planteo la necesidad de evaluar cual es la demanda de riego para el cultivo de Beterraga de mesa (var. Dark Detroit Red) en Camas Bajas Atemperadas (modelo propuesto), conocido como un cultivo sensible al déficit hídrico y resistente a la presencia de sales en el sustrato. Así también, y en función de contribuir al análisis de los factores que afectan la demanda de riego se planteó como objetivo el evaluar el proceso de evapotranspiración durante el ciclo de cultivo citado considerando que la densidad de siembra (distancia entre surcos y filas) como un factor que afecta el proceso en la época de mayor déficit de agua subterránea en la región del altiplano central, para este fin se planteó y utilizó el método de balance de agua del suelo y el uso de lisímetros de volumen, aplicando el modelo estadístico completamente al azar, cuatro tratamientos (densidades) y tres repeticiones. Así también, en función de los resultados de evapotranspiración del cultivo y la medición de la evaporación de un tanque evaporímetro clase A, se evaluó la factibilidad de su aplicación para la determinación de requerimientos de riego. Los resultados obtenidos permitieron analizar la dinámica microclimática del modelo propuesto, así como evaluar y recomendar mejores técnicas de manejo de los ambientes, consecuentes estudios, y determinar el requerimiento de riego eficiente para las densidades utilizadas. Se analizó también, el comportamiento de las tensiones, habiéndose identificado las tensiones apropiadas los periodos de aplicación y restricción que garanticen mejores rendimientos del cultivo de referencia. Finalmente el estudio permitió evaluar los factores microclimáticos que afectan el proceso evapotranspirativo en el modelo propuesto, así como identificar factores adicionales que influyeron en los mejores rendimientos y en generar las mejores condiciones de producción considerando la densidad de siembra como factor determinante de la evapotranspiración.

I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones ambientales en las que habita el poblador rural del Altiplano Central de Bolivia son extremas y conocidas por las inclemencias y dureza de su impacto en la producción, economía, salud y hábitos de alimentación. Esta condición de vida sumada a la falta de servicios, el cambio climático y los procesos de desertificación que impactan sus ecosistemas, así como la insuficiente asistencia técnica y tecnológica que el estado sustenta, obligan a inferir un futuro de mayores limitaciones, así como de pobreza y por lo tanto mayores demandas de asistencia.

Las Camas Bajas se constituyen, como lo plantean antiguos autores, como el invernadero del pobre. Han sido calificadas, como eficientes, adecuadas y baratas. Construidas para la producción de cultivos horticolas de porte bajo y de alto contenido de nutrientes protectores, así como vitaminas y minerales de difícil producción en las condiciones normales del altiplano boliviano. Sin embargo, el estado boliviano, así como los gobiernos departamentales y locales -de quienes es responsabilidad la investigación aplicada-, no han priorizado su implementación, pese a las ventajas planteadas, previa investigación que permita conocer el comportamiento micro climático e hídrico en todas las alternativas de cultivo posibles. En este sentido, el Instituto Benson, se ha propuesto apoyar iniciativas de investigación que contribuyan al mayor conocimiento de las Camas Bajas Atemperadas, denominadas por esta institución Pankar – huyus.

El empleo de sistemas de lisimetría, tal como señala la FAO (1982), es ampliado, conjuntamente con otros métodos en la determinación del consumo de agua de cultivos bajo condiciones de campo. El presente estudio permitió analizar la dinámica hídrica y energética del modelo propuesto de Cama Baja Atemperada adaptado con doce unidades de lisímetros volumétricos, así como la densidad de siembra apropiada para el cultivo de beterraga (var. de mesa), considerado por el Instituto Benson de importancia para la alimentación y nutrición. Los resultados del presente estudio permitieron probar la eficiencia hídrica y energética de este sistema, es decir, la menor pérdida de agua o consumo, en condiciones de ausencia de estrés hídrico.

Como se describe en la revisión bibliográfica correspondiente, se identifica entre las principales ventajas para la producción, la eficiencia térmica e hídrica de este módulo atemperado (modelo propuesto inicialmente por técnicos de la sede del Instituto Benson del Estado de UTAH - USA), el cual ha sido probado por estudios realizados de manera paralela al presente. Tales estudios analizaron la dinámica hídrica, considerando parcialmente los aportes menores de agua en el sustrato provenientes de horizontes inferiores y contiguos; de manera que, para establecer un modelo hídrico que considere solamente el volumen de control y especificar la dinámica propia del sustrato de la cama baja, fue necesaria la adaptación a su estructura un sistema de lisimetría volumétrica con un cultivo con alta sensibilidad al déficit -como indicador de eficiencia óptima de riego- y de alto valor nutritivo.

Por lo citado anteriormente el presente estudio planteó la Evaluación de la evapotranspiración utilizando lisímetros volumétricos *adaptados al diseño de Camas Bajas Atemperadas (CBAs), considerando la valoración de la evapotranspiración (Etc) de cuatro densidades de siembra de la variedad de mesa Detroit*

dark red, del cultivo de beterraga (Beta vulgaris L.) utilizando el método de balance hídrico, en época de estiaje, para cuyo propósito se evaluó: el requerimiento de riego óptimo para las cuatro densidades de siembra: se identificaron y evaluaron los principales factores climáticos que afectan la evapotranspiración del cultivo, así como se evaluaron los rendimientos de las cuatro densidades de siembra y la utilización del evaporímetro para la determinación y aplicación de riego.

1.1. Objetivo general

Evaluar la evapotranspiración (Etc) de cuatro densidades de siembra del cultivo de Beterraga (Beta vulgaris L. variedad Detroit dark red) utilizando lisímetros volumétricos adaptados al diseño propuesto de Camas Bajas Atemperadas (CBAs) y el método de balance hídrico, en época de estiaje de pozos artesanales del altiplano central.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar los rendimientos de las cuatro densidades de siembra.
- Identificar y evaluar los principales factores climáticos que afectan la evapotranspiración del cultivo (radiación, temperatura, humedad del aire y velocidad del viento).
- Evaluar la utilización del evaporímetro (Tanque Clase A) para la determinación y aplicación de riego para el cultivo de Beterraga y la época de lluvias del altiplano central.
- Evaluar el requerimiento de riego óptimo para el cultivo de Beterraga v. d.d.r. para las diferentes densidades de siembra.
- Evaluar el efecto de las densidades de siembra en la evapotranspiración del cultivo.

1.3. Hipótesis

No existen diferencias en la evapotranspiración de las diferentes densidades de siembra de la Var. d.r.d. de Beterraga en Camas Bajas Atemperadas en época de lluvias en el altiplano central.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cambio climático y el agua

El [Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. ONU / WWAP del año 2003](#), señala que el cambio climático explica aproximadamente un 20% del aumento global de la escasez de agua en los países que ya padecen escasez de agua. Así también, el citado informe en base a estudios realizados por Alcama y Heinrich (2002), haciendo referencia a América Latina señala que existen regiones con alto grado de estrés hídrico, entre ellas el oeste de Bolivia, mencionando también que en estos países en vías de desarrollo - hablando de América Latina-, la existencia de un alto grado de estrés hídrico significa que existe un uso crítico del recurso con altas posibilidades de ocasionar (si no lo ha hecho ya) un deterioro de su calidad y con tendencia a ser insuficiente durante períodos de sequía, concluyendo que este indicativo evidencia la alta competencia existente entre los diferentes usuarios del agua que se intensifica aún mas durante épocas secas. El informe citado, citando a Kabat (2003), señala que todos los modelos de simulación computacional pronostican la intensificación del ciclo hidrológico a escala global es decir:

- *Períodos más cortos de lluvia de mayor intensidad*
- *Períodos de sequía más largos y calurosos.*

Así también, el informe mundial señala que Cosgrove y Rijsberman, (2000), citados por Tanji y Kielen, argumentan que en respuesta al aumento de población del mundo y al desarrollo económico, la tendencia de consumo de agua para uso humano aumentará y se incrementará la competencia por el agua para las necesidades municipales, industriales, agrícolas, ambientales y recreacionales. Si las actuales tendencias de consumo del agua continúan bajo las actuales prácticas y políticas, se estima que en el año 2025 el stress hídrico aumentará en más de 60 por ciento a nivel mundial.

Así también, [Gaita, \(2003\)](#) Director de la Autoridad Binacional del Sistema TDPS, en el Foro Internacional del Agua realizado en Bolivia señaló, que el recurso agua, es cada vez mas escaso tanto en cantidad como en calidad, lo que esta incidiendo en la conservación del medio ambiente y por lo tanto, produce una continua incidencia en la desertificación de la región de América del Sur y en la sostenibilidad de hábitats y especies.

2.2. Características ecológicas del altiplano boliviano

[García \(1999\)](#), señala que las tierras del altiplano boliviano, son difícilmente manejadas y cultivadas; esto por las características de sus suelos, condiciones agroclimáticas y la altitud, lo cual hace que la producción cercana a los 4000 m.s.n.m. sea una compleja interacción de muchos diferentes factores que se deben tener en cuenta.

Frere etal. (1975), citados por [García \(1999\)](#), señalan que el altiplano es barrido por intensos vientos fríos, con un árido clima frío, con amplias diferencias en la temperatura diaria y decrecientes cantidades de precipitación de norte a sur. Promedios altos durante el día de la escala de 15°C a 20°C, pero en el verano tropical soleado, las temperaturas pueden exceder 27°C. Después del anochecer, como siempre, el tenue

aire retiene un poco de calor, y las temperaturas rápidamente descienden justo hasta cerca del congelamiento. Continuando su descripción del altiplano Frere (1975), señala que la zona de convergencia intertropical (ZCIT) influye grandemente la climatología del altiplano, el cual junto con el lago Titicaca determinan la presencia de una intensa gradiente de precipitación y temperatura del área de la región sur. Esto también determina la existencia de la máxima producción agrícola en la parte norte decreciendo hasta casi nada en la parte sur, a pesar de eso toda la región regada es sujeto de importancia a causa de las frecuentes temporadas de sequías en la mitad del periodo de crecimiento.

2.2.2. Precipitaciones

El mismo autor señala que el comportamiento de los patrones de precipitación es monomodal, concentrado en algunos meses del verano. El periodo lluvioso aproximadamente ocurre entre los meses de octubre y abril y es más prolongado en el norte. Estudios realizados en el Sistema hídrico (T.D.P.S.) Titicaca, Desaguadero, Poopó, Salar de Coipasa, indican que las precipitaciones varían en la zona de estudio entre 175 mm a 1125 mm.

2.2.3. Radiación

[García \(1999\)](#), cita que si observamos la fórmula y datos de su estudio relacionado con la corrección para radiación (R_a), la misma puede ser mayor en invierno cuando la insolación es mayor y corta en verano cuando el caso opuesto sucede, como ocurre en el altiplano porque la máxima insolación y la mínima nubosidad ocurren en invierno cuando la ZCIT tiene retraída su influencia. Así también, señala que la radiación neta presenta una fuerte variación del invierno al verano. La diferencia del verano al invierno representa más del 100%, mientras la radiación solar solo presenta 30% de incremento del invierno al verano. Las extremas diferencias entre la radiación neta y la solar son debido a pérdidas elevadas de largas ondas de radiación en invierno principalmente por la baja humedad relativa y la baja nubosidad durante este periodo.

2.2.4. Temperaturas

Reportes del Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios, (1986), indican que se tiene un promedio de hasta 200 días de helada al año. [García \(1999\)](#), señala que la variación en la temperatura media es determinada principalmente por la temperatura mínima, la cual alcanza muy bajos valores en invierno, debajo de cero y con diferencias de 10 °C entre el verano y invierno. La máxima temperatura por el contrario, exhibe diferencias solo arriba de 4 °C entre el verano y el invierno. La amplitud térmica diaria es alta especialmente en invierno con diferencias de 20 °C en el mismo día.

2.2.5. Humedad relativa

[García \(1999\)](#), señala que la humedad relativa tiene también fuertes diferencias entre el verano e invierno. En el invierno es muy baja al medio día alcanzando moderados valores en la mañana. La humedad relativa depende no solo de la humedad atmosférica sino también de la temperatura. El déficit de presión de vapor

(es-ea) es alto en ambos periodos (verano e invierno) con pequeñas diferencias a lo largo del año. Sin embargo altos déficit pueden ser observados durante el invierno.

2.2.6. Velocidad del viento

García (1999), señala que la velocidad del viento es relativamente homogénea durante el año con datos siempre más altos que 2.8 m/s, indica así mismo que los máximos valores se presentan el inicio del periodo de verano cuando el incremento en la temperatura del aire produce movimientos de masas de aire. Típicamente la máxima velocidad el viento ocurre después del medio día, cuando se registra la máxima temperatura.

2.2.7. Advección y evapotranspiración

García (1999), comenta que la influencia de las altas velocidades del viento en Patacamaya (zona representativa del Altiplano) están principalmente relacionadas con los procesos de advección, lo cual como en cualquier región árida es la mayor fuente de energía para incrementos de la Evapotranspiración.

2.2.8. Agua sub.-superficial como fuente de agua para riego

Orsag, (1992) y Ambroggi, 1965 señalan que las fuentes subterráneas son consideradas por diferentes autores con fuentes potenciales para el riego por la formación geológica (materiales permeables) de la zona que favorece la formación de acuíferos con extensas zonas de recarga en las cordilleras que las flanquean. La cantidad explotable excede los 150×10^6 m³/año, que permitiría regar 23.000 a 40.000 hectáreas. Así también, los mismos autores señalan que estudios realizados por NN.UU. (1973) y ORSTOM-SENAMHI (1991), indican que las aguas subterráneas en las cuencas del altiplano norte (Achacachi, Batallas, Pucarani, Catari y Tiwanaku) presentan gran variabilidad química espacial y estacional y por lo tanto se requieren de estudios adicionales más profundos antes de su utilización en proyectos de riego.

2.2.9. Agroecología del altiplano

García (1999), señala que la agricultura de subsistencia en las tierras altas andinas es caracterizada por un alto grado de riesgo debido a los factores climáticos tales como: sequías, heladas, vientos y granizo, alto contenido de sales en el suelo e incrementos en la erosión del suelo, todo lo cual complica el desarrollo y la transferencia de tecnología.

Vacher et al. 1988, Morlon & Vacher, 1991, citados por García, señalan que la alta planicie sureña de Perú y Bolivia (el Altiplano), c. 4000 m.s.n.m. experimenta una reducción de presión de CO₂ del 30 al 50% comparado con el nivel del mar, resultando generalmente en una baja productividad. Así también, Jacobsen, 1998 citado por García, señala que una mayor restricción para la producción de plantas es el déficit de agua de la eco región debido al efecto combinado de bajas precipitaciones, altos valores de evapotranspiración y suelos pobres con una baja capacidad de retención de agua, concluyen señalando que en años secos esto

puede causar considerables reducciones de la producción, conduciendo hacia un déficit de alimento y víveres

2.3. Ambientes de invernadero de subsuelo y eficiencia térmica

Geery (1982), dice que un invernadero puede ofrecer control sobre condiciones ambientales y crear el clima óptimo para las plantas y animales que se quieren desarrollar, comenta que cuando se diseña un invernadero, un amplio rango de controles pueden ser la meta porque muchas plantas tienen diferentes requerimientos ambientales, lo cual permite cambios de decisiones, sobre lo que se quiere producir y cuando, afortunadamente unos cuantos apertores para el aire de afuera, propiamente ubicados, proveerán la mayoría de los controles climáticos deseados, sin embargo existen límites para el control climático.

El mismo autor comenta que en general, un invernadero subterráneo reducirá drásticamente la cantidad de esfuerzo humano y energía física necesaria para producir plantas o animales, debido a que las plantas tienen una amplia tolerancia para el aire húmedo, así mismo señala que el control de humedad puede usualmente ser acompañado con un adecuado sistema respiradero mezclador de aire, finalmente señala que la circulación de aire e ingreso de aire fresco (ambos son importantes) puede ser provistos por adecuados respiraderos y adaptaciones para las inevitables pérdidas de aire caliente.

2.4. Ambientes protegidos en el altiplano boliviano

Instituciones, organizaciones, proyectos y ONG's tuvieron y tienen como propósito el desarrollo de modelos de sistemas protección de cultivos y al mismo tiempo investigan sus sistemas de producción óptimos para luego difundirlos y aplicarlos en las zonas semi-áridas y áridas del Altiplano boliviano.

Blanco et al. (1999) comentan que el objetivo perseguido con la construcción de invernaderos ha sido muy variable de uno a otro proyecto implementado, concluyendo que para la mayoría de las organizaciones de desarrollo, la construcción de invernaderos fue una más de las alternativas tecnológicas incluidas en el abanico institucional ofrecido a los campesinos de su área de influencia, finalmente los autores indican que en todos los casos, el objetivo específico perseguido con su implementación ha estado enmarcado dentro de los objetivos mayores de la institución.

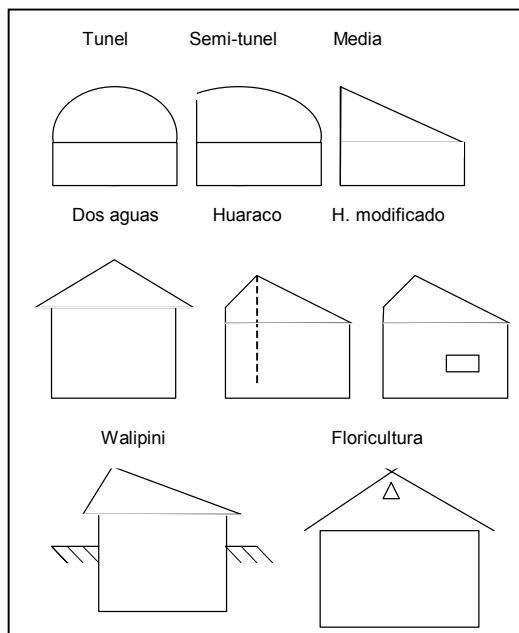
2.4.1. Importancia de la producción hortícola en invernaderos en el altiplano boliviano

Blanco et al. (1999) comentan que el habitante de la región alto-andina mantiene la tradición de trasladarse a otros pisos ecológicos con el fin de intercambiar sus productos y complementar su dieta a través de trueque, compra-venta, o para trabajar como jornalero. Así también, comentan que la cantidad de invernaderos, de campesinos y de instituciones involucradas en su construcción, creció significativamente desde el inicio de su promoción durante a década de los 80, dicha tecnología se adaptó y difundió, en algunos casos se adaptó y se hizo funcional y en otros casos, desapareció tan rápidamente como apareció, y en otros, hasta llegó a sustituir al sistema tradicional de producción. Los mismos autores señalan que en la actualidad el panorama de los invernaderos en Bolivia es muy complejo y se estima que existe una superficie de 200.000

m² con invernaderos en uso para campesinos, con una cantidad de invernaderos implementados sorprendente, muchos de ellos construidos en los valles altos y serranías de Cochabamba y de norte de Potosí, lugares con inviernos muy fríos y prolongados, secos casi durante todo el año.

Así también, [Blanco et al. \(1999\)](#), señalan que, si bien algunas entidades ejecutoras de proyectos de invernaderos en Bolivia buscaron impactos en la vida económica o social de los beneficiarios, otras utilizaron la propuesta tecnológica como un instrumento más para atraer a la población hacia sus corrientes religiosas o políticas y que una de las hipótesis básicas para promover la introducción de la tecnología de invernaderos en la región alto andina de nuestro país, es que la dieta alimenticia de sus pobladores es deficitaria (en calidad y cantidad), de modo que existen elevados niveles de desnutrición. Así muchas organizaciones de desarrollo y de tipo asistencialista han promovido la construcción de invernaderos destinados a la producción destinados a la producción de alimentos para las familias campesinas. El tipo de invernaderos “de pan llevar” (Camas Bajas) ha sido privilegiado por instituciones como: Fundación contra el hambre, la Congregación Jesús María, la Misión Alianza Noruega y el Instituto Benson.

Figura 1 Modelos técnicos de invernaderos implementados en Bolivia



Fuente: ECOTOP – 1999

[Blanco et al. \(1999\)](#) señalan también que la tecnología de protección de cultivos implementada en nuestro país, se ha basado en la adaptación de diferentes modelos de invernaderos a las condiciones climáticas y socio-económicas locales, resultando varios tipos de invernaderos que se repiten con mayor o menor frecuencia en los proyectos implementados en la zona de estudio, finalmente señalan que los modelos de campanas de plástico (polietileno), túneles (agrofilm), carpas solares (agrofilm), invernaderos (vidrio y agrofilm), walipinis (agrofilm) y camas protegidas, son los modelos de mayor interés en la investigación y en su adopción, último modelo objeto de interés del presente estudio, denominadas también, camas calientes, camas bajas, camas bajas orgánicas, camas protegidas o simplemente camas.

2.5. Camas bajas

2.5.1. Origen e importancia de las camas bajas

Raymond (1991), sostiene que las camas calientes, se utilizaban en la antigua Roma para proteger y producir hortalizas que no eran sembradas directamente en el huerto, señala también, que posteriormente se conocieron con el nombre de invernadero del pobre.

Ruiz (1996), describe a la cama baja como un espacio reducido de adaptabilidad y producción de hortalizas de porte bajo para lograr mejores rendimientos en climas templados y fríos, así también, Monrroy (1996), considera a las camas protegidas como una alternativa potencial, para garantizar la producción de tubérculo semilla de papa, dirigida a los agricultores que normalmente no tienen acceso a semilla sana y además se encuentran en zonas donde las condiciones climáticas de heladas y sequías constituyen un impedimento en la producción de papa.

2.5.2. Investigaciones de las camas bajas

Monrroy, (1999), señala que ésta alternativa tecnológica fue adaptada a nuestro medio, por el Centro de Servicios Múltiples de Tecnologías Apropriadas (SEMTA), inicialmente usada para la producción de hortalizas y luego para la producción de papa de consumo. Posteriormente en 1985 el Programa de Investigación de la papa (PROIMPA), dio inicio a un proyecto de producción de semilla de papa en camas protegidas en el altiplano central de La Paz. Sin embargo, mucho antes el Sr. Iseli, (1991), citado por Hartman demuestra en su granja Ventilla (altiplano central), la factibilidad técnica de producir diversas hortalizas en camas bajas orgánicas, así también Hartmann (1991), hace mención señalando que las camas protegidas pueden tener doble propósito de producción, el primero como almaciguera de papa y el segundo como medio atemperado de producción de hortalizas *durante el año*, debido: al uso intensivo del espacio, la creación de un microclima favorable y el medio orgánico de cultivo que tienen las camas protegidas. Al respecto Monrroy (1999), haciendo referencia a un estudio realizado por SEMTA el año 1993, sostiene que el uso intensivo de una pequeña extensión (15 m²) de terreno, proporciona un microclima que ayuda a mantener húmeda la tierra y mejorar poco a poco la calidad de la misma, cuyo substrato orgánico incorporado facilita el desarrollo de micro-organismos, los que mejoran la textura y la estructura del suelo, en beneficio del cultivo. Altamirano (1998), describo mi experiencia en el inicio de la aplicación de un modelo de cama baja protegida denominada por el Instituto Benson Pankar-huyu (Ver Anexos), que es una adaptación según el Dr. Jhonston y Cortez, 1997 de camas bajas y walipinis, señalando que con la experiencia del caso y las conclusiones de; Sr. Iseli, Hartmann y Jhonston, SEMTA y PROIMPA, el Instituto Benson identificó dos líneas y sublíneas de investigación centrales previas, para la aplicación de un modelo de cama baja protegida, que son de acuerdo a la tabla siguiente:

Cuadro 1 Líneas de investigación en CBAs del Instituto Benson

1. Diseño adecuado (dimensiones mínimas y óptimas)
2. Manejo:

Sub-líneas	Objetivos
i. Régimen aerodinámico	<i>Factibilidad de producción en todo el año</i>
ii. Especies y variedades de hortalizas	<i>Diversificar la dieta y mejorar la nutrición del campesino del altiplano boliviano</i>
iii. Densidades de plantación	<i>Maximizar la producción y la productividad</i>
iv. Requerimiento de riego neto	<i>Economizar el recurso agua</i>
v. Salinización del sustrato	<i>Evaluar su efecto en el tiempo</i>

Fuente: Elaboración propia, 2001

2.6. Bases teóricas y físicas de parámetros de riego

2.6.1. Déficit de humedad del suelo (DHS - SMD)

Chipana (1996), señala que el Déficit de Humedad del Suelo conocido en inglés como Soil Moisture Deficit – SMD, es la diferencia de humedad del suelo a Capacidad de Campo y cualquier instante i:

$$DHS = (H_{v_{cc}} - H_{v_i})Z_r \quad (01)$$

Donde:

DHS = Déficit de Humedad del Suelo (mm)

$H_{v_{cc}}$ = contenido volumétrico de humedad del suelo a capacidad de campo. (m^3 / m^3)

H_{v_i} = contenido volumétrico de humedad del suelo a un instante i. (m^3 / m^3)

Z_r = es la profundidad radicular efectiva (m)

2.6.2. Lámina de riego (Zn)

Chipana (1996), menciona que una expresión muy empleada en los proyectos de riego es la lámina neta de riego (Zn), que no es otra cosa que el Déficit Permitido de Manejo, es decir:

$$Zn = ADT \times \rho = DPM \quad (02)$$

2.6.3. Estados de humedad del suelo

Chipana (1996), menciona que el agua en el suelo es retenida por las fuerzas de adsorción y cohesión y por el fenómeno de capilaridad, indica también que, la polaridad de las moléculas de agua permiten la adhesión entre las moléculas de agua y las partículas sólidas del suelo, sobre todo las arcillas y que las cargas negativas que existen en las superficies de las micelas arcillosas se unen al polo positivo de la molécula de agua, finalmente que el fenómeno de retención de agua dio lugar a categorías de agua en el suelo y que son:

- Agua gravitacional = agua fácilmente drenada por las fuerzas de gravedad (2 a 3 días)
- Agua capilar = agua que queda en el suelo después del drenaje rápido (disponible para las plantas)
- Agua higroscópica = agua adherida a la superficie de las partículas del suelo (no disponible para las plantas)

2.6.4. Saturación

Chipana (1996), indica que el suelo está saturado cuando todos sus poros están llenos de agua y el contenido de agua del suelo ha sobrepasado el valor de capacidad de campo.

2.6.5. Capacidad de campo (CC – FC)

Allen et al. (1998), definen la capacidad de campo como la cantidad de agua que puede ser sostenida por el suelo luego de un buen drenaje, o la cantidad de agua remanente cuando el drenaje ha disminuido marcadamente.

2.6.6. Punto de Marchites Permanente (PMP – WP)

Allen et al. (1998), señalan que en ausencia de suplemento de agua, el contenido de agua en la zona radicular disminuye como resultado de la absorción del cultivo, señalan también que si la absorción del agua continua, el agua remanente es sostenida con gran fuerza por las partículas del suelo y disminuye el potencial energético y hace más difícil para la planta su extracción. Indican también que eventualmente, se alcanza un punto donde el cultivo no puede extraer el agua remanente este punto es conocido como punto de marchites permanente. El punto de marchites es la cantidad de agua que contiene el suelo al cual las plantas se marchitan permanentemente, es decir, no recuperan vida.

2.6.7. Estados de energía del agua en el suelo

Chipana (1996), señala que el agua del suelo, así como cualquier cuerpo de la naturaleza puede ser caracterizado por un estado de energía. Así también la física clásica reconoce dos tipos principales de energía, la cinética y la potencial, como el movimiento del agua dentro del es muy bajo, la energía cinética es despreciable ya que es proporcional al cuadrado de su velocidad; la energía potencial que es función de la posición y condición que interna del agua es de gran importancia en la caracterización de su estado de energía. El mismo autor señala que este estado de energía es descrito por la función termodinámica energía libre de Gibbs, siendo que las diferencias de potencial del agua entre diferentes puntos dan origen a su movimiento.

2.6.7.1. Potencial total (Ψ_T)

Chipana (1996) y Hillel (1998), también señalan que el potencial total es la suma de las contribuciones de trabajos realizados, expresados en los siguientes factores, cuando la unidad de masa (volumen o peso) del

agua en el estado padrón es llevada isotérmica, isobárica y reversiblemente para el estado considerado en el suelo (ver ecuación 3).

$$\Psi_T = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \dots \quad (03)$$

2.6.7.2. Potencial gravitacional (Ψ_g)

Hillel (1998), explica que todo cuerpo en la superficie de la tierra es atraído hacia el centro por una fuerza gravitacional igual al peso del mismo, ese peso es el producto de la masa por la aceleración de la gravedad. A una altura z encima del nivel de referencia la energía potencial gravitacional por unidad de volumen es:

$$\Psi_g = \rho_w * g * z \quad (04)$$

Donde :

- ρ_w = peso específico del agua
- g = es la aceleración de la gravedad
- z = es la diferencia de alturas con un nivel de referencia cualquiera

2.6.7.3. Potencial matricial o de presión (Ψ_m)

Chipana (1996) y Chilon (1998), indican que este potencial es el resultado de las fuerzas capilares y de adsorción que surgen debido a la interacción entre el agua y las partículas sólidas (matriz del suelo), estas fuerzas atraen y retienen el agua en el suelo, disminuyendo su energía potencial. Así también, señalan al igual que otros autores, entre ellos autores de la FAO, que en la práctica es medido con tensiómetros; como es de apreciar, desde el punto de vista del riego es el potencial de mayor importancia pues nos permite determinar el momento de riego y con apoyo de la curva de retención de humedad, la cantidad de agua a aplicar.

La presión o potencial de humedad del suelo, llamada antiguamente como capilaridad potencial, se denomina ahora potencial matricial que resulta de la interacción de fuerzas capilares y de adsorción entre el agua y la matriz del suelo.

Respecto a las características individuales para cada suelo, Velasco (2001), citando a Chipana (1996), indica la formula de Van Genuchten quién desarrolló una ecuación empírica de la curva entera considerando a la humedad volumétrica en función de la tensión matricial:

$$\theta_i = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \psi_i)^n]^m} + \gamma_i \quad (05)$$

Donde:

ψ_i es el potencial matricial instantáneo; α , n , y m son parámetros empíricos hallándose en base a un programa de regresión no lineal;

γ_i es el i -ésimo valor asociado a la estimación de i -ésimo valor de humedad, que se desprecia;

θ_i es el i -ésimo valor de humedad volumétrica correspondiente al i -ésimo valor del módulo de potencial matricial ψ_i ;

θ_r humedad residual (humedad del suelo seco), que generalmente corresponde a una tensión de -15 atm; y

θ_s es la humedad a saturación

2.6.7.4. Potencial osmótico (Ψ_o)

Chipana (1996), señala que este factor en el suelo, es de difícil determinación, sin embargo, se han desarrollado instrumentos especiales para su medición. El mismo autor señala también, que dicho potencial varía con la humedad, así también cuando la concentración salina es alta, por lo tanto asume la siguiente expresión:

$$\psi_{oi} = -36CE \left(\frac{\%P}{H} \right) \quad (06)$$

Donde: %P = porosidad total del suelo (%)

H = humedad del suelo en el estado considerado ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$)

CE = conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (mmhos / cm)

2.6.8. Curva de retención de humedad Van Genuchten

Hillel (1998), señala que no existe una teoría universal para predecir la succión vs. la humedad, razón por la que varias fórmulas empíricas han sido desarrolladas, entre ellas, Chipana (1996), indica que Van Genuchten (1980) desarrolló una ecuación empírica que describe la curva entera y que se expresa en un gráfico que relaciona el potencial matricial con la humedad, con los siguientes criterios (i) de que cuando el potencial matricial del suelo es igual a cero, entonces la humedad volumétrica está en estado de saturación (ii) dicha función es decreciente y asintótica al valor correspondiente de la humedad residual (iii) inexistencia del punto de inflexión (i) así como la inexistencia del punto de inflexión en su trazo.

$$Hi = Hr + \frac{Hs - Hr}{[1 + [\alpha + \psi]^n]^m} + \gamma_i \quad (07)$$

Donde:

ψ_i = potencial matricial instantáneo;

α, m, n = son parámetros empíricos, estimados en base a un análisis de regresión no lineal

γ_i = es el i-ésimo valor asociado a la estimación del i-ésimo valor de humedad, que generalmente se desprecia.

H_i = i-ésimo valor de humedad volumétrica correspondiente al i-ésimo valor del módulo de potencial matricial ψ_i

H_r = humedad residual (suelo seco), que generalmente corresponde a una tensión de $-15 \text{ atm (cm}^3 / \text{cm}^3)$

H_s = humedad a saturación

2.6.9. Requerimiento de riego neto (Rin)

El documento de [N° 24 de FAO](#) define al requerimiento de riego como *la cantidad de agua que puede ser suplida para las plantas para prevenir el stress y la reducción de la producción*. El mismo documento, señala que el requerimiento neto de riego para cualquier cultivo es *aquella cantidad de agua obtenida por la sustracción de las ganancias y de las pérdidas en el sistema agua-suelo*, parte del requerimiento de agua es cubierto por la precipitación, agua de la tierra (riego) y agua acumulada en el suelo, las cuales pueden ser concebidas como ganancias, las pérdidas son principalmente por la evapotranspiración de cultivo o requerimientos de agua del cultivo (ETc)

En base a volumen (θ) o humedad volumétrica:

$$H_v = 100 (V_a / V_t) \% \quad (08)$$

Donde:

V_t = (volumen de suelo) + (volumen de agua) + (volumen de aire) = volumen total (m^3 / m^3)

V_a = volumen de agua (m^3 / m^3)

2.6.10. Agua disponible total

La humedad aprovechable total, también llamada “agua disponible total” es la fracción del contenido total de agua de un suelo que, teóricamente, puede ser empleada por la planta y corresponde a la diferencia, en contenido volumétrico, entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchites permanente (PMP). [Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith \(1998\) y Chipana \(1996\)](#), indican que el contenido de ADT del suelo puede ser determinado por medio de la siguiente fórmula:

$$ADT = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * Z_r \quad (09)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \text{ADT} &= \text{Agua Disponible Total (mm)} \\ \theta_{cc} &= \text{es la humedad volumétrica a capacidad de campo (m}^3 / \text{m}^3) \\ \theta_{pmp} &= \text{es la humedad volumétrica al punto de marchites permanente (m}^3 / \text{m}^3) \\ Z_r = P_r &= \text{es la profundidad radicular efectiva (m)} \end{aligned}$$

Singer (1996), Hillel (1998), Allen (1998) y otros, señalan que la CC es el contenido porcentual de agua que un suelo tiene después que el agua ha drenado lo suficiente; señalan también que en el estado de saturación, el agua puede fluir muy rápidamente fuera del suelo a través de sus poros más grandes, de manera que solo parte de ella se queda y puede ser útil para la planta; esto sucede hasta llegar a un punto cuando la mayor parte de los poros grandes se vacían haciéndose el flujo de agua muy lento. La definición clásica de Capacidad de Campo, dada por Veihmer y Hendrickson en 1952 citados por Hillel (1998), es que “la cantidad de agua retenida en un suelo después de que el exceso de agua ha drenado y la tasa de movimiento hacia abajo ha decrecido materialmente, lo cual usualmente tiene lugar dentro de 2 a 3 días después de lluvia o irrigación en suelos de textura y estructura uniformes. Finalmente los autores señalan que el ADT es la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de la zona radicular, que depende del tipo de suelo y la profundidad de las raíces.

2.6.11. Agua fácilmente disponible (RAW – Readily available water) AFD

Allen, et al. (1998), señalan que, teóricamente el agua está disponible a partir del PMP y que la absorción es reducida ya antes de alcanzar dicho punto, mencionan también, que cuando el suelo esta suficientemente húmedo, el suelo sule rápidamente agua para compensar la demanda atmosférica del cultivo y la absorción de agua es igual que la ETc. Sin embargo, como el contenido de agua disminuye, el agua es retenida más fuertemente por la matriz del suelo y es más difícil extraerla. Cuando el contenido de agua en el suelo está por debajo de un punto que no puede ser transportada en cantidad suficiente y fácilmente para responder a la demanda de transpiración, la zona radicular experimenta stress. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer desde la zona radicular sin que experimente stress es el agua fácilmente disponible.

$$AFD = ADT \times \rho \quad (10)$$

Donde :

$$\begin{aligned} \text{RAW} = \text{AFD} &= \text{Agua Fácilmente Disponible (mm)} \\ \rho &= \text{fracción promedio de ADT que puede ser depletada de la zona radicular} \\ &\quad \text{antes de experimentar estrés hídrico (reducción en la ET)}^1 \end{aligned}$$

Sin embargo, expresar la tolerancia de los cultivos al stress hídrico como una función de la fracción (ρ) de ADT no es totalmente correcto, este valor depende del tipo de suelo, para suelos arcillosos disminuye del 5 al 10% y para suelos arenosos puede incrementarse del 5 al 10%. El documento 56 de la FAO indica que para el cultivo de Beterraga de mesa la fracción de agua depletada para que no ocurra stress hídrico se

¹ Este factor difiere de un cultivo a otro. El factor ρ varía normalmente de 0.3 para zonas radiculares poco profundas y altos valores de ETc (> 8 mm / día) a 0.7 para zonas radiculares profundas y valores bajos de ETc (< 3 mm / día). Un valor de 0.5 para ρ es comúnmente usado para muchos cultivos).

aproxima a un valor de 0.5. Así también, este documento indica, que dicho valor se aplica si la ETc es equivalente a 5 mm/día, en caso de no ser registrarse un valor diferente, dicha fracción puede expresarse aplicando la siguiente relación:

$$\rho(\text{ajustado}) = \rho(\text{tabla}) + 0.04(5 - ETc) \quad (11)$$

Cuadro 2 Rangos de máxima depleción en la zona radicular efectiva (Zr), y fracción de agua del suelo que evitaría el estrés (p) en Beterragas de mesa

Crop	Maximum Root Depth ¹ (m)	Depletion Fraction ² (for ET ≈ 5 mm/day) p
d. Roots and Tubers		
Beets, table	0.6-1.0	0.50

Fuente: Allen et al. (1998)

En el mismo documento, se señala que las remolachas azucareras experimentan frecuentemente en los climas áridos al final de la tarde un estrés, en que se marchitan con valores de $\rho < 0.55$, normalmente solo existe un impacto en los rendimientos de azúcar.

Vacher J. en su estudio de ETP en el altiplano boliviano, señalan que la ETP muestra un máximo en diciembre y un mínimo en junio, siguiendo principalmente la evolución de la Radiación Neta. La amplitud de estas variaciones estacionales al nivel mensual son reducidas alcanzando valores de 1.7 mm, 2.49 mm para Viacha. El máximo diario de la ETP en Viacha es de 3.73. Así también, afirman que los resultados obtenidos confirman los promedios calculados sobre 5 años.

2.6.12. Depleción hídrica (Dr)

Merriam citado por Allen et al. (1998), introduce el término de Vaciamiento de Manejo Permitido (VMP) señalando que es un nivel mayor que el contenido del agua fácilmente disponible, donde el estrés de humedad es intencionalmente provocada en el manejo del suelo. Así también, se enfatiza en que dicho parámetro, esta determinado por el manejo utilizado, los factores económicos y la suma de factores físicos que generalmente influyen en la producción bajo riego.

Allen et al. (1998), señalan que la depleción hídrica es un parámetro que se utiliza frecuentemente para expresar el contenido de agua en la zona radicular. Es decir que el contenido de agua puede ser expresado por el VMP, siendo que cuando el suelo alcanza la capacidad de campo el VMP es igual a cero ($Dr = 0$). Así también, señalan que cuando el agua del suelo es extraída por evapotranspiración, el vaciamiento o depleción incrementa y si el estrés es inducido, el VMP asume un valor equivalente a RAW o AFD, y cuando el valor de VMP excede al AFD, hasta un limite menor que los valores potenciales de evapotranspiración, la ETc comienza a disminuir en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radicular. En el momento que el VMP alcanza el PMP, no ocurre evapotranspiración.

Richard *etal.* (1998), indican que el contenido de agua a nivel del suelo radicular, puede expresarse por medio de la depleción hídrica de esa zona, D_r , que es la disminución de agua en relación a la capacidad de campo, los autores señalan que cuando el suelo está a capacidad de campo, la depleción es cero ($D_r = 0$); cuando el agua es extraída por evapotranspiración la depleción se incrementa y cuando D_r llega a igualar al DPM, el estrés hídrico será inducido. Finalmente indican que la depleción puede ser determinada por medio de la siguiente expresión:

$$D_{r,i} = 1000(\theta_{fc} - \theta_i)Z_r \quad (12)$$

Donde :

D_r es la depleción hídrica (m^3 / m^3)
 Z_r es la profundidad radicular efectiva (m)

El máximo valor de vaciamiento de tablas para Beterraga de mesa expresado en metros se estima se encuentra en un rango de 0.6-1.0, a profundidad radicular efectiva, considerando el suelo no limita el desarrollo radicular, ni restringe el vaciamiento o depleción (Z_r), al respecto *Allen et al.* (1998), señalan que valores menores pueden ser utilizados para planes de riego y valores altos para modelos de riego que fijen valores altos de tensión (stress hídrico) o para condiciones lluviosas.

2.6.13. Déficit permitido de manejo

Allen et al. (1998), señalan que, como la cantidad de agua sobre la capacidad de campo no es retenida por la fuerza de gravedad y esta drenará, así también como la cantidad de agua debajo el punto de marchites permanente no puede ser extraída por las raíces de las plantas, el agua total disponible del suelo en la zona radicular, es la diferencia entre la cantidad de agua a capacidad de campo y el punto de marchites permanente:

$$DPM = p \times ADT \quad (13)$$

Donde:

DPM = Déficit Permitido de Manejo

p = es el factor p representa la fracción media del ADT que puede ser depletada de la zona radicular sin provocar estrés. Este factor difiere de cultivo a cultivo, y generalmente es alrededor de 0.30, para plantas con sistema radicular pequeño.

2.7. Bases teóricas para la utilización de lisímetros

El documento [56 de la FAO](#) confirma que la evapotranspiración puede ser determinada midiendo los varios componentes del balance de agua del suelo, evaluando las entradas y salidas del flujo de agua en la zona radicular del cultivo en el mismo periodo de tiempo, insolando la zona radicular de cultivo de los lisímetros y controlando los procesos que son de difícil medición, los diferentes términos en la ecuación de balance de

agua del suelo pueden ser determinada con gran precisión. El mismo documento señala que esta es la ventaja en lisímetros cuando los cultivos crecen en recipientes insolados llenados con suelos alterados o no alterados. Así también Hillel, citando a van Badel y Myers, 1962; Hanks y Aschcreef, 1965; Harvold, 1966; Pené et al., 1989, señala que el método más directo para medir el balance de agua del suelo es el uso de lisímetros.

2.7.1. Cálculo directo de ETc con lisímetros

El documento [39 de la FAO en 1982](#) señala que los lisímetros son herramientas indispensables en los estudios de la relación agua-suelo-planta-atmósfera, en la planificación de los proyectos y sistemas de riego y en la práctica del manejo de agua en la finca, así también el mismo documento de la FAO 39 señala que en las regiones áridas y semiáridas los estimativos de ETo, utilizando ecuaciones patrones desarrolladas en otros lugares frecuentemente resultan inapropiadas y se hace necesario, por lo tanto, recurrir a determinaciones confiables directamente obtenidas de lisímetros. De igual manera muchos autores concuerdan que el valor de evapotranspiración para una superficie cultivada puede ser directamente medido por los métodos de transferencia de masa o de balance de energía, esto puede también ser derivado de estudios de balance de agua del suelo determinado para campos cultivados o mejor desde lisímetros.

[Richard et al. \(1998\)](#), mencionan que los lisímetros son difíciles y caros para construir y como las operaciones y el mantenimiento requiere especial cuidado, su uso es limitado para propósitos de investigaciones específicas. Así también, señalan que los lisímetros son herramientas indispensables para comprobar las ecuaciones de evapotranspiración, la instrumentación para la razón de Bowen, los modelos de suelo y cultivos, y nuevos dispositivos para medir la evapotranspiración. Por lo tanto, en los estudios de la demanda de agua por los cultivos, es recomendable instalar lisímetros de precisión en estaciones experimentales especializadas y simples lisímetros de drenaje en las principales estaciones meteorológicas.

2.7.2. Lisímetros de drenaje libre

El documento [39 de la FAO en 1982](#) señala que tal como su nombre lo indica, el agua en estos lisímetros drena libremente hacia la atmósfera o hacia un medio poroso, generalmente grava o arena, ubicado en la base de la masa de suelo. Debido a la ausencia de tensión en el fondo, ellos han sido también llamados lisímetros de “cero tensión o presión”, en lisímetros que no son de pesaje la evaporación para un periodo dado de tiempo es determinada deduciendo el agua de drenaje, colectada en el fondo de los lisímetros, a causa del total del agua ingresada.

2.7.2.1. Perturbación del suelo

El boletín [39 de la FAO \(1982\)](#), señala que el efecto de la perturbación del suelo en los estudios de consumo de agua por los cultivos no trae consigo mayores problemas siempre y cuando, estas perturbaciones no afecten el desarrollo normal de los cultivos, el mismo documento señala que dicho efecto puede ser reducido por medio de riegos frecuentes, para mantener una baja tensión de agua, así también, controlando el

crecimiento de las plantas para limitar las diferencias de desarrollo entre ellas. El citado boletín señala que gran parte de los lisímetros de renombre mundial son de relleno y aún continúan produciendo datos confiables para estudios de evapotranspiración, demanda de agua de los cultivos y programación de riegos.

2.7.2.2. Discusión y conclusiones sobre el diseño de lisímetros

La FAO señala, citando a Chang (1968), que deben dar énfasis a los siguientes cuatro requisitos de diseño y operación de los lisímetros para obtener datos confiables de evapotranspiración de cultivos a sin protección:

- a. Deben ser suficientemente grandes y profundos para reducir el efecto de los límites y restricciones al desarrollo radicular.
- b. Las condiciones físicas deben ser similares a las de fuera.
- c. La altura, densidad y distribución de las plantas deben ser similares a las de fuera.
- d. El área de borde debe ser suficientemente grande.

2.7.2.3. Profundidad de los lisímetros

El boletín [39 de la FAO \(1982\)](#), señala que los lisímetros con suelo de textura fina deben ser más profundos que los lisímetros con suelo de textura gruesa, que la profundidad del lisímetro. Así también señala en relación con la presencia o ausencia de un control de la tensión de agua en el suelo, que es un factor de importancia relacionado con la perturbación del suelo; tanto en lisímetros monolíticos como en los de relleno. Y además señala, que la profundidad de estos, debe ser suficiente para crear condiciones de agua representativas a las del campo, en sus primeros 30 o 40 cm.

2.7.2.4. Paredes de los lisímetros

El boletín [39 de la FAO \(1982\)](#), señala que para los lisímetros con plástico el espesor de las paredes es despreciable en relación al área del suelo; el área y naturaleza de la sección pared-espacio-pared afectan en cierto grado el intercambio térmico entre la masa de suelo en el lisímetro y el suelo circundante así como también, la interceptación y disipación de la energía solar. Señala también que la evapotranspiración puede estar afectada, además, por restricción de raíces, diferencias en el suelo y transmisión no representativa de calor en las paredes. Por otro lado indica que los cambios en la transmisión de calor pueden afectar el movimiento de agua en el suelo en proporción a la distorsión de flujo de calor.

2.7.2.5. Área de los lisímetros

El boletín [39 de la FAO \(1982\)](#), relata que en el Líbano luego de experimentar con diferentes tipos de lisímetros y recabar información acerca de la superficie adecuada para los mismos, se concluyó que los lisímetros de drenaje de 4 m² proporcionan valores concordantes con los lisímetros pesantes de precisión de 16 m², siendo las diferencias únicamente entre el 1 y 2 por ciento. Mientras que lisímetros de 4 m² son adecuados para plantas de alta densidad como césped, trigo, y verduras, lisímetros mucho más grandes

(50m²), son necesarios para cultivos espaciados, como el banano, para acomodar un número suficiente de plantas. Como conclusión los lisímetros de 4 m² pueden ser recomendados para determinar la evapotranspiración de céspedes y de gran parte de otros cultivos, siempre y cuando, la sección pared sea relativamente pequeña.

2.7.3. Balance hídrico del suelo

Allen et al. (1998), confirman que la evapotranspiración puede ser determinada midiendo los varios componentes del balance de agua del suelo. El concepto básico es simplemente una declaración del principio de conservación de masa.

Dicho documento explica que el método consiste en evaluar las entradas y salidas del flujo de agua en la zona radicular del cultivo en el mismo periodo de tiempo. Así también, señala que insolando la zona de cultivo de los lisímetros y controlando los procesos, los diferentes términos en la ecuación de balance de agua del suelo pueden ser determinados con gran precisión, indicando que esta es una ventaja en lisímetros cuando los cultivos crecen en insolados recipientes llenados con suelos alterados o no alterados. La evaporación del suelo, la transpiración del cultivo y la precolación, disminuyen el contenido de agua de la zona radicular e incrementan la depleción, entonces el balance de agua expresado en términos de depleción al final del día será:

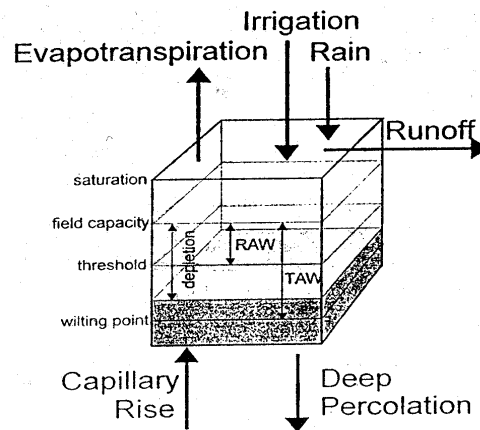
$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (14)$$

Donde:

- $D_{r,i}$ es la depleción de la zona radicular al final del día i; [mm]
- $D_{r,i-1}$ contenido de agua en la zona radicular al final del día previo, i-1; [mm]
- P_i precipitación del día i; [mm]
- RO_i escorrentía superficial del día i; [mm]
- I_i irrigación neta del día I que infiltra totalmente en el suelo; [mm]
- CR_i ascensión capilar de la capa freática en el día i; [mm]
- ET_c evapotranspiración del día i; y [mm]
- DP_i es la percolación profunda del día i. [mm]

La precipitación pluvial, irrigación y ascensión capilar agregan agua y disminuyen la depleción. La evaporación del suelo, la transpiración de la planta, la precolación y la escorrentía superficial remueven el agua e incrementan la depleción. El balance hídrico diario, expresado en términos de depleción para el final de un día esta dado por:

Figura 2 Componentes del Balance Hídrico



2.8. Evapotranspiración

Allen et al. (1998), señalan que el valor de evapotranspiración es normalmente expresada en milímetros (mm) por unidad de tiempo. El valor expresa la cantidad de agua que es perdida desde la superficie de cultivo en unidades de depleción de agua. Las unidades de tiempo, pueden ser horas, días, décadas, meses, el periodo completo de crecimiento o años. Los mismos autores de igual forma señalan que muchos autores concuerdan que el valor de evapotranspiración para una superficie cultivada puede ser directamente medido por los métodos de transferencia de masa o de balance de energía y que esto puede también ser derivado de estudios de balance de agua del suelo determinado para campos cultivados o mejor desde lisímetros.

2.8.1. Evapotranspiración de cultivo (ET_c) en condiciones normales

La [FAO en 1998](#) la define la evapotranspiración bajo condiciones normales, denotado como ET_c, a la evapotranspiración (demanda evaporativa) de un cultivo libre de enfermedades, bien fertilizado, desarrollado en largos campos, bajo óptimas condiciones de agua en el suelo, excelente manejo y condiciones ambientales y una activa y completa producción bajo condiciones climáticas dadas.

Cuando las condiciones del terreno cultivado difieren de las condiciones normales, factores de corrección son requeridos para ajustar ET_c. Los ajustes reflejan el efecto en la evapotranspiración de las condiciones ambientales y de manejo en los terrenos cultivados.

2.8.2. Evapotranspiración de referencia

La cantidad de Evapotranspiración, no limitada en agua, es llamada evapotranspiración de cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia (ET_o). Esta superficie de referencia es un cultivo de césped con características específicas. En este sentido el método FAO Penman-Monteith es el único recomendado. Se basa en parámetros físicos y explícitamente incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos ([Allen et al. 1998](#)). La fórmula matemática es:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (15)$$

Donde:

- ET_o es la evapotranspiración de referencia ($mm \text{ día}^{-1}$);
- R_n radiación neta en la superficie de cultivo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$);
- G densidad de flujo de calor del suelo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$);
- T temperatura media di- a 2m de altura ($^{\circ}C$);
- u_2 velocidad del viento a 2 m de altura ($m \text{ s}^{-1}$);
- e_s presión de saturación de vapor (k Pa);
- e_a presión actual de vapor (k Pa);
- $e_s - e_a$ es el déficit de presión de saturación (k Pa);
- Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa \text{ } ^{\circ}C^{-1}$);
- γ constante psicrométrica ($kPa \text{ } ^{\circ}C^{-1}$).

En 1948, Penman combinó el balance de energía con el método de transferencia de masa y derivó una ecuación para medir la evaporación desde una superficie expuesta a condiciones estándar de insolación, temperatura, humedad y velocidad de viento. Este método llamado de combinación fue desarrollado por muchos investigadores y extendido para superficies de cultivo por la introducción de factores de resistencia.

2.9. Factores que afectan la evapotranspiración

Muchos autores y entre ellos los escritores de documentos de la FAO entre ellos Allen, Pereira, Raes, y Smith (1998) coinciden en que los parámetros del tiempo, características del cultivo, aspectos ambientales y de manejo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Señalando también que la transpiración, al igual que la evaporación, depende de la energía suministrada, gradiente de presión de vapor y velocidad del viento, por lo que tanto, radiación solar, temperatura del aire, humedad del aire y viento son términos que podrían ser considerados cuando se evaluamos la evapotranspiración.

El agua contenida en el suelo y la habilidad de el suelo para conducir agua a las raíces también determina el valor de la transpiración, así como la anegación y la salinidad del agua del suelo, así también, el desarrollo, el medio ambiente y manejo podrían ser considerados cuando se esta evaluando la evapotranspiración.

2.9.1. Factores meteorológicos

Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith (1998), afirman que los factores meteorológicos que determinan el evapotranspiración son los parámetros de tiempo que proveen energía para la vaporización y remoción de vapor de agua desde la superficie evatranspirativa.

2.9.1.1. Radiación solar

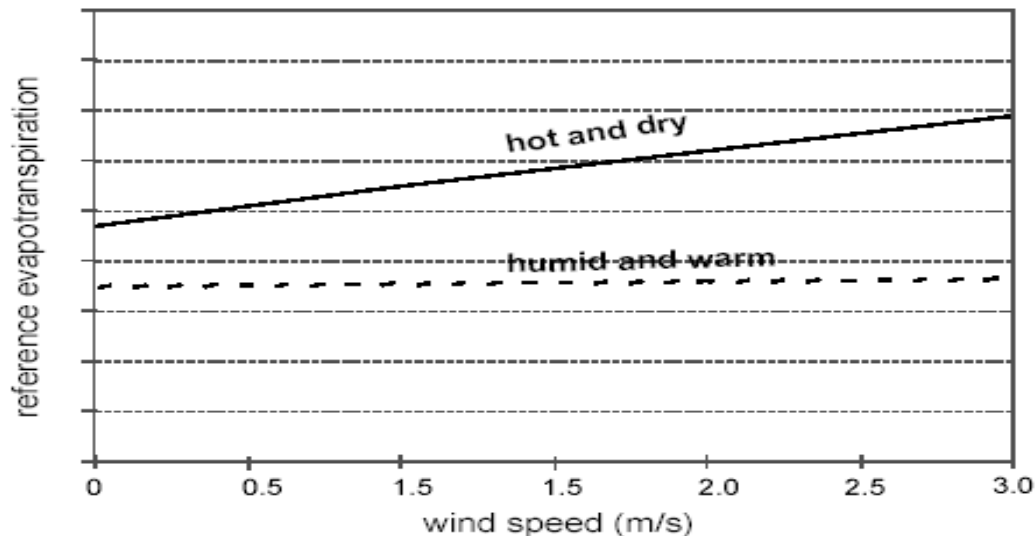
Richard et al. (1998), señalan que el proceso de la evapotranspiración es determinado por la cantidad de energía disponible para vaporizar el agua. La radiación solar es la fuente de energía más grande que puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede recibir la superficie evaporativa depende de su ubicación y de la época del año. Debido a las diferencias en la posición del sol, la radiación potencial difiere en las latitudes y en las estaciones.

El radiación solar real que alcanza la superficie evaporativa depende de la turbidez de la atmósfera y la presencia de nubes que reflejan y absorben la mayor proporción de la radiación. Al evaluar el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, también se debe tener presente que no toda la energía disponible es usada para vaporizar el agua. Parte de la energía solar es usada para calentar la atmósfera y el perfil del suelo.

2.9.1.2. Temperatura del aire

Richard et al. (1998), señalan que la radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por el incremento de la temperatura del aire de la tierra. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y ejerce como tal una influencia controlada en los valores de evapotranspiración. En tiempo soleado y caluroso la pérdida de agua por evapotranspiración es mayor que en tiempo nublado y fresco.

Figura 3 Efecto de la velocidad del viento en la evapotranspiración en condiciones climáticas secas-calientes (hot-dry) y húmedas-calurosas (humid-warm)



Fuente: FAO N° 56 (1998)

2.9.1.3. Humedad del aire

Richard et al. (1998), señalan que mientras la energía suministrada por el sol y el aire circundante es la fuerza principal para la vaporización del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie

evapotranspirativa y la presión de vapor del aire circundante es el factor determinante la remoción del vapor. Campos bien-regados en las regiones áridas secas calientes consumen cantidades grandes de agua debido a la abundancia de energía y de poder disecante de la atmósfera. En las regiones tropicales húmedas, a pesar del fuerte ingreso de energía, la humedad alta del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En este ambiente el aire está cerca de la saturación de vapor de agua, para que pérdidas adicionales de agua pueden ser guardadas y la proporción del evapotranspiración es más baja que en las regiones áridas.

2.9.1.4. La velocidad del viento

Richard et al. (1998), señalan que el proceso de remoción de vapor depende de la magnitud de la extensión y la turbulencia de aire, las cuales transfieren cantidades grandes de aire encima de la superficie evapotranspirativa. Al vaporizar el agua, el aire sobre la superficie evapotranspirativa se satura gradualmente con el vapor de agua. Si este aire no es continuamente reemplazado con el aire seco, la tendencia de remoción del vapor de agua y la proporción de evapotranspiración disminuyen.

Los mismos autores señalan que el efecto combinado de factores climáticos que afectan la evapotranspiración es ilustrado en la figura anterior para dos condiciones climáticas diferentes. La demanda de evapotranspiración es alta en tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y la cantidad de energía disponible de la radiación solar directa y el calor latente. Bajo estas circunstancias, gran cantidad de vapor de agua puede guardarse en el aire, mientras el viento puede promover el transporte de agua permitiendo que más vapor de agua sea liberado.

Por otro lado, los mismos autores señalan que bajo las condiciones de tiempo húmedas, la humedad alta del aire y la presencia de las nubes causa que los valores de evapotranspiración sean más bajos.

El efecto de la evapotranspiración, el incremento de las velocidades del viento para las dos condiciones climáticas diferentes es ilustrada por las pendientes de las curvas de la figura anterior. El secado de la atmósfera, la magnitud del efecto en la ET y el grado de pendiente de la curva.

Finalmente señalan que para las condiciones húmedas, el viento sólo puede reemplazar el aire saturado con aire ligeramente menos saturado y remover la energía de calor. Consiguientemente, la velocidad del viento afecta los valores de evapotranspiración a una magnitud menor que bajo las condiciones áridas donde las variaciones pequeñas en la velocidad del viento puede producir las variaciones más grandes en la proporción de la evapotranspiración.

2.9.2. Factores de la especie

Al respecto Allen et al. en 1998 dicen que el valor de transpiración es también influido por las características del cultivo, aspectos ambientales y prácticas de cultivo, así como la especie. Así también, Nadi y Hudson 1965 citados por el documento de FAO N° 56, dicen que en los procesos de transferencia de calor y vapor de agua intervienen ciertas características de la planta tales como, su altura, conformación, rugosidad y características las hojas y de sus estomas.

Diferencias en la resistencia a la transpiración, altura de cultivo, rugosidad del cultivo, reflexión, cobertura del terreno (IAF) y enraizamiento del cultivo, son características que resultan en diferentes niveles de ET en diferentes especies de cultivos bajo idénticas condiciones ambientales. (Allen et. al. 1998)

2.9.2.1. Variedad y estado de desarrollo

La especie de cultivo, variedad y estado de desarrollo podrían ser considerados cuando se está evaluando la evapotranspiración de cultivos crecidos en largos y bien manejados campos. Otros factores para ser considerados cuando se está evaluando la ET son la cobertura del terreno, densidad de plantas y contenido de agua en el suelo (FAO, 1998).

2.9.2.2. Densidad, altura y cobertura (IAF)

La evaporación y transpiración ocurren simultáneamente y no es tarea fácil ir distinguiendo los dos procesos. Además, desde el agua aprovechable en la capa de suelo superficial, la evaporación de un suelo cultivado está principalmente determinada por la fracción de la radiación solar recibida por la superficie del suelo, la cual disminuye en el periodo de crecimiento como el cultivo desarrolla y el dosel del cultivo obscurece más y más el área de tierra. Cuando el cultivo es pequeño, el agua es predominantemente perdida por evaporación del suelo, pero en algunos cultivos bien desarrollados y con el suelo completamente cubierto, la transpiración viene a ser el principal proceso (Allen, Periera, Raes, y Simth (1998)).

2.9.2.3. Rugosidad

Se refiere a la suma de los factores dimensionales volumétricos superficiales, es decir a la estructura y volumen de materia vegetal en un terreno (FAO 56, 1998).

2.9.2.4. Resistencia estomática (r_l)

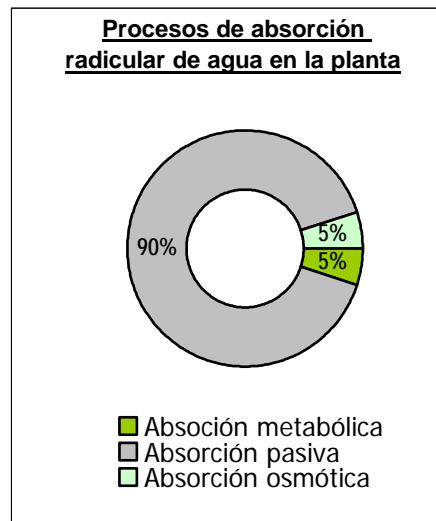
Jensen et al. (1990) y [Richard et al, \(1998\)](#), en resumen, señalan que la cantidad de resistencia estomática, (r_l), es la resistencia promedio de una hoja individual, para un específico cultivo, cuyo valor difiere entre variedades y por el manejo del cultivo, incrementando usualmente con el periodo de cultivo y antes de la maduración. Los mismo autores dicen que la resistencia estomática, r_l, está influida por el clima y por el agua disponible, influencia que varía de un cultivo a otro y diferentes variedades y algunos estudios indican que la resistencia estomática es influida en algunos grados por la intensidad de radiación, temperatura y déficit de presión de vapor. Finalmente señalan que la resistencia incrementa cuando el cultivo está en estrés hídrico y el agua disponible del suelo limita la evapotranspiración del cultivo.

2.9.2.5. Características radiculares del cultivo

[Rodríguez, \(1992\)](#) dice que casi toda la absorción del agua y las sales minerales, tiene lugar en la “porción terminal” y las “raicillas” del sistema radicular primario; en las plantas adultas existen millones de “puntas de raíces” y “raicillas”, a causa de la abundante ramificación de su sistema radicular. El mismo autor señalan

que desde el punto de vista fisiológico, el número de puntas de raíces y raicillas existentes en un sistema radical, es probablemente el índice más importante acerca de su capacidad para la absorción de agua y sales minerales del suelo.

Figura 4 Procesos de absorción radicular de agua en la planta



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Rodríguez, R. 1992

Así también, ASCE (1990) dice que la zona de rápida absorción de agua por las raíces es desde 1.5 a 10 cm debajo del tallo, lo cual coincide con la zona normal de pelos radiculares desarrollados, señala también que existen varios procedimientos independientes de absorción del agua en la planta a saber:

Imbibición: En el caso de las semillas cuando se hidratan antes de germinar y en el caso de raíces deshidratadas (por sequía).

Absorción metabólica: A través de los pelos absorbentes, en contra de una gradiente de concentración (las hormonas del tipo Auxinas tienen cierta acción directa o indirecta), esto ocurre incluso con una atmósfera saturada al 100% de vapor de agua, donde la cantidad absorbida sólo alcanza al 5% del total absorbido por la planta.

Absorción pasiva: ó tensión por transpiración, que ocurre a través de los pelos absorbentes, donde la raíz apenas desempeña un papel auxiliar, debido (Chipana, 1997) a la fuerza motriz provocada por el gradiente de potencial hídrico entre la hoja y el suelo, que es la suma de resistencias presentes en las sucesivas partes del sistema y debido a hormonas, como el ácido abscísico que controlan desde las raíces el cierre de los estomas, los autores citados señalan que este procedimiento absorbe el 90% de agua.

Absorción osmótica: por la penetración al interior de las células de la raíz por ósmosis. La absorción sólo alcanza un 5% de la cantidad total. Rodríguez, (1992)

2.9.2.6. Otros factores que influyen en la absorción de agua

A. Factores internos:

1. Volumen y peso radicular²
2. Superficie radicular
3. Extensión radicular o volumen del suelo ocupado por el sistema radicular³

B. Factores externos:

4. Agua disponible en el suelo: entre CC y PMP.
5. Aireación del suelo: 10% de O₂ (16% para el hombre) como mínimo y 5% de CO₂ como máximo.
6. Temperatura del suelo: rango óptimo para cada cultivo.

Jensen et al. (1990), citado por Rodríguez dice que la permeabilidad de las raíces está influenciada por el nivel de actividad metabólica. Así, limitada aireación, altas o bajas temperaturas, o altos niveles de CO₂ muestran la reducción de la permeabilidad.

2.9.3. Balance de energía

Allen et al. (1998), señalan que las pérdidas pueden también ser expresadas en términos de energía recibida por unidad de áreas. La energía se refiere a la energía o el calor requerido para vaporizar el agua libre. Esta energía, conocida como calor latente de vaporización (λ), varía en función de la temperatura. Los valores de evapotranspiración expresados en unidades de MJ m⁻² day⁻¹ representan el flujo de calor latente λ ET. Por lo tanto, y por ejemplo a una temperatura de 20°C, 1 mm de agua es equivalente a 2.45 MJ m⁻², es decir que con una energía recibida o ingresada de 2.45 MJ se pueden vaporizar 1 kg o 0.001 m³ o 0.001 m o 1 mm de agua por cada metro cuadrado de superficie.

Allen et al. (1998), señalan que la evaporación del agua requiere cantidades relativamente grandes de energía, en la forma de calor sensible o energía radiante. Por lo tanto, el proceso de evapotranspiración está gobernado por el intercambio de energía de la superficie de la vegetación y está limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación y la aplicación del principio de conservación de energía es posible predecir valores de evapotranspiración. La energía que recibe la superficie vegetal debe ser igual a la energía que pierde la superficie para el mismo periodo. Así también los mismos autores señalan que todos los flujos de energía deberían ser considerados cuando se deriva la ecuación del balance de energía, debiendo escribirse la ecuación para una superficie evapotranspirativa como sigue: ⁴

Velasco (2001) citando a Jensen et al. (1990), Allen et al. (1998) y otros, explica los componentes de ese balance y las ecuaciones matemáticas empleadas y señalan que el balance vertical de energía a nivel de la superficie del suelo es la suma de los flujos de calor sensible hacia o desde el aire y el suelo, del calor sensible, del calor latente, de la radiación neta y otros flujos menores.

² El término radicular se refiere a raíces finas, raicillas y pelos absorbentes que son los órganos exclusivos de absorción.

³ El término sistema radicular se refiere al total de raíces (primarias, secundarias, etc.)

⁴ Los varios términos no pueden ser positivo o negativo. Positivo R_n supe energía a la superficie y positivo G, λ ET y H remueve energía desde la superficie. p-11

La formula final empleada para el su cálculo es:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (16)$$

Donde:

R_n	es la radiación neta;
H	es el calor sensible;
λET	es el flujo de calor latente; y
G	es el flujo de calor del suelo.

En la ecuación anterior, solo los flujos verticales son considerados y el valor neto de advección es ignorado cuando la energía comienza a ser transferida, Por lo tanto, la ecuación se aplica únicamente a grandes, extensivas superficies con vegetación homogénea. La ecuación está restringida para los cuatro componentes citados, otros componentes pueden ser considerados despreciables cuando comparados con estos.

El flujo de calor latente (λET) representa la fracción de evapotranspiración, que puede ser derivada desde la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta (R_n) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados desde los parámetros climáticos. La medición de calor sensible (H) es como siempre es complicada y no puede ser fácilmente obtenida, H requiere mediciones exactas de gradientes de temperatura sobre la superficie.

El documento de FAO 59, agrega además, que cada uno de sus términos pueden ser positivos o negativos, sin embargo, R_n positiva sule energía, mientras que G , λET y H , positivas, remueven energía de la superficie. La R_n puede ser estimada a partir de parámetros climáticos; el flujo de calor latente representa la fracción que corresponde a la Evapotranspiración; el flujo de calor del suelo, G , es un parámetro que, para estimaciones diarias; el calor sensible, H , puede ser estimado por medio de cuidadosas mediciones de gradientes de temperatura sobre la superficie, o como diferencia entre los demás parámetros.

2.9.3.1. Radiación neta (R_n)

La radiación neta, R_n , es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (17)$$

Las magnitudes de las radiaciones netas de onda corta y larga se determinan por medio de un sistema complejo de ecuaciones, explicada por Allen, Periera, Raes, y Simth (1998)

2.9.3.2. Flujo de calor latente (λET)

El flujo de calor latente, λET , es la energía que potencialmente se emplea para la evapotranspiración, porque se relaciona directamente con la energía latente que se halla en las moléculas de agua evaporadas:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \left[\frac{p_a \times c_p (e_s - e_a)}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma \left[1 + \left(\frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad . (18)$$

Donde :

- R_n es la radiación neta;
- G es el flujo de calor del suelo, que para balances diarios es negligible;
- p_a es la densidad del aire (en relación a la presión atmosférica);
- c_p es el calor específico (a presión constante = $1.013 \cdot 10^{-3}$ MJ/kg/°C);
- e_s es la presión media de saturación[kPa],;
- e_a es la presión actual de saturación[kPa],;
- Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
- r_s es la resistencia de dosel;
- r_a es la resistencia aerodinámica;
- γ es la constante psicrométrica.

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor: La cantidad de agua en el aire se relaciona directamente con la presión parcial ejercida por el agua en el aire, por lo tanto es una medida directa del contenido de agua en el aire. La relación entre la temperatura y la presión parcial del agua en el aire se llama curva de presión de saturación de vapor:

$$\Delta = \frac{4098 \left(0,6108 \times 2,7183^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3} \right)} \right)}{(T + 237,3)^2} \quad (19)$$

Donde:

- Δ = es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
- T = temperatura del aire (° C);
- $\exp[.]$ = 2.7183 (logaritmo en base natural) raised to the power [..].

Densidad del aire o densidad atmosférica (ρ_a): La densidad del aire o atmósfera se relaciona con la temperatura virtual (T_{Kv}) y la presión atmosférica y puede determinarse de la siguiente manera a partir de la temperatura absoluta ($T_K = T + 273.16$):

$$T_{Kv} = T_K \left(1 - 0,378 \left(\frac{e_a}{P} \right) \right)^{-1} \quad (20)$$

Donde:

$$\begin{aligned} T_K &= \text{Temperatura absoluta [K] = } 273.16 + T \text{ [}^\circ\text{C]} \\ e_a &= \text{Presión de vapor actual [kPa]} \end{aligned}$$

Presión media de saturación de vapor (e_s): La $e^0(T)$, puede ser calculada por la temperatura del aire:

$$e^0(T) = 0,6108 \times 2,7183^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3} \right)} \quad (21)$$

Donde:

$$\begin{aligned} e^0(T) &= \text{Presión media de saturación de vapor } T \text{ [kPa],} \\ T &= \text{temperatura del aire (} ^\circ\text{C);} \\ \exp[.] &= 2.7183 \text{ (logaritmo en base natural) raised to the power [..].} \end{aligned}$$

Debido a la no linealidad de la ecuación anterior, la presión media de saturación de vapor debería ser computada como la media entre la presión de saturación de vapor a una temperatura máxima, $e^0(T_{\max})$, y la correspondiente a una temperatura mínima, $e^0(T_{\min})$, de ese período:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (22)$$

Donde:

$$\begin{aligned} e_s &= \text{Presión de vapor de saturación para un determinado periodo [kPa]} \\ T_{\max} &= \text{Temperatura máxima del aire (} ^\circ\text{C);} \\ T_{\min} &= \text{Temperatura mínima del aire (} ^\circ\text{C);} \\ e^0(T) &= \text{Presión de saturación de vapor } T \text{ [kPa],} \end{aligned}$$

Presión actual de vapor (e_a): Cuando se cuenta con datos de HR_{\max} , HR_{\min} , la presión actual de vapor puede ser calculada por:

$$e_a = \frac{e^0(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} + e^0(T_{\max}) \frac{HR_{\min}}{100}}{2} \quad (23)$$

Donde:

- e_a = Presión actual de saturación [kPa],
- $e^o(T_{\max})$ = Presión de saturación de vapor a temperatura máxima diaria [kPa],
- $e^o(T_{\min})$ = Presión de saturación de vapor a temperatura mínima diaria [kPa],
- RH_{\max} = Humedad relativa máxima (%);
- RH_{\min} = Humedad relativa mínima (%);

Resistencia aerodinámica (r_a): Para el cultivo de referencia, césped, la FAO ha establecido:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (24)$$

Donde: u_2 es la velocidad del viento, en m/s, a 2 metros de altura.

Resistencia de dosel (r_s): La FAO ha establecido que su magnitud es de 70 s/m.

Constante psicrométrica (γ): La constante psicrométrica es el calor específico a una determinada presión, es la cantidad de energía para incrementar la temperatura de una unidad de masa de aire en un grado a presión constante:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (25)$$

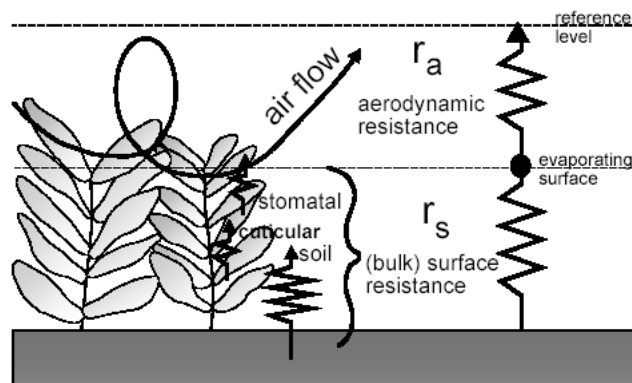
Donde:

- γ = Constante Psicrométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
- P = Presión atmosférica [kPa]

2.9.4. Factores de resistencia de los cultivos

La nomenclatura de resistencia distingue los factores de resistencia aerodinámica y superficial.

Figura 5 Representación simplificada de la resistencia superficial y aerodinámica al flujo de vapor de agua



Fuente: FAO, 56 - 1998

2.9.4.1. Resistencia aerodinámica

Los parámetros de resistencia superficial se combinan a menudo en un parámetro, el “bulk” que opera en series con la resistencia aerodinámica, que describe la resistencia del flujo de vapor de agua de los estomas abiertos del área foliar total y el suelo. [Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith \(1998\)](#), señalan que la transferencia de calor y vapor de agua desde la superficie evaporativa en el aire sobre el dosel es determinado por la resistencia aerodinámica.

2.9.4.2. Resistencia estomática

[Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith \(1998\)](#), señalan que la resistencia estomática, es influenciada por el clima y por la disponibilidad de agua, sin embargo, indican que las influencias varían de un cultivo a otro y diferentes variedades pueden ser afectadas diferentemente. Así también señalan que la resistencia estomática, es influenciada por el clima y por la disponibilidad de agua y que las influencias varían de un cultivo a otro y diferentes variedades pueden ser afectadas diferentemente. La resistencia aumenta cuando el cultivo sufre estrés hídrico y la disponibilidad de agua en el suelo limita la evapotranspiración de cultivo, sin embargo algunos estudios indican que esa resistencia del estomática es influenciada por la magnitud de la intensidad de la radiación, temperatura, y el déficit de presión de vapor.

2.9.5. Factores del ambiente de invernadero subterráneo

El Servicio Regional (noreste) de Ingeniería Agrícola de Estados Unidos, (1994) señala que la fotosíntesis, respiración y otros procesos esenciales de las plantas involucran muchas reacciones que son afectadas por el ambiente de las plantas. La luz visible (390-700 nm) provee la energía esencial para el desarrollo y crecimiento de las plantas. La fotosíntesis ocurre solo con luz visible, de donde las ondas roja y azul son usadas más eficientemente. La intensidad de luz es la variable de influencia más crítica en la fotosíntesis.

[Bernat et al. \(1987\)](#), comentan que donde la luz (n) (factor importante en la producción agrícola) es abundante como en algunas regiones del sur de Europa la producción de cultivos protegidos ha tomado relevancia, debido a la eficiencia de manejo de energía. El cultivo de la beterraga es considerado como de día largo (o de luz creciente) para su floración.

Geery (1982), comenta que varios factores, en adición con la temperatura del aire, pueden influir en la sensación de calor o frío en un invernadero, incluyendo el contenido de humedad, el nivel térmico de radiación y movimientos de aire.

2.9.5.1. Temperatura

La temperatura de las plantas está afectada por la transferencia de energía radiativa, la transferencia de calor convectivo, y la evaporación de la superficie de las plantas. Los cultivos en invernadero crecen con tiempo mínimo de día, con temperaturas nocturnas desde -12.2 y -9.4 °C.

Las hortalizas que pertenecen a este grupo poseen temperaturas óptimas de crecimiento entre 15 y 18°C. No toleran temperaturas promedio mayores a 24°C y sólo toleran heladas suaves. A este grupo pertenecen hortalizas como berro de agua, brócoli, betarraga, col berza, col crespa, colirrábano, espinaca, haba, nabo, pastinaca, rábano, raíz picante, repollito de Bruselas, repollo, ruibarbo, rutabaga y salsifí. (Ruiz, 1998)

2.9.5.2. Humedad relativa

Geery, (1982), señala que la humedad del aire influye en la percepción de frío y presumiblemente en la percepción de frío de las plantas y que el vapor de agua se mueve de un lugar a otro porque la diferencia de presión de vapor, así la humedad afecta la transpiración de las plantas por la diferencia de vapor de agua entre la hoja de la planta y el aire circundante. El crecimiento normal de las plantas podría ocurrir en humedades relativas entre 25-80%.

2.9.5.3. Velocidad del viento

Geery, D. (1982), indica que la velocidad del viento afecta a la mayoría de los factores que afectan el crecimiento de las plantas, tal como transpiración, evaporación, temperatura, temperatura de la hoja, y dióxido de carbono aprovechable. Al mismo tiempo, señala que en general, velocidades del viento de 0.102-0.254 m/s que atraviesan la superficie de la hoja facilitan la asimilación del dióxido de carbono. Con una velocidad del viento de 0.508 m/s reduce la asimilación de dióxido de carbono, y con 1.016 m/s, el crecimiento es inhibido.

2.9.5.4. Vientos fuertes secos y calientes

Un rompevientos reduce la velocidad del viento y disminuye el valor de ET de los campos directamente fuera de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles puede compensar cualquier reducción en el campo.

2.9.6. Factores del suelo

El valor de evaporación desde el suelo puede ser agrupada en varios estados. El valor de evaporación es controlado por el calor de energía ingresada y es aproximadamente el 90% de ETp. La duración del primer estado es influenciada por el valor de evaporación, profundidad del suelo y propiedades hidráulicas del suelo (Gardner y Hillel, 1962)

Factores tales como: la salinidad del suelo, escasa fertilidad de la tierra, limitada aplicación de fertilizantes, la presencia de horizontes de suelo duros o impermeables, la ausencia de control de plagas (nematodos) y enfermedades y deficiente manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. (FAO 56, 1998)

2.9.6.1. Horizontes duros o impermeables

Rodríguez R. (1992), señala que la incapacidad por parte de las raíces, de penetrar profundamente e en ciertos suelos, se relaciona más estrechamente con la carencia de nutrimentos, que con la resistencia mecánica o aireación deficiente.

2.9.6.2. Contenido de agua en el suelo

El efecto del contenido de agua en el suelo en la ET es condicionado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y la clase de suelo. En el otro extremo, mucha agua resultará en inundaciones lo cual podrá dañar la raíz y limitar la elevación de agua por inhibición de la respiración. FAO 56 (1998)

2.9.6.3. Manejo del suelo

Martinez y Tcio, (1970), dicen que la elección de la ejecución de labores tienen la máxima importancia. Es preciso escoger el momento apto para efectuar las labores. Pero además concluyen en que el índice de reflexión aumenta en relación inversamente proporcional al menor movimiento de las partículas del suelo (estructura).

2.9.6.4. Manejo y condiciones ambientales

Cuando avaluamos el valor de ET, consideraciones adicionales podrían ser dadas para la escala de prácticas de manejo que actúan en los factores climáticos y de cultivo y que afectan los procesos de ET. Prácticas de cultivo y tipo de método de riego pueden alterar el microclima, afectando las características del cultivo o afectando el humedecimiento del suelo y la superficie del cultivo. (FAO 56, 1998)

2.9.6.5. Evaporación máxima

El uso de mulches, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir sustancialmente la evaporación del suelo.

2.10. La beterraga o remolacha

2.10.1. Variedades de mesa y su importancia

Rodríguez R. (1992), señala que considerables cantidades de alimentos se almacenan en las raíces, especialmente en las especies bianuales y perennes. Este alimento almacenado no sólo se usa al reanudarse el crecimiento en la primavera, sino que también suele ser económicamente importante en cultivos tales como: la Remolacha, Zanahoria y Papa dulce. Las raíces son órganos sintéticos muy importantes. En cuanto a sus Rendimientos, se tienen experiencias en Cochabamba (valle bajo) con 11 a 15 TM/ha con abonado orgánico y 22.5 TM/ha con fertilización.

2.10.2. Variedad Dark Red Detroit (tipo globular u ovalado)

Es la principal variedad para mercado fresco y para industrialización. Es tardía, se aprecia por su uniformidad, por su tamaño mediano y por que se puede almacenar más tiempo que otras (Cáceres, 1980). No existen estadísticas claras de rendimientos y producción de remolacha en Bolivia por regiones y/o departamentos, pero acudiendo a las fuentes más confiables se concluyó que:

- Según las principales distribuidoras de semillas de hortalizas de La Paz (Dalia, Los claveles y otras), la venta de semilla de las dos variedades más comunes a disposición de Beterraga es homogénea incluyendo la var. Dark Red Detroit (es decir, 50% vs 50%), que en un 90% se destina a la producción de Rio abajo y un 10% a los valles mesotérmicos del departamento de La Paz.
- Según Villarroel (1988), en el departamento de Cochabamba se cultiva en asocio con la zanahoria, siendo más acentuada su producción en el valle bajo debido a que esta especie presenta características de resistencia la efecto de sales, por lo que se considera un cultivo que desarrolla bien en suelos alcalinos y salinos.

Cuadro 3 Valor nutricional de la beterraga

OTROS COMPONENTES (mg)	
Calcio	18.00
Fósforo	28.00
Hierro	1.00
Tiamina	0.03
Riboflavina	0.07
Niaciana	0.20
Ácido ascórbico	6.00
Calorías	42.00

Fuente: (Enciclopedia Terranova)

2.10.3. Origen y clasificación

Se cree que la remolacha es de origen europeo, pero hay evidencias de que asiática o africana. El cultivo presenta formas o sub-variedades que se agrupan de acuerdo con las aplicaciones en: 1) remolachas de huerta, de ensaladas o *de mesa*, 2) remolacha de costillas y ornamental, 3) remolacha azucarera y 4) remolacha forrajera. (Enciclopedia Terranova)

Familia: Chenopodiaceae, Especie *Beta vulgaris* L. var. *cicla*

2.10.4. Morfología y tipificación

La raíz primaria es tuberosa, bastante ensanchada, roja. Cuando madura y se practica corte transversal, permite ver anillos concéntricos de tejidos vasculares separados por el parénquima. El tallo es rudimentario y

permanece corto: de allí nacen las hojas anchas, estrechamente agrupadas, de pecíolos largos verdes o rojizos. (Enciclopedia Terranova).

Cáseres (1980) tipifica los siguientes cultivares: globulares achatadas
globulares alargadas

2.10.5. Fisiología y fenología

2.10.5.1. Absorción de agua

Rodríguez, (1992), señala que; en efecto, la mayoría de la masa radicular viene representada por las raíces gruesas, como es el caso de la Remolacha, que en realidad no tienen una parte activa en la absorción del agua y de los nutrimentos, sino sólo las raicillas y los pelos absorbentes.

2.10.5.2. Duración de las fases de crecimiento

Cuadro 4 Duración de fases de desarrollo de la Beterraga para varios periodos de siembra y regiones climáticas (en días).

Fases	Inicial	Des.	Media	Final	Total	Fecha de Siembra	Región
Duración	15	25	20	10	70	Abril / Mayo	Mediterráneo
	25	30	25	10	90	Febrero /	Mediterráneo y Regiones Áridas
						Marzo	

Fuente: FAO 56, 1998. Los valores de la Tabla N° 1 son solo usados como una guía general y para propósitos de comparación.

FAO 56 (1998), dice que los valores de las tablas son utilizados como una guía general y propósitos de comparación. Las duraciones de fases de crecimiento enlistadas son duraciones promedios para las regiones y periodos específicos y son propuestos solo para servir como ejemplos. Observaciones locales de la fase de desarrollo de plantas específicas pueden ser usados, cuando es posible, para incorporar efectos de la variedad de planta, clima y prácticas culturales.

Los autores del documento 56 de la FAO, al respecto señalan que en algunas situaciones, el tiempo de emergencia de la vegetación y el tiempo de completa cobertura efectiva puede ser predicho usando ecuaciones acumulativas (grados-basados) de regresión o por sofisticados modelos de crecimiento de plantas. Esta clase de modelos podrían ser verificados o validados para el área local o usando observaciones locales para una específica variedad de cultivo.

Los mismos autores señalan que al fin del estado-medio y comienzos del estado final es usualmente marcado por la senescencia de hojas, muchas veces iniciando con las hojas bajas de las plantas. La duración del periodo de estado-último puede ser relativamente corto (menor que 10 días) para vegetación

suprimida por congelar (por ejemplo, misales en altas elevaciones en latitudes mayores en 40°N) o para cultivos agrícolas que son cosechados frescos (por ejemplo, beterragas de mesa y vegetales pequeños).

2.10.6. Índice de cosecha

La cosecha puede realizarse cuando el cultivo tiene entre 110 y 140 días de haberse sembrado. El tamaño ideal de la raíz es cuando alcanza un diámetro medio de 6 cm. (Enciclopedia Terranova)

2.10.7. Agroecología de la producción de remolacha

Su mejor desarrollo lo logra en climas medios y fríos, con temperaturas promedio entre 13 y 20 °C, mínimas de 4 °C y máximas de 24° C, en suelos francos y franco-arenosos, ricos en materia orgánica y con pH entre 6 y 7 (Cáceres, 1980). Moderadamente tolerante a la acidez. Los espaciamientos de plantación (densidad de siembra) se eligen según la variedad y el tamaño que se desea cosechar, incluyendo los equidistantes para camas (Cáceres, 1980).

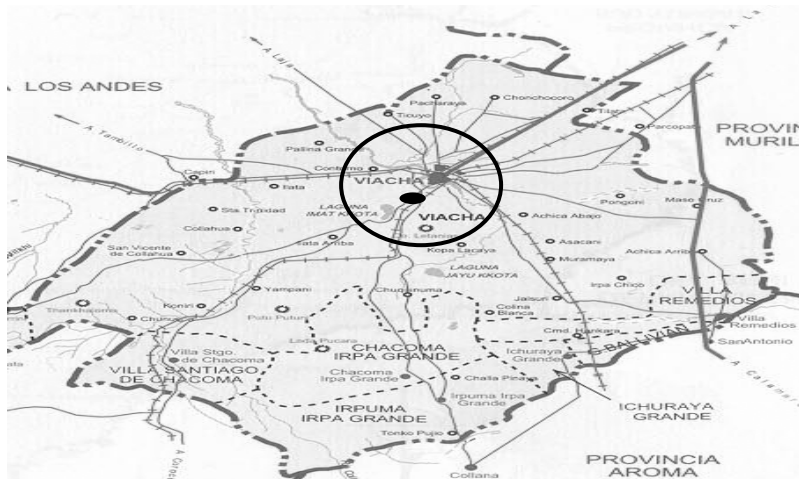
2.10.8. Requerimiento de agua de las beterragas de mesa

IBTA, San Benito (1987), recomienda para la variedad Grosby Egyptian, el manejo más conveniente incluyendo una lámina total de: 656.7 mm, con una lámina semanal de 53.8 mm para suelos FcAr (con una eficiencia de 72.4%) y (FcAo con una eficiencia de 67%).

III. LOCALIZACIÓN

En función de que las recomendaciones del presente estudio tengan aplicación y validez para el agricultor de las comunidades rurales del altiplano central boliviano, así también tenga información agro climática que respalde el análisis a ser realizado, se consideró que el experimento debería ser ubicado en un lugar representativo de dicha eco región, es decir, con una precipitación media anual de 550 mm / año.

Figura 6 Localización del experimento



Fuente: Atlas de Municipios, 1992

Se eligió la zona de Viacha, cercana a estaciones y meteorológicas y centros de Investigación (que cuentan con estaciones agroclimáticas) como las estaciones de: Choquenaira (Facultad de Agronomía - Universidad Mayor de San Andrés), Instituto Benson (Universidad de Brigham Young), IBTEN (Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear) y San Gabriel (Iglesia Católica), que trabajan en tareas investigación y extensión en sus áreas, con recursos, medios e información.

En función de las condiciones del colaborador del proyecto, se tubo que instalar y acondicionar el mismo en la Comunidad de Contorno Centro (a 3870 m de altitud), cercana a 5 km de la ciudad de Viacha, en dirección noroeste, a 35 km de la ciudad de La Paz, que pertenece a la Provincia Ingavi del Departamento de La Paz. Coordenadas geográficas: LS 16°39'10.38" y LO 28°19'26.94" .

IV . M A T E R I A L E S Y M É T O D O S

4.1. Localización

En función de que las recomendaciones del presente estudio tengan aplicación y validez para el agricultor de las comunidades rurales del altiplano central boliviano, así también tenga información agro climática que respalde el análisis a ser realizado, se consideró que el experimento debería ser ubicado en un lugar representativo de dicha eco región, es decir, con una precipitación media anual de 550 mm / año.

Se eligió la zona de Viacha, cercana a estaciones y meteorológicas y centros de Investigación (que cuentan con estaciones agroclimáticas) como las estaciones de: Choquenaira (Facultad de Agronomía - Universidad Mayor de San Andrés), Instituto Benson (Universidad de Brigham Young), IBTEN (Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear) y San Gabriel (Iglesia Católica), que trabajan en tareas investigación y extensión en sus áreas, con recursos, medios e información.

En función de las condiciones del colaborador del proyecto, se tubo que instalar y acondicionar el mismo en la Comunidad de Contorno Centro (a 3870 m de altitud), cercana a 5 km de la ciudad de Viacha, en dirección noroeste, a 35 km de la ciudad de La Paz, que pertenece a la Provincia Ingavi del Departamento de La Paz. Coordenadas geográficas: LS 16°39'10.38" y LO 28°19'26.94" .

4.2. Materiales

4.2.1. Equipo e instrumentos utilizados

El instrumental utilizado fue: luxómetro, termohigrómetros electrónicos, balanza analítica, tensiómetros, horno de secado, herramientas de construcción y labranza.

4.2.2. Agua para riego

Se empleo agua de pozo del acuífero de Ingavi, 30 m de la parcela experimental; presurizada con el uso de una bomba eléctrica.

El agua empleada es perteneciente al acuífero de Viacha, con las siguientes características citada por Velasco, 2001.

Cuadro 5 Componentes químicos del agua de riego

Parámetros		Valores
Conductividad eléctrica	dS/m	0.653
Total de sólidos disueltos	mg/l	327
Ph		7.77
Dureza total (Ca CO ₃)	mg/l	220
Ca ⁺⁺	mg/l	62.4
Mg ⁺⁺	mg/l	15.6
OH ⁻	mg/l	0
CO ₃ ⁻⁻	mg/l	0
HCO ₃ ⁻	mg/l	112
SO ₄ ⁻⁻	mg/l	132
NO ₃ ⁻⁻	mg/l	10
Cl ⁻	mg/l	35
K ⁺	mg/l	25
Na ⁺	mg/l	29
B	mg/l	0.5
RAS		0.85

Fuente: Velasco (2001).

Se utilizó el agua de un pozo ubicado en el patio de la Escuela Primaria de la Comunidad de Contorno Centro, cuya profundidad media de lámina fue de 5 m; el pozo fue ubicado a 200 m de distancia de la estación experimental instalada y que fue transportada por conducción en tubería de 0.05 m de diámetro.

4.2.3. Sustrato de cultivo

El suelo utilizado como sustrato del cultivo de la Beterraga, procedió del terreno adjunto, (el mismo que en gestión anterior sostuvo al cultivo de cebada) con las siguientes características:

4.2.3.1. Retención de humedad :

Los datos de tensión matricial y humedad se obtuvieron en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la UMSS empleando el método de desorción (ver cuadro 7), con los siguientes resultados:

Cuadro 6 Valores de humedad del suelo según tensión aplicada

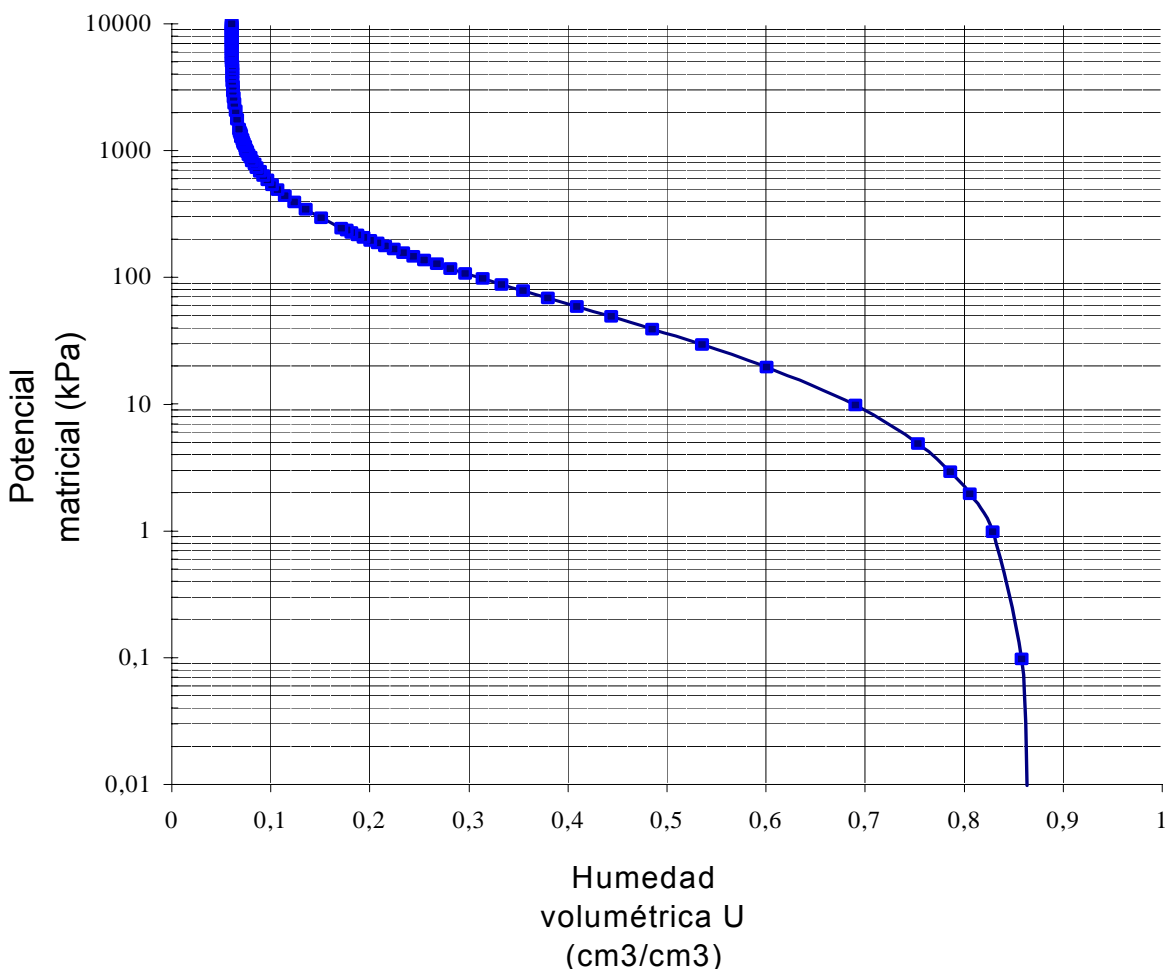
Tensión	bar	%	Humedad (en masa)	Humedad Volumétrica m ³ /m ³
0,01			0,46	0,69
0,02			0,40	0,60
0,03			0,35	0,52
0,13			0,20	0,30
0,23			0,10	0,16
0,33			0,09	0,13
0,43			0,08	0,12
0,53			0,08	0,11
0,63			0,07	0,11
0,73			0,07	0,10
0,83			0,06	0,09
1,00			0,06	0,08
3,00			0,05	0,07
7,00			0,05	0,07
10,00			0,04	0,07
12,00			0,04	0,07
15,00			0,04	0,06

Fuente: Laboratorio de Suelos, UMSS, 2003

Ejecutando el Programa informático *Curvaret*, se obtuvieron los coeficientes empleados en el modelo de Van Genuchten para la Curva Característica de Retención (ver gráfico 1).

Coeficientes de la Curva de retención (modelo Van Genuchten):					
α	m	n	θ_r	θ_s	(c.a.)
(1/cm)			(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	
0.31616	3.242678	0.7369	0.06	0.865	0.98

Gráfico 1 Curva de retención de humedad del sustrato



4.2.3.2. Capacidad de campo y humedad gravimétrica instantánea

Para la determinación de los parámetros de riego y en base a la información de laboratorio que ha distintas presiones dieron como resultado contenidos de humedad que permitieron establecer cuales eran los límites de manejo para el suelo del experimento, se procedió a la aplicación y utilización de las fórmulas de ADT = Agua Disponible Total, AFD = Agua Fácilmente Disponible y DPM = Déficit Permitido de Manejo, éste último sirvió de parámetro para la aplicación del riego necesario que permitiría saturar el suelo de cultivo hasta la capacidad de campo (CC), parámetro que se observó y controló con el tensiómetro ubicado a menor profundidad (10 cm) y que fue calculado (con la ecuación 7), de Van Genuchten en 6 centibares para CC y 7 centibares para el DPM.

Para el análisis específico de la humedad a capacidad de campo (θ_{CC}) se empleó el método de drenaje expuesto por Chilon (1996). El contenido volumétrico de agua, (θ) de este sustrato a Capacidad de Campo fue $0,44 \text{ m}^3/\text{m}^3$ o 88 mm de lámina de agua; en tanto que para 1500 cbar, fue de $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ o 12 mm a, por lo tanto el Agua Disponible Total para las plantas fue de 76 mm.

Cuadro 7 Parámetros de riego utilizados

Parámetros de Riego	Humedad Volumétrica (m3 / m3)	Lamina de agua (mm)	Tensión (centibares)
Capacidad de Campo:	0.40	80	6
Agua Disponible Total:	0.34	68	6
Agua Fácilmente Disponible:	0.02	4	7
Déficit Permitido de Manejo:	0.02	4	7
Punto de Marchites Permanente:	0.065	12	1500

Fuente: Elaboración propia, 2004

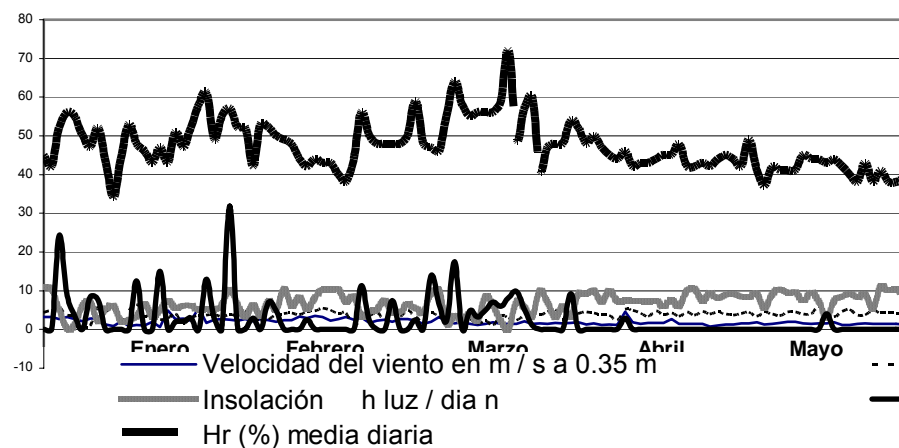
4.3. Metodología

La metodología se dividió en tres fases: la primera, que consistió en la implementación de las camas bajas atemperadas y la calibración de lisímetros de volumen, la segunda, que consistió en el desarrollo del cultivo y la medición de las variables de respuesta identificadas y la tercera, que consistió en el análisis de resultados en función de los objetivos, modelo y métodos estadísticos planteados.

En los predios de la escuela de la comunidad se eligió el lugar más adecuado, es decir: suelo con aptitud agrícola, con exposición solar máxima y nula influencia de fuentes de agua superficiales y sub-superficiales que por conducción horizontal y/o vertical humedezcan la base y los laterales de las unidades. Espacio que fue cedido de manera muy desprendida por la comunidad de Contorno Centro.

Se consideró que el experimento sea realizado desde el mes de Enero hasta el mes de Mayo por ser el tiempo recarga de acuíferos subterráneos menos profundos, es decir, con mayor disponibilidad de agua de pozo, única fuente permanente y disponible de agua para riego.

Gráfico 2 Climadiagrama de la época en la zona (Año 2000)



Fuente: Elaboración propia, 2003

El gráfico anterior muestra la tendencia del clima de la zona de estudio en la misma época del año de la gestión 2000, que ilustra el cambio de estación, así como la tendencia de un descenso significativo de sus parámetros.

La precipitación media anual en la Localidad de Viacha, de acuerdo a la información sistematizada por la Autoridad Binacional del Sistema TDPS, varía de 500 a 550 mm / año.

La época en la que se planteó el experimento tiene significativa importancia, debido y en función de que en la misma se reportan los niveles de evapotranspiración más elevados en la eco región altiplánica, que no necesariamente tendría correlación con el potencial de evapotranspiración de la cama baja atemperada.

La construcción e instalación de las camas bajas atemperadas fue concluida al inicio del periodo de lluvias, es decir que la siembra se realizó en la época de estiaje – de acuerdo con lo planteado en el perfil de tesis –

Para el establecimiento de las camas atemperadas se consideró la ubicación de las mismas en un lugar elevado de manera que no exista influencia de fuentes superficiales y sub-superficiales de agua que por conducción horizontal y/o vertical humedezcan la base y los laterales de las unidades experimentales, considerando el descenso y /o ascenso del nivel freático de la zona, y así también, objeto de evitar el encharcamiento.

Para la instalación de las camas bajas atemperadas se realizaron las siguientes actividades:

- Orientación longitudinal este – oeste,
- Excavaciones,
- Afinado de bordes,
- Nivelación de bases,
- Impermeabilizado de la base,
- Conexión del drenaje,
- Vaciado de cascajo,
- Vaciado de tierra,
- Incorporación de materia orgánica,
- Construcción de bordes de adobes,
- Preparación del sustrato y nivelado.

Las dimensiones de cada cama según recomendación técnica, fué de 3.00 m. de longitud, 1.20 m. de ancho y una profundidad de 0.80 m. El sustrato fué compuesto por una capa de 10 cm de cascajo y una capa arable abonada, mullida y nivelada de 25 cm.

En la construcción de las tapas, se consideraron las siguientes actividades:

- Selección de madera,
- cortado,
- perforación de uniones,
- cortado de Agrofilm 250 mu,
- unión de partes,
- reforzamiento,
- e instalación de accesorios.

La siembra se realizó considerando 2 semillas por cada golpe, en función del diseño y los tratamientos definidos, (ver cuadro de tratamientos):

En el análisis de propiedades físicas del suelo se determinó la textura, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchites permanente, déficit permitido de manejo), este muestreo y análisis de suelo al inicio del ciclo del cultivo y una vez preparado el sustrato.

La evaluación de riego se realizó utilizando el método de balance hídrico del cultivo; donde la variable percolación se midió con un lisímetro volumétrico, instalado cerca de las unidades, dos tensiómetros de vacío y un tanque evaporímetro. El riego se realizó por aspersion simple (regadera).

El registro de las variables de respuesta micro climáticas se realizarón de manera diaria y horaria, desde la incidencia del sol en las unidades, hasta la descenso de la luminosidad solar en el interior de las CBAs.

Las labores culturales que se realizarán en el presente trabajo son: el raleo, aporques, control de malezas y la cosecha.

El análisis de resultados fue realizado con el siguiente criterio:

Para el análisis estadístico de las variables fenotípicas cuantitativas del cultivo y para la evaluación de los datos del régimen hídrico en lisímetros se utilizó el diseño estadístico Completamente al Azar (CA), considerando 4 densidades de siembra (tratamientos) cada una con 3 repeticiones.

4.3.1. Diseño experimental

Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + \delta_i + \varepsilon_n(j) \quad (25)$$

Donde:

- Y_{ij} = observación de la i - ésima densidad en el j - ésimo bloque.
 μ = media general del experimento.
 δ_i = efecto de la i -ésima densidad.
 $\varepsilon_{n(j)}$ = error experimental.

Las unidades se instalaron en función de la distribución y sorteo correspondientes al diseño completamente al azar utilizado.

4.3.2. Tratamientos

El estudio consideró la aplicación de Cuatro Tratamientos, cada uno de los cuales fue *un nivel de Densidad de Siembra*, tal como se muestra en el cuadro siguiente, de manera que dados el riego y condiciones semejantes con el análisis de Lisimetría, el factor Densidad sea el que permita tener respuestas variables.

Cuadro 8 Densidades de Siembra (Criterio de máxima utilización del espacio)

Tratamientos	Densidades	Distancia entre surcos	Nº plantas fila	Distancia entre plantas	Nº plantas surco	Número total de plantas
Tratamiento 1:	1	12.50 cm	9	10.00 cm	30	270
Tratamiento 2:	2	15.00 cm	8	10.00 cm	30	240
Tratamiento 3:	3	12.50 cm	9	12.50 cm	24	216
Tratamiento 4:	4	15.00 cm	8	12.50 cm	24	192

Fuente: Elaboración propia, 2004

Debido que cada una de las Camas Bajas Atemperadas, de acuerdo al diseño y modelo previsto tiene una superficie de 3.6 m² (superficie muy reducida para el cultivo de un número considerable de plantas) se calcularon distancias entre filas y surcos y distancias precisas, que variaron la densidad de plantas en un rango de 190 y 270 plantas por unidad, cuyas diferencias permitieron inferir sobre el mayor o menor consumo de agua de las mismas.

4.3.3. Diseño de la estación de Contorno / construcción de Camas Bajas Atemperadas

4.3.3.1. Elección de la categoría

Por la disponibilidad de recursos, se consideró la eficiencia de los lisímetros de drenaje libre (volumétricos) con forrado interno de las paredes con plástico, que como: el lisímetro gigante de 405 m² (FAO 39, 1982) instalado, citado por Thompson y Boyce 1971 en Pangola, África del Sur, está provisto de un recipiente

forrado de plástico conteniendo un suelo arcilloso-arenoso y el lisímetro de 38% de pendiente, 86 m de largo, 1.4 m de ancho y 2.13 m de profundidad forrado de plástico, descrito por School y Hibbert en 1973 funcionaron eficientemente por mucho tiempo, proporcionaron información hasta ahora útil.

Luego de haberse definido y dispuesto el espacio para la instalación de las unidades en los predios de la escuela de la comunidad, se procedió a la determinación de la ubicación y marcado de las unidades (Ver croquis de ubicación) en función de un máximo aprovechamiento del espacio, disponiéndose distancias de 1.5 para pasillos y un margen de seguridad de 1 metro en el borde.

Se dispusieron tres filas en dirección este oeste y cuatro en dirección norte sur, quedando demarcada la parcela experimental en una superficie aproximada de 3.60 m², habiéndose dispuesto cada unidad en simetría, así como las respectivas cámaras de drenaje.

4.3.3.2. Orientación de las unidades

En un estudio previo (1997) que el Instituto Benson realizó sobre orientación más adecuada de las camas bajas atemperadas, en el cual se registraron horas luz, temperaturas, humedades relativas en época húmeda (misma época), se determinó que la orientación longitudinal que proporciona las mejores condiciones sería de *Este – Oeste*.

4.3.3.3. Instalación de los lisímetros

Se siguieron en todo el proceso de construcción las recomendaciones de la FAO que tiene las referencias más reconocidas para la aplicación y operación de lisímetros.

Con la participación y colaboración parcial de los habitantes de la comunidad citada, se procedió a la excavación de 24 unidades, de las cuales 12 fueron destinadas a la demostración del manejo del modelo y las restantes corresponden a las unidades del experimento.

En base a la identificación de que el principal factor de estudio en la producción de Beterraga en el modelo de camas bajas atemperadas es el requerimiento de riego y por recomendación del Ing. René Chipana asesor del presente estudio se determinó la factibilidad de la instalación ,(aprovechando el diseño de la CBA), de lisímetros de drenaje libre, con revestimiento de plástico.

Se inició la construcción, previo trazado de la ubicación de las unidades (ver Anexos), excavando cada unidad a 0.90 m y su cámara de drenaje a 1.50 m de profundidad. Luego de la excavación, afinado de bordes y la remoción de suelos, se niveló la base de cada unidad (ver Anexos) con pendiente del 4%, utilizando suelo de textura fina, en dirección Oeste-Este hasta el extremo noreste de la unidad, compactada

firmemente, donde finalmente se perforó un canal de 6 cm (2 plg.) de diámetro y una pendiente del 30%, que conectó cada unidad con su cámara de drenaje.

Según experiencias (FAO 39) y criterio se cubrió la base y los laterales con plástico color rojo realizando en el tremo inferior noreste de la salida una unión con un tubo de 70 cm de largo y 2 plg. de diámetro con silicona líquida abundante.

Una vez excavadas las unidades se confirmó que el horizonte inferior era “impermeable y seco”, (lo mismo que garantizó la estabilidad del terreno), la ausencia de ascensión capilar y despreciable conductividad hidráulica, características que garantizaron el aislamiento completo de aportes de agua, que estuvieran fuera del control experimental.

Considerando las recomendaciones de Chang (1968), citado por el boletín de la FAO de lisímetros, que sugiere dar énfasis en ciertos requisitos de diseño y operación de los lisímetros para obtener datos confiables de evapotranspiración de cultivos sin protección; es necesario mencionar que sólo se tomó en cuenta la primera, que indica que los lisímetros “deben ser suficientemente grandes y profundos para reducir el efecto de los límites y restricciones al desarrollo radicular”, debido a que el ambiente protegido por su diseño proporcionaba condiciones únicas, en el entendido que la dimensión completa de cada unidad serviría de referencia & aplicación simultánea.

4.3.3.4. Preparación del sustrato

Se consideró que la capa aprovechable del sitio de trazado y excavación, no era apta para su utilización como sustrato de cultivo de hortaliza, por lo que se extrajo de un terreno contiguo (en el orden de ubicación de las unidades), suelo que en la gestión pasada fue utilizada por cultivo de cebada.

Se incorporó abono debido a sus características en el uso más eficiente del agua:

- Mejora la infiltración
- *Reduce la evaporación del suelo*
- Estimula el crecimiento del sistema de raíces (en suelos de textura fina)
- Fomenta el calentamiento por el color (importante en el balance térmico) ⁵
- Retiene humedad (en suelos de textura gruesa)

Se utilizó como abono estiércol de ovino y solo por razón de mejorar la estructura, infiltración, retención de humedad y calor. Por recomendación de Ing. Rafael Días se preparó 1 m³ secado previamente expuesto al sol durante 3 meses e incorporado 1 mes antes de la siembra. Sin ninguna aplicación de agua.

⁵ En los suelos oscuros existe mayor absorción de ondas infrarrojas y por lo tanto mayores temperaturas que al final resultan favorables. IICA, Química de suelos (1987)

4.3.3.5. Construcción de cubiertas

El siguiente paso a la construcción de los lisímetros fué el de armar las cubiertas, con el único material apto para cubrir invernaderos y carpas (Marca PLASMAR) denominado Agrofilm de 250 nm, cortado 3.40 m x 1.60 m y envuelto en un marco de madera (troncos de eucalipto de 1.5 pulgadas) de 3.20 m x 1.40 m, que una vez unidos fueron sujetos para cubrir la cama con una pendiente del 10 % provocada por un borde de 51 adobes.

4.3.4. Labores de cultivo

4.3.4.1. Siembra

Según criterio de máxima utilización del mínimo espacio disponible en camas bajas cubiertas, diámetro de raíz, distancia mínima entre surcos y distancia mínima entre plantas, se procedió de acuerdo a las densidades establecidas en el diseño a disponer longitudinalmente los surcos, enterrando 2 minúsculas semillas de la variedad Dark red Detroit de beterraga a 2 cm de profundidad, previa remoción y nivelación (pendiente 0) completa del sustrato, vale decir, que para propósitos del experimento luego de incorporado el abono solo se removió el sustrato luego de incorporado y momentos antes de la siembra, teniendo el cuidado de no pisar el terreno, para no compactarlo y cambiar la densidad aparente del mismo. Para lo cual se adecuaron todas las unidades con espacios y soportes móviles que sirvieron de apoyo para una tabla que sostuvo nuestro cuerpo mientras se realizaba la rutina.

Terminada la siembra y considerando la ventaja de utilizar mulchs especialmente en la fase inicial, se cubrió el suelo con paja (paja brava) recolectada de los alrededores de la estación y esparcida delicada y medianamente espaciada de forma perpendicular a los surcos.

Finalizada la colocación del mulch se procedió a la aplicación del primer riego. Se describe en detalle las aplicaciones de riego en el subtítulo de Operación de los lisímetros.

Para establecer las distancias se utilizaron 3 reglas graduadas: 2 de 2.8 m de largo, que longitudinalmente paralelas sirvieron de marcos laterales fijos para la tercera de 1 m de largo.

4.3.4.2. Retiro del mulch y raleo

Pasados 30 días después de la siembra, considerando el inicio de la fase de desarrollo con una altura de 10 cm, se procedió a retirar el mulch y realizar el raleo que consistió en arrancar manualmente en el 99 % de los casos una de dos plantitas que emergieron, para dar lugar al desarrollo de una sola planta en cada lugar de siembra y para obtener la densidad necesaria.

Se observó en algunos casos el doblado de tallitos, malformación que se mantuvo hasta la cosecha, que finalmente determina la calidad del producto de consumo observándose que las raíces de estas plantas tienen formas más alargadas de lo normal y con el cambium endurecido.

Como se mencionó anteriormente, en esta fase del manejo también se tomó el cuidado de no pisar el suelo para evitar cambios en la densidad aparente del sustrato.

4.3.4.3. Labores culturales

Se consideró la pertinencia del escardado y desmalezado en el ciclo del cultivo y variedad luego del raleo realizado, tomando cuidado de no pisar el sustrato y afectar las propiedades físicas del sustrato. Se realizó únicamente dichas labores a los 45 días de la siembra y de ahí en adelante cada 7 días hasta los 85 días, día en que se advierte la inexistencia de malezas. Se procedió a la escarda de los espacios entre plantas, sin embargo esta actividad fue detenida a partir de los 55 días, por advertirse la formación del producto radicular y a objeto de no afectar la zona radicular y la máxima capacidad de absorción del cultivo, así también, la transpiración del cultivo.

4.3.4.4. Control de plagas y enfermedades

Durante la fase inicial y media de desarrollo del cultivo de la Variedad de Remolacha, se observó la presencia de hormigas y orugas defoliadoras, con una afectación mínima, que luego fue completamente reducida en las siguientes fases, sin embargo dada la expectativa del grado de daño al cultivo, se procedió a identificar el nido de hormigas en una zona contigua a las unidades y a eliminar el mismo por medios físicos. La especie de oruga no identificada, no requirió de mayor control que el de la eliminación manual y debido a que su población disminuyó notablemente luego de un evento de precipitación pluvial.

4.3.5. Cosecha

La bibliografía consultada recomienda que la cosecha puede realizarse cuando el cultivo tiene entre 110 y 140 días de haberse sembrado. El tamaño ideal de la raíz es cuando alcanza un diámetro medio de 6 cm. Observado el máximo desarrollo del cultivo, se procedió a realizar la cosecha del cultivo en el día 111, realizando en primera instancia la cosecha del surco central de cada unidad para luego retirar el resto registrando de esta manera los pesos parciales y totales de las raíces y de la materia vegetal, realizándose el corte del tallo a aproximadamente 2 cm de la base del mismo. Para dicho fin se utilizó una balanza comercial de máxima capacidad de 30 kg.

4.3.6. Control ambiental

Debido a las elevadas amplitudes térmicas que caracterizan el clima del altiplano boliviano el diseño de la cubierta requiere de un sistema de control ambiental que regule la extrema elevación y las pérdidas de

calor y humedad. Y siendo que un mecanismo automático está lejos del alcance de nuestros recursos se procedió a la apertura y cerrado de tapas diaria.

4.3.7. Metodología de mediciones y registros

De acuerdo a la disponibilidad de los instrumentos citados en la lista de materiales, se concretó la lectura de los siguientes parámetros durante el periodo de 110 días. Registros de datos tomados del Suelo, Ambiente interno, Ambiente externo y Cámara de drenaje.

Datos del suelo

- Tensión de humedad del suelo
- Temperatura máxima diaria del suelo
- Temperatura mínima diaria del suelo

Datos del ambiente de la CBC

- Humedad relativa máxima diaria
- Humedad relativa mínima diaria
- Temperatura máxima diaria
- Temperatura mínima diaria
- Intensidad de luz en el dosel

Datos de la cámara de drenaje

- Agua de drenaje

Datos del ambiente externo

- Humedad relativa horaria (h. de luz)
- Temperatura horaria (h. de luz)
- Humedad relativa máxima diaria
- Humedad relativa mínima diaria
- Temperatura máxima diaria
- Temperatura mínima diaria
- Intensidad de luz en la cubierta
- Evaporación diaria

Para la medición de las temperaturas se dispuso de cuatro termo higrómetros.

4.3.7.1. Medición de temperaturas dentro y fuera de las CBAs

Los dos instrumentos de medición proporcionados por el colaborador del estudio (nuevos) se ubicaron en el centro equidistante de una serie de los tratamientos, vale decir, en una repetición de las cuatro densidades contenidas en las CBAs. Dichos instrumentos fueron ubicados y reubicados al nivel del dosel del cultivo en cada fase de desarrollo del mismo. Así también y considerando que los mismos poseían un sensor externo para el registro de temperaturas máximas y mínimas, se instalaron dichos sensores de la siguiente manera:

- Un sensor en el exterior a 35 cm de altura del nivel de suelo, en una caseta (ver anexos) que cubría dicho sensor de la exposición solar.
- Un sensor en el exterior a 25 cm de altura del nivel de suelo, en una caseta (ver anexos) que cubría dicho sensor de la exposición solar.
- Dos sensores en el suelo de cultivo a 5 cm de profundidad.

Así también, se realizaba un control horario de las temperaturas, debido a que los instrumentos marcaban la temperatura actual.

4.3.7.2. Medición de humedad ambiental

De igual manera, los termo higrómetros registraron la humedad ambiental máxima y mínima diaria a nivel del dosel del cultivo.

4.3.7.3. Medición de la evaporación externa

Finalizado cada día y cerradas las tapas de todas las unidades se procedió a la medición del nivel de agua evaporada del tanque evaporímetro clase A, instalado en la estación, estas medidas eran realizadas con ayuda de una regla.

4.3.7.4. Medición de la insolación

Se realizó la medición de la radiación global en interior y exterior de la cama baja, expresada en Watts por metro cuadrado, con el uso del luxómetro portátil. La medición externa se realizó sobre el nivel de la cubierta, cuantificando la energía que llega a nivel del suelo externo y a nivel del dosel del cultivo dentro de la unidad.

4.3.7.5. Medición contenido de agua del suelo

Se consideró prioritaria la medición de la humedad del sustrato preparado, para lo cual se utilizó dos tensiómetros proporcionados por el colaborador del experimento. Dichos instrumentos facilitaron el control de la humedad hasta un nivel de 6 mca y la aplicación del riego. Los mismos fueron instalados y fijados por criterio personal uno a 10 cm de profundidad y el otro a 20 cm de profundidad en la unidad de tratamiento con mayor densidad, considerando que en la unidad con mayor densidad sería la de mayor consumo de agua y la de mayor velocidad de infiltración y por lo tanto sería más evidente el requerimiento de riego, así también debido a la escasa o nula penetración de luz al sustrato preparado, que limita o anula la fracción de agua evapotranspirada, así también la ascensión capilar.

Cuadro 9 Rutina diaria de manejo y medición

Hora	Rutinas	Densidad	Unidades
8:00	Apertura de tapas	Todas	12
8:00	Tensión de humedad del suelo	1	1
8:00	Riego	Todas	12
8:00	Agua de drenaje	Todas	12
8:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> Temperatura Humedad relativa </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> Intensidad de luz fuera Intensidad de luz dentro </div>	1 y 4	2
9:00		1 y 4	2
10:00		1 y 4	2
11:00		1 y 4	2
12:00		1 y 4	2
13:00		1 y 4	2
14:00		1 y 4	2
15:00		1 y 4	2
16:00		1 y 4	2
17:00		1 y 4	2
18:00	Agua de drenaje	1 y 4	2
18:00	Temperatura máx-min diaria del suelo	1	1
18:00	Temperatura máx-min diaria fuera a 35 cm	1	1
18:00	Temperatura máx-min diaria fuera a 25 cm	1	1
18:00	Temperatura máx-min diaria dentro	1, 2, 3 y 4	4
18:00	Humedad relativa máx-min diaria	1 y 4	2
18:00	Evaporación diaria	Tanque	1
18:00	Cierre de tapas	Todas	12

4.3.7.6. Medición del potencial matricial

Previo al uso de los tensiómetros se procedió a calcular los parámetros de manejo, en base a la información de laboratorio (ver cuadro de análisis de presión de placas), que para diferentes presiones dio como resultado la curva de retención de humedad (ver gráfico 1). Los tensiómetros de vacío se comprobaron exponiendo ambos tensiómetros al aire libre, observando luego de un corto tiempo (minutos) el ascenso de las lecturas hasta aproximadamente 50 centibares (unidades de medición del modelo), casi inmediatamente se sumergieron las cápsulas porosas del extremo inferior en agua pura y se observa una rápida disminución de las lecturas hasta 50 cbar y seguidamente 0 cbar.

Por recomendación técnica y disponibilidad de recursos se utilizaron 2 tensiómetros de 35 cm de largo (ver anexo)⁶ de uso permanente, uno instalado a 20 cm de profundidad y el otro a 10 cm de profundidad, en una repetición de densidad mayor. En todo el desarrollo del experimento se realizó las mediciones a primeras horas de la mañana.

⁶ marca IRROMETER (industria de los Estados Unidos de América E.U.A.)

En la fase final del ciclo de cultivo pasado el registro de 6 mca, debido a un registro erróneo de tensiones se realizó la medición de cantidad de humedad por el método de gravimetría, que llevada a la curva de retención de humedad indicó el nivel de tensión para la elaboración y análisis de resultados.

El primer tensiómetro utilizado, fue instalado y ubicado a profundidad de 20 cm, es decir casi en el límite inferior del sustrato, se utilizó para el control de la tensión baja necesaria cercana a la salida inferior de la misma cama baja atemperada.

4.3.8. Manejo analítico de los parámetros de respuesta

4.3.8.1. Variables de respuesta

Las variables de respuesta se dividen en tres grupos. Las variables hidrodinámicas se determinaron principalmente por la cuantificación del potencial del suelo; las variables agronómicas como las microclimáticas permitieron explicar la dinámica desarrollada dentro de las Camas Bajas Atemperadas:

4.3.8.2. Balance hídrico

En base a los datos de potencial matricial se hallaron los valores correspondientes a los términos del Balance Hídrico considerando el contenido inicial de agua, riego durante el periodo total, contenido final o residual y volumen recolectado por Lisimetría, todo dentro del volumen de control que fue el sustrato de siembra de cada unidad experimental. Así mismo, por su geometría, en la Cama Baja Atemperada no ingreso agua de lluvia o de escorrentía, así que esos componentes se consideraron. El balance hídrico matemáticamente se determinó con la función FAO, modificado para el presente trabajo (ver Ecuación 26). En la cual los términos de Ascensión Capilar, Escorrentía Superficial y Precipitación fueron inexistentes debido al diseño de CBAs adaptadas. Además, ya que el Balance Total se calculo sobre la base de datos finales, la depleción diaria o instantánea se hace nula.

$$I - DP = ET_c \quad (26)$$

Donde:

I_i irrigación neta del día i que infiltra totalmente en el suelo;
 ET_c evapotranspiración del día i ; y
 DP_i es la percolación profunda del día i .

4.3.8.3. Balance de energía

Las relaciones energéticas existentes en las Unidades Experimentales, y su correspondiente balance, se determinaron por medio de las ecuaciones (7) hasta la (17).

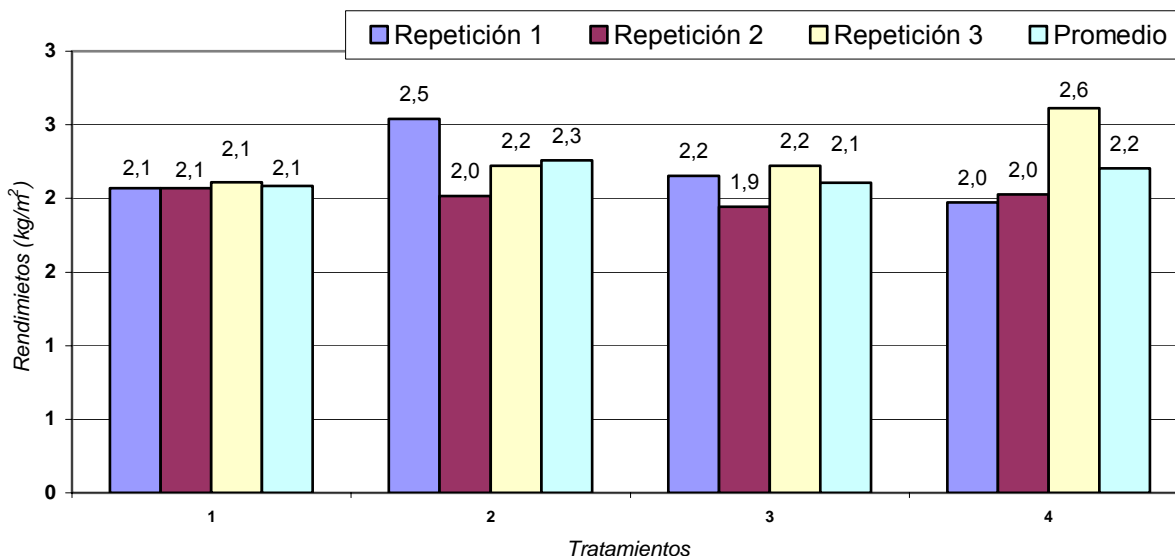
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan resultados del análisis de rendimientos de raíz entera (peso materia fresca), temperaturas y humedades registradas durante el ciclo de cultivo, así como del balance de energía, el comportamiento del potencial matricial, la evapotranspiración y percolación medidos por lisimetría, así también, el riego neto y balance de agua del suelo y los factores que influyen en la evapotranspiración y el rendimiento de raíz entera obtenidos en un periodo para todas las unidades de 111 días.

5.1. Rendimientos

Se evaluaron los rendimientos, dando como resultado, tal como se muestra en el Gráfico 3, que el tratamiento 2 se diferencia con un valor de 2.3 kg/m², siguiéndole el tratamiento 4 con 2.2 kg/m². El resto de los demás tratamientos muestran rendimientos mas bajos con límite inferior de aproximadamente 2 kg/m² similares a rendimientos registrados en los Valles, con un promedio de 2.2 TM/ha.

Gráfico 3 Rendimientos por tratamiento y repetición



Tal como se muestra en el Cuadro 10, el análisis de varianza realizado, indica que, a un nivel de significancia estadística del 82% si se hallaron diferencias entre los valores. Sin embargo, habiéndose observado mayor rendimiento en el rendimiento del tratamiento 2, para conocer si existen diferencias entre dicho tratamiento y los otros, se realizó el análisis de contrastes ortogonales del Cuadro 11.

Se obtuvo un coeficiente de variación de 4.35%, lo cual permite inferir que el cultivo fue manejado con eficiencia en cuanto a labores agronómicas se refiere.

Cuadro 10 Análisis de Varianza de Rendimiento

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	F - calculado	Probabilidad
Entre tratamientos	3	0.055	0.018	2.045	0.1861
Dentro de tratamientos	8	0.071	0.009		
Total	11	0.126			

Cuadro 11 Análisis de contrastes ortogonales de Rendimientos

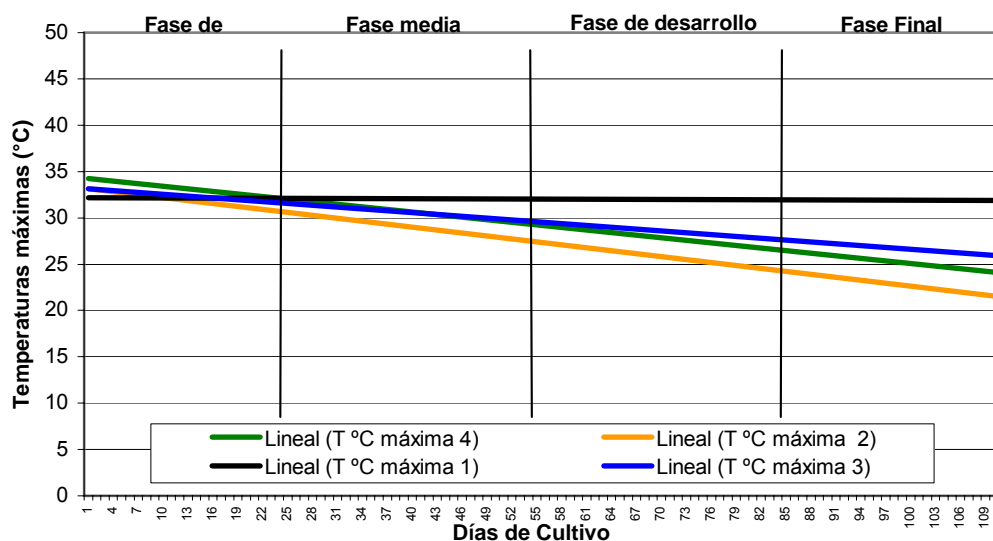
Tratamiento	Coficiente
1	-1.00
2	3.00
3	-1.00
4	-1.00
Probabilidad = 0.08	

El análisis demostró que a un nivel de significancia del 92% se determinaron diferencias significativas entre el tratamiento 2 y los otros tratamientos, resultado que nos lleva a inducir que los rendimientos de ese tratamiento fueron mayores a los demás, lo cual será analizado y explicado en relación al balance de agua, energía, microclima y densidades en los párrafos posteriores.

5.2. Variables climáticas

5.2.1. Temperaturas máximas

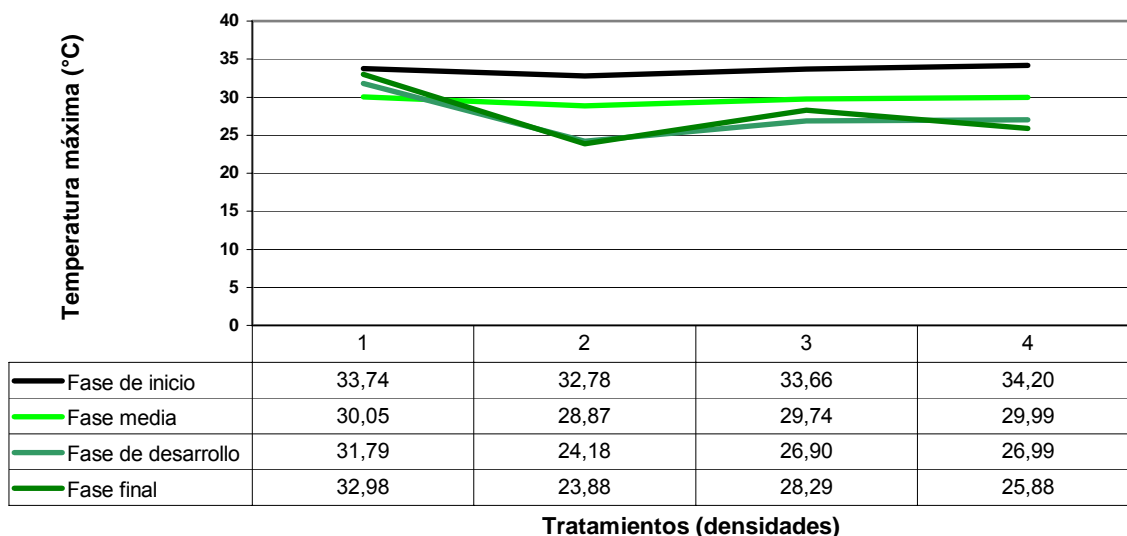
Los promedios extremos variaron desde los 33.74 °C hasta 23.88 °C, observándose que las temperaturas máximas en los cuatro tratamientos descienden durante el periodo de cultivo, como muestra la gráfica de tendencias, así también se observa a partir de la fase media del cultivo de Beterraga que el primer tratamiento mantiene una tendencia constante no coincidente con los demás tratamientos, sin embargo el tratamiento 2 muestra la tendencia de descenso mayor en relación con los demás tratamientos.

Gráfico 4 Líneas de tendencias de temperaturas máximas

Se observó asimismo, como muestra el gráfico 4, una disminución de los valores medios considerados para cada fase en proporción inversa al número de plantas manejadas en cada tratamiento en las fases de

desarrollo y la fase final, lo cual puede explicarse en la primera fase por la cobertura de paja utilizada para la emergencia y en la segunda fase por una alta concentración de humedad debido a que la fracción de evaporación del suelo es mayor por el retiro de la cubierta de paja y proporcional a su calentamiento y a que la medición de los registros se realizaba al nivel inmediato del dosel del follaje, lo cual significa mayor cercanía a la superficie evapotranspirativa y menos impacto de corrientes de aire que afecten el registro de temperaturas máximas. Así también, se observó en las fases de inicio y media tendencias que muestran una disminución de los valores, esto debido principalmente a el crecimiento en talla de las plantas del cultivo, la disminución de la fracción de evaporación del suelo y la incidencia de aire del exterior en los instrumentos, siendo más notoria esta disminución en el tratamiento 2 en estas fases. Asimismo, correlacionando los datos de temperaturas máximas y los resultados de evapotranspiración de los cuatro tratamientos no se observa correlación significativa entre los valores, sin embargo se observó correlación baja de valores de estas variables en la fase media, seguidamente en la fase final no así en el resto de las fases de cultivo, resultados que nos permiten inferir que los valores registrados en ambas fases influyeron en parte en el proceso de evapotranspiración. Finalmente, correlacionando para esta variable los valores de temperaturas máximas del exterior de las unidades registradas con un sensor de dos de los instrumentos (ver croquis), se observa que no existe correlación entre dichos valores, de cuya interpretación se puede señalar que las temperaturas máximas registradas dentro de las CBAs no encuentran su registro al mismo tiempo que las temperaturas registradas en el exterior y su ocurrencia no es función de la variable externa.

Gráfico 5 Medias de temperaturas máximas en las fases de cultivo

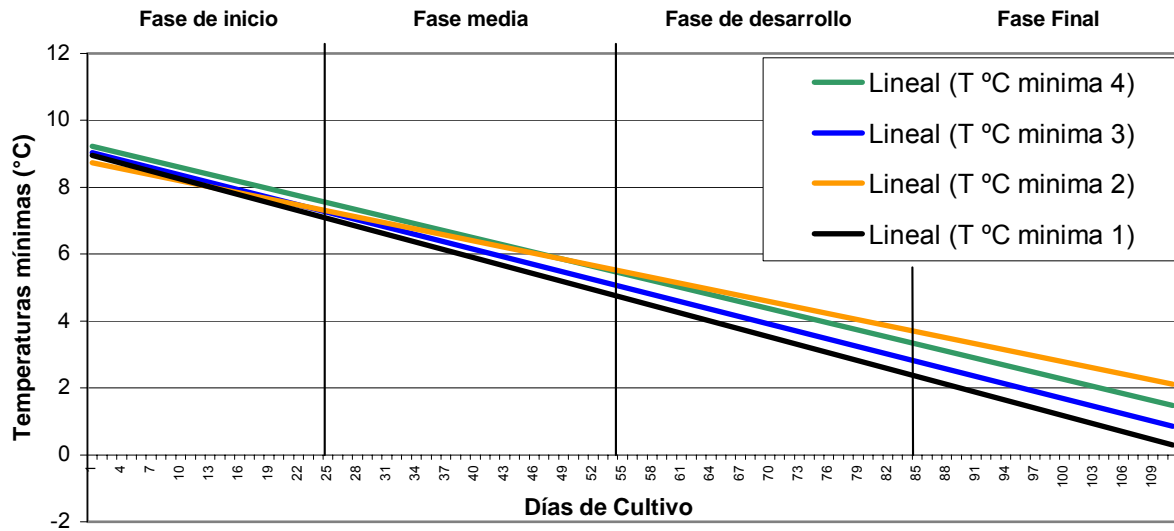


5.2.2. Temperaturas mínimas

Los promedios extremos variaron desde 8.12 °C hasta 1.06 °C observándose que las temperaturas mínimas muestran una tendencia general de descenso durante el periodo de cultivo, como muestra el gráfico 6 , sin embargo también se observa que a partir de la fase de desarrollo diferencias entre tratamientos y un mayor descenso de las temperaturas en el primer tratamiento, no así en el segundo tratamiento que muestra una tendencia de menor descenso de dicha variable, con una diferencia estrecha de plantas entre ambos

tratamientos.

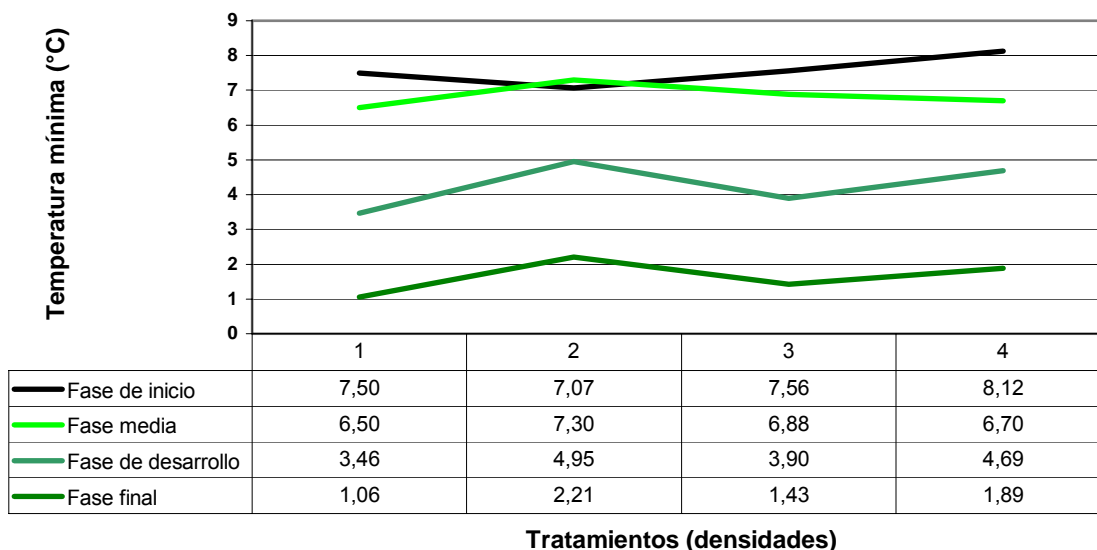
Gráfico 6 Líneas de tendencias de temperaturas mínimas



Se observa una tendencia general de disminución de los registros de los cuatro tratamientos con variaciones de incremento y descenso regulares en todo el ciclo del cultivo, diferencias marcadas en los primeros 30 días (tiempo de utilización del mulch de emergencia) y registros uniformes a partir del retiro de la cubierta de paja. Dichas variaciones podrían explicarse por la reducción de las resistencias aerodinámica y superficial (bulk) por la cobertura de paja sobre las plántulas emergentes y el mayor espacio de volumen no ocupado (libre de follaje) por vegetación. En estos primeros días asimismo se observa que los tratamientos 3, 2, 1 y 4, muestran diferencias en su tendencia de descenso, en orden de más bajos registros.

A partir del retiro de la cubierta de protección de emergencia se observa que los registros son muy próximos a los registros medios diarios, asimismo un uniforme descenso, siendo evidente diferencias en los tratamientos 2, 4, 3 y 1 en orden descendente y casi sin variaciones en las diferencias hasta el final del ciclo de cultivo, se destaca que el tratamiento 2 registro los valores más altos de esta variable, permitiendo que las plantas de ese tratamiento tengan condiciones relativamente mejores en cuanto a la temperatura en horas de la noche y al amanecer, contribuyendo en el mejor rendimiento, tal como se observó en el punto 4.1. Así también, es preciso destacar que el sensor externo y el sensor interno de la misma variable registraron temperaturas bajo cero en la última fase del ciclo y mostraron una correlación significativa entre los registros externos y al interior de las unidades medidos en la parcela experimental, así como los registros de la estación del IBTEN.

Gráfico 7 Medias de temperaturas mínimas en las fases de cultivo

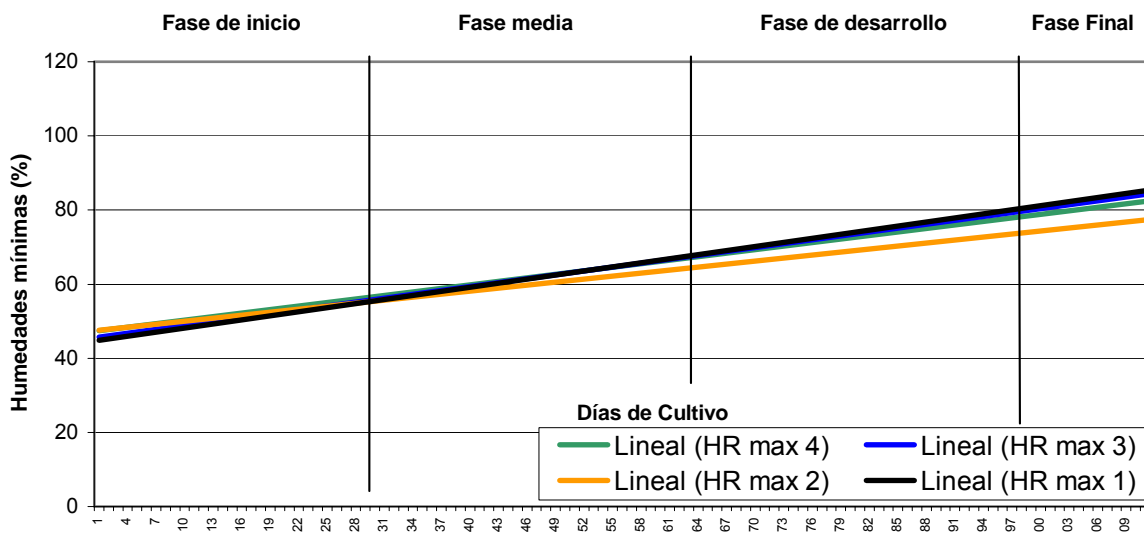


En el gráfico superior se observa que los valores medios considerados de los tratamientos descienden en cada fase del ciclo de cultivo hasta valor mínimo promedio observado en el tratamiento 1 de 1 °C, cuyo descenso es el menor en comparación con los demás tratamientos explicable en el mayor número de plantas, superficie foliar y humedad máxima, así como la disminución del tratamiento 2 es menor excepto en la fase inicial donde registra el valor medio menor en comparación con el resto de los tratamientos. Finalmente, se observó que los registros del microclima fueron inferiores a los registros de temperaturas del sustrato de cultivo.

5.2.3. Humedades relativas máximas

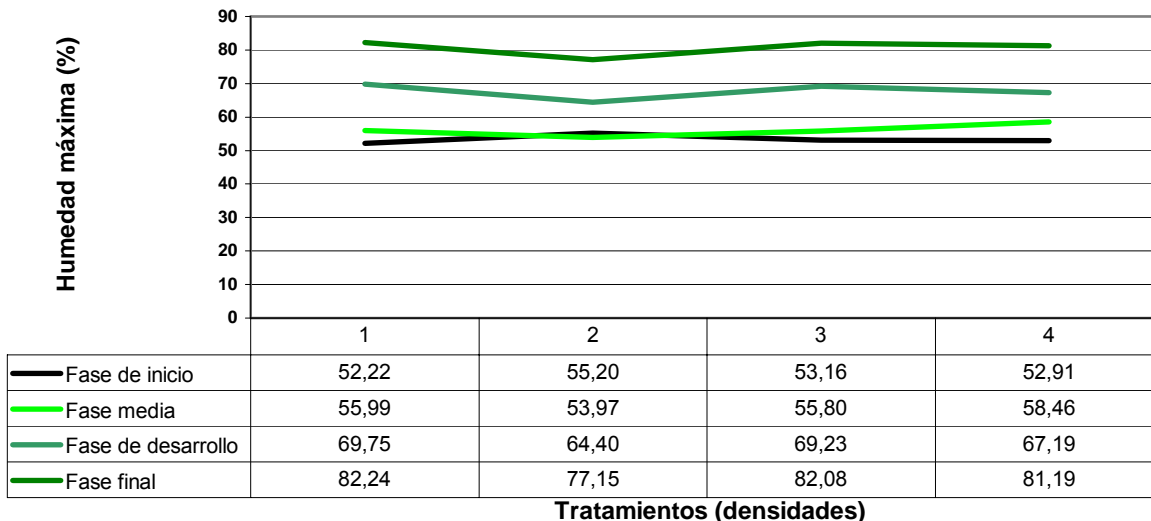
Los registros de humedades máximas en los cuatro tratamientos muestran una tendencia de incremento en cada una de las fases del cultivo, con valores medios muy similares entre tratamientos, proporcionales al crecimiento del follaje y con una alta similitud de los registros diarios. Se observa al igual que los registros de temperaturas máximas y mínimas variabilidad en los registros de la fase inicial y un periodo de la fase media, equivalente al periodo de cobertura en la fase de emergencia, previa al raleo.

Gráfico 8 Líneas de tendencias de humedades máximas



Se registraron valores medios con valores extremos de 82% y 53%, como muestra el siguiente gráfico, sin embargo del total de los registros se observan valores extremos de 95% y 43%, lo cual demuestra que las plantas no sufrieron stress de humedad en el ambiente.

Gráfico 9 Medias de humedades máximas en las fases de cultivo



Finalmente, se destaca que el segundo tratamiento a partir de la fase media registra los valores más bajos del resto, lo cual es indicador y fue determinante para el proceso de evapotranspiración del cultivo, como se analizará más adelante.

5.2.4. Humedades mínimas

Se observan valores medios que varían de 30% a 16% y registros extremos que variaron en el rango de 16% a 46% en todo el ciclo de cultivo, observándose también similitud de registros en las dos primeras

fases, distinguiéndose a partir del día 54 que los registros de los cuatro tratamientos presentan mayor variabilidad, diferenciándose a partir del día 72 dos tendencias extremas marcadas de asenso que al final del ciclo presentan el primer tratamiento con registros menores y el segundo tratamiento con registros mayores, luego de realizado el segundo aporque, el raleo y desmalezado, confirmándose una relación inversamente proporcional al déficit de presión de saturación de vapor de agua, que expresa una mayor estabilidad de la cantidad de vapor de agua en el tratamiento 2, lo cual probablemente podría expresar el “bulk” o resistencia superficial y tener una alta influencia en el mejor rendimiento expresado de dicho tratamiento.

Gráfico 10 Líneas de tendencias de humedades mínimas

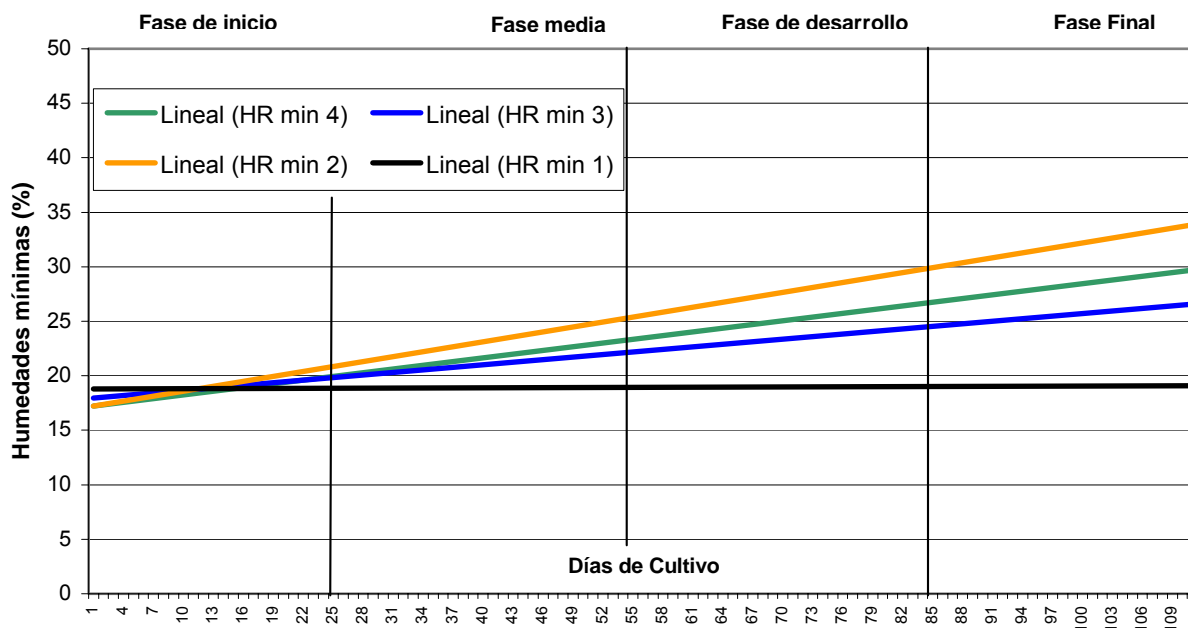
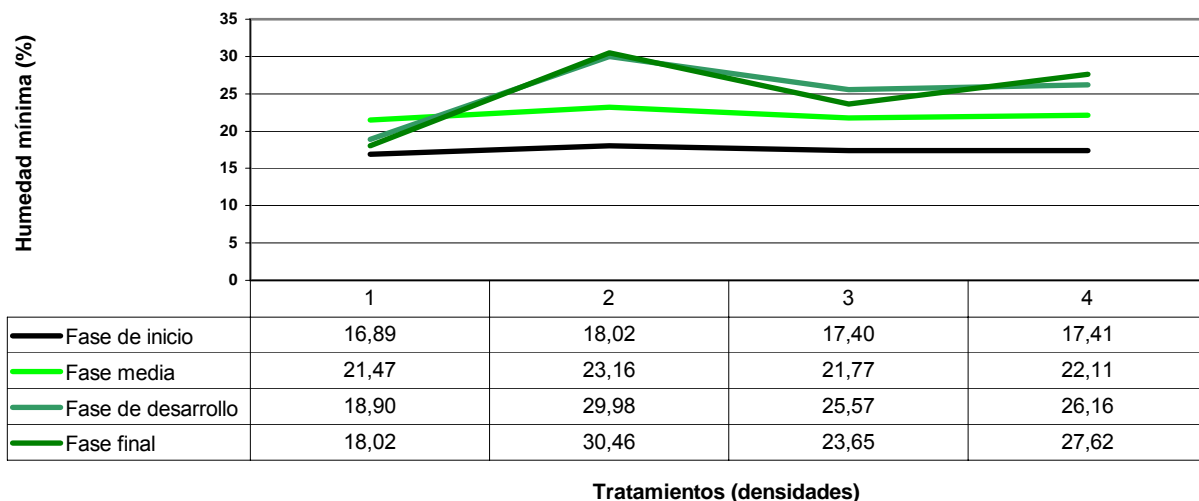


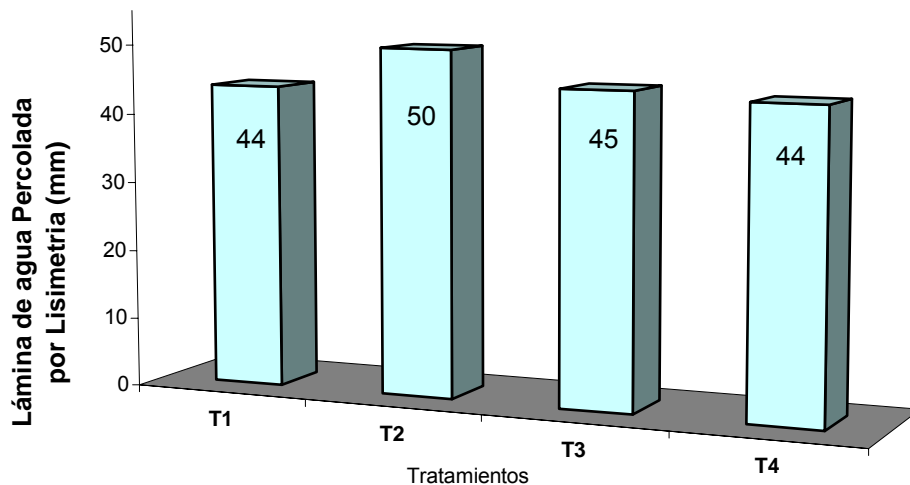
Gráfico 11 Medias de humedades mínimas en las fases del cultivo



5.3. Percolación por lisimetría

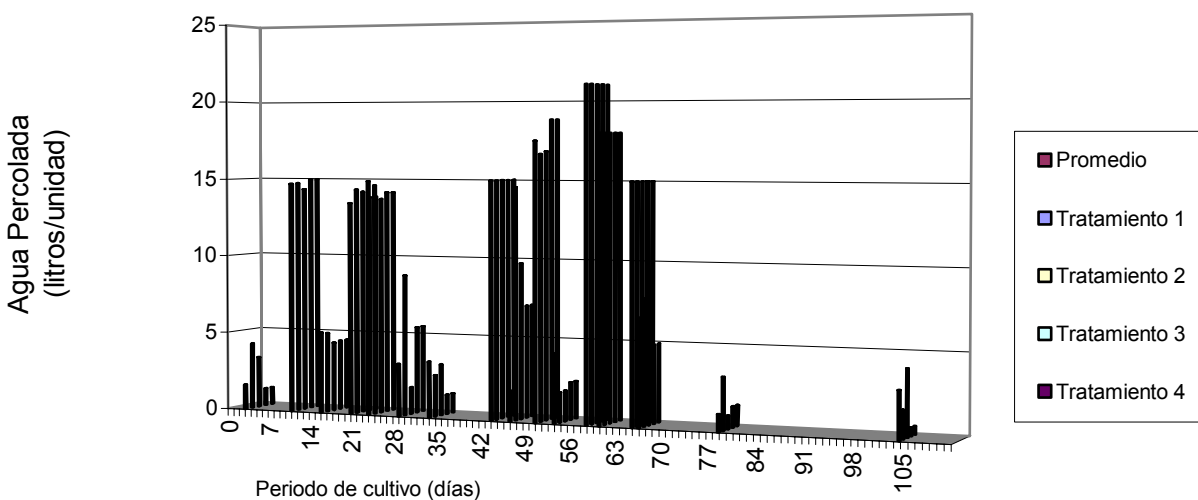
En términos de promedios, el estudio encontró que el tratamiento 2 fue el que mayor percolación por lisimetría tuvo con 50 mm, siendo que los restantes percolaron entre 44 y 45 mm, con intervalos irregulares en todos los tratamientos, sin embargo uniforme en su ocurrencia con extremos de 58 mm y 41 mm/m² y un total de 17 eventos de descarga.

Gráfico 12 Promedios de percolación (mm / m²)



Se observan mayores volúmenes de descarga en la fase inicial y en la fase de desarrollo, no así en la fase media y final, donde habiendo disminuido la frecuencia de riego no se presentaron eventos de percolación frecuentes como se observa en el gráfico siguiente. Esto se explica por el fenómeno por el cual el agua se almacena en el sustrato y llegado el límite de saturación precipita.

Gráfico 13 Eventos de percolación



Cuadro 12 Análisis de Varianza de Percolación

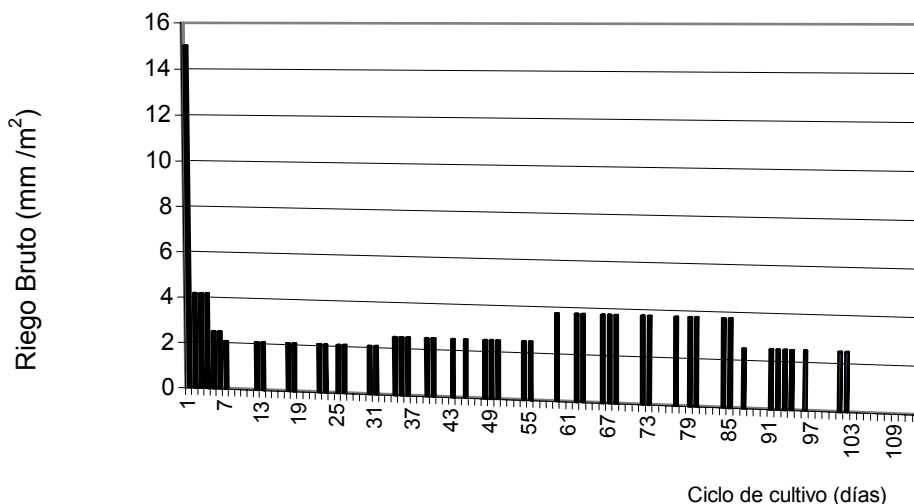
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	F - calculado	Probabilidad
Entre tratamientos	3	66.580	22.193	1.209	0.3671
Dentro de tratamientos	8	146.840	18.355		
Total	11	213.420			

El análisis de varianza revela que con una probabilidad de 64% y a un nivel de significancia de 95% no existen diferencias significativas. Así también, se obtuvo un coeficiente de variación de 9.35%, resultado que es indicador del manejo uniforme de los tratamientos, que como se explica en la sección de métodos del presente estudio, se caracterizó por el cuidado absoluto en mantener la estructura y densidad aparente del sustrato, habiéndose adaptado las unidades para la operación manual sin intervención del mismo.

5.4. Lámina de riego

La lámina total de agua aplicada a cada Tratamiento fue la misma, debido a la metodología que implicó un riego igual para todos los tratamientos (257 mm), equivalentes a 0.925 m³ durante todo el ciclo de estudio. Se debe considerar que al momento de la siembra la tensión matricial promedio fue 0,27 bar igual a 16m³/m³, contenido al cual se agregaron los riegos sucesivos.

Gráfico 14 Frecuencia de riego bruto



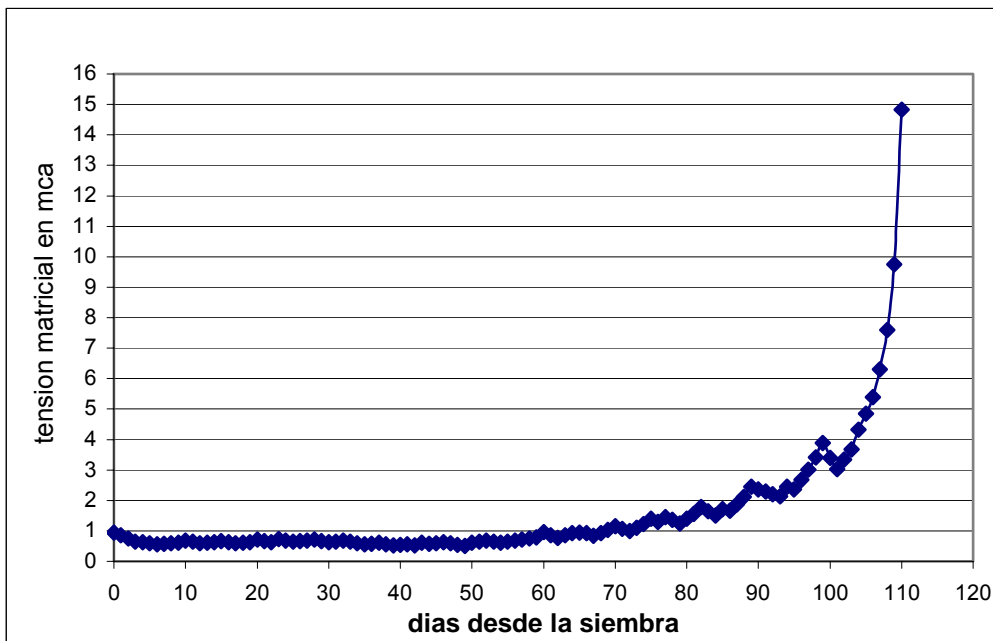
Es preciso señalar que en el manejo de riego para variedades de mesa en la fase final del cultivo no fue satisfactoria en su totalidad, por ser necesario disminuir la humedad del sustrato con el propósito de garantizar una maduración apropiada de las raíces, que implica menor turgencia de los tejidos externos y por lo tanto mayor resistencia a la manipulación y menor pérdida de agua del fruto una vez cosechado.

5.5. Comportamiento del potencial matricial

Los potenciales matriciales registrados en forma diaria, sirvieron como base, a partir de la cual se derivaron aspectos de la dinámica hídrica que tiene lugar en el sustrato. A partir de estos datos se determinaron los niveles de depleción o consumo diario, que ulteriormente se tradujeron en magnitudes de evapotranspiración total con el empleo de los datos de lisimetría.

Los gráficos siguientes, correspondientes a la evolución de los potenciales matriciales de los tratamientos, registrados a 10 cm de profundidad, que determinan el grado de depleción del sustrato, así también, el estado energético en forma de potencial en los cuales se señalan los momentos de irrigación, evidenciados por variaciones descendentes de tensión.

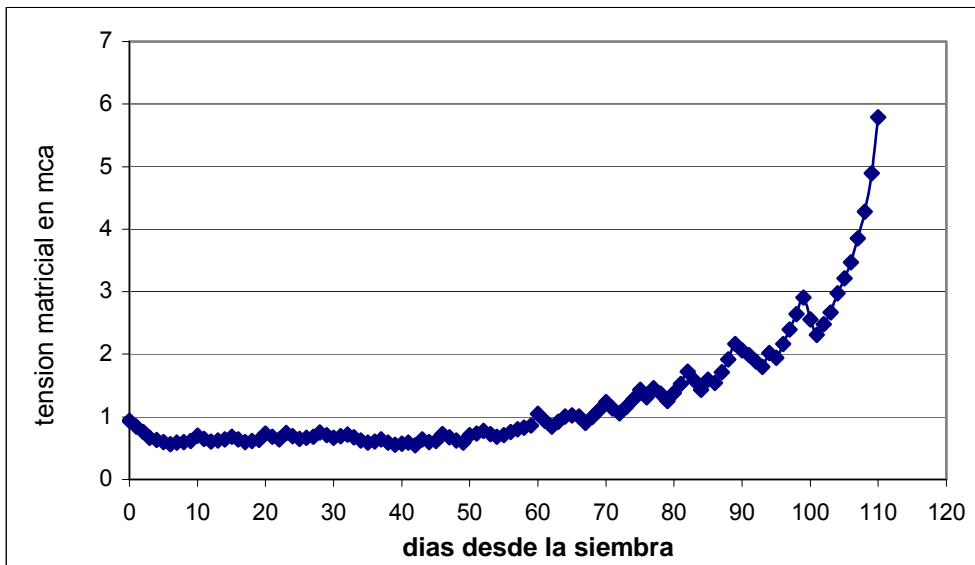
Gráfico 15 Evolución del potencial matricial del tratamiento 1



Se observa en el gráfico anterior que los registros de potencial matricial no sobrepasan el valor de 1 mca hasta el final de la fase media de cultivo, alcanzando un valor máximo de 15 mca al final del ciclo al momento de la cosecha. En comparación con el resto de los tratamientos fue el que registró valores de tensión con anticipación a la fase final de cultivo, así también el que mayores tensiones registró en la fase final, es decir mayores requerimientos de agua tuvo, que tendría explicación en el mayor número de plantas

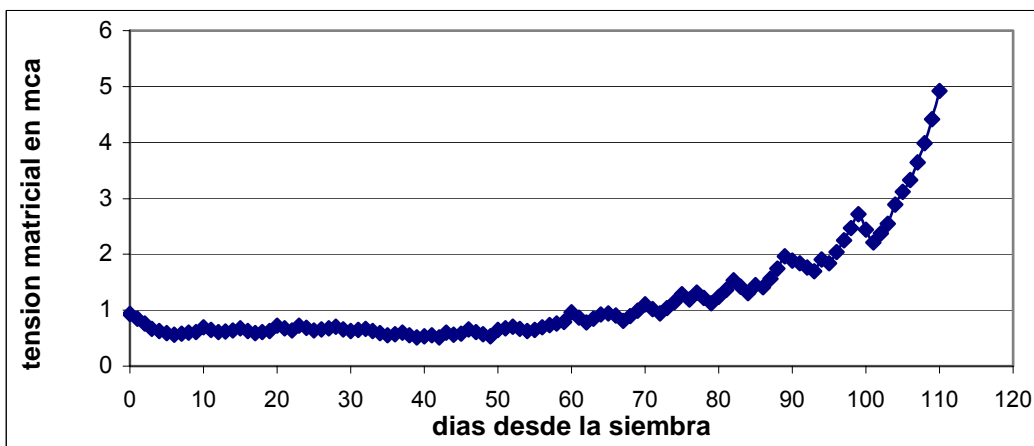
contenidas por unidad.

Gráfico 16 Evolución del potencial matricial del tratamiento 2



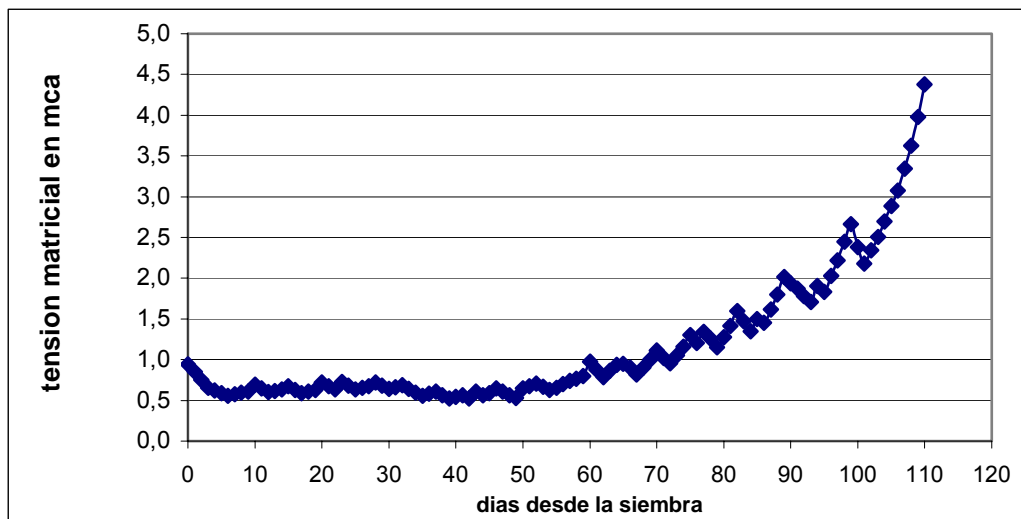
Se observa que el tratamiento 2 se distingue al igual que el tratamiento 1 por un incremento de la tensión matricial en la fase de desarrollo, así como alcanza un valor final de cercano a 6 mca.

Gráfico 17 Evolución del potencial matricial del tratamiento 3



El tratamiento 3 al igual que los tratamientos 1 y 2 registran incremento en los valores, sin embargo se observa que los mismos se presentan al finalizar la fase media, lo cual podría tener explicación en la menor superficie de suelo cubierta que por lo tanto incrementó la superficie de suelo expuesta y su correspondiente secado. Similar comportamiento de los registros es observado en el tratamiento 4, cuya densidad de plantas es la menor del experimento y cuyo valor terminal es inferior al resto de los tratamientos. La variación de tensiones finales de los cuatro tratamientos podría tener relación con la densidad de plantas por tratamiento utilizadas y la superficie de suelo expuesta a la radicación y su calentamiento.

Gráfico 18 Evolución del potencial matricial del tratamiento 4

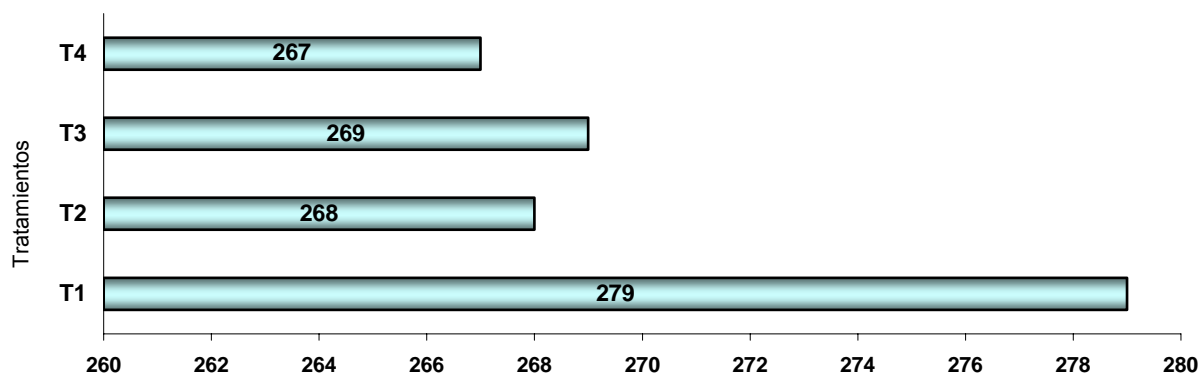


Analizando las tendencias en la evolución de potenciales de los gráficos anteriores, se puede observar que en las fases inicial y de desarrollo los valores no excedieron el valor de 1 mca, sin embargo a partir de las fases media y final se observa un ascenso de los valores, a consecuencia de un incremento de la demanda agua del cultivo en los 10 cm superficiales.

5.6. Riego neto

El riego neto que se aplico a los cuatro tratamientos por igual resultado de la aplicación de la formula Contenido Inicial (40 mm) mas el riego bruto efectuado durante todo el estudio (257) menos el contenido final que fue variable entre los tratamientos, empleando la formula de balance de masa hídrica.

Gráfico 19 Riego neto de tratamientos (mm)



El ANVA para esta variable indica que existen diferencias entre los valores de riego neto a un nivel de significancia de 99%. Así mismo, se obtuvo un coeficiente de variación de 2.79%.

Cuadro 13 Análisis de Varianza de Riego Neto

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	F - calculado	Probabilidad
Entre tratamientos	3	531.667	177.222	3.169	0.0853
Dentro de tratamientos	8	447.333	55.917		
Total	11	979.000			

Cuadro 14 Análisis de contrastes ortogonales de Riego Neto T1

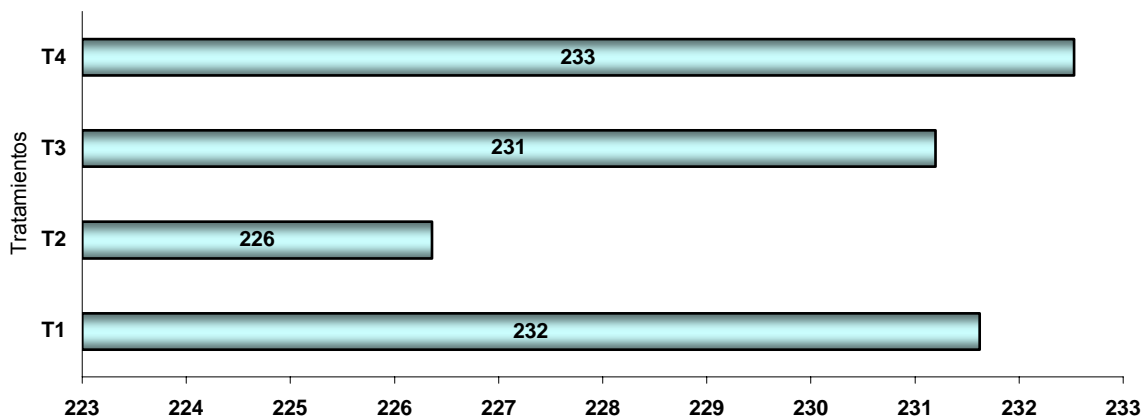
Tratamiento	Coefficiente
1	3.00
2	-1.00
3	-1.00
4	-1.00
Probabilidad = 0.026	

El análisis de contrastes ortogonales reveló que los tratamientos con menor densidad neta de cultivo (número de plantas por unidad) se diferenciaron del tratamiento 1 (el más denso), esto podría atribuirse a una mayor superficie foliar evapotranspirativa y/o tensión del potencial matricial como lo muestra la comparación de los gráficos de potencial matricial anteriores, a un nivel de 98% de significancia de los demás.

5.7. Evapotranspiración de cultivo

Como resultado del balance de agua se obtuvieron valores totales de Evapotranspiración de cultivo, que reflejaron la demanda ejercida al suelo y remolacha por las condiciones microambientales.

Gráfico 20 Evapotranspiración de tratamientos (mm)



El Gráfico 20, muestra los valores de la Evapotranspiración de cultivo hallados. Los valores para el Tratamiento 1 son de 232 mm y 226 para el tratamiento 2, el tratamiento 3, con 231 mm, y para el tratamiento 4 fue 233 mm.

Cuadro 15 Análisis de Varianza de Evapotranspiración (mm)

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	F - calculado	Probabilidad
Entre tratamientos	3	393.520	131.173	108.782	0.01
Dentro de tratamientos	8	9.647	1.206		
Total	11	403.167			

El Análisis de Varianza de la lámina evapotranspirada del cultivo, detallado en el cuadro anterior, indica que existieron diferencias entre los tratamientos, lo que demuestra la existencia de variabilidad del agua evapotranspirada en relación a los tratamientos, diferenciándose el tratamiento 2 de los demás por ser el menos evapotranspirativo. Se obtuvo un coeficiente de variación de 0.49%.

Al detectar que existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizó el análisis de contrastes ortogonales que demostró que el tratamiento 2 fue el menos evapotranspirativo. Así mismo, se halló que los tratamientos con filas más espaciadas (2 y 4) tan bien se diferenciaron de los otros.

Cuadro 16 Análisis de contrastes ortogonales de Evapotranspiración T2

Tratamiento	Coefficiente
1	-1.00
2	3.00
3	-1.00
4	-1.00
Probabilidad = 0.0	

Cuadro 17 Análisis de contrastes ortogonales de Evapotranspiración T2 y T4

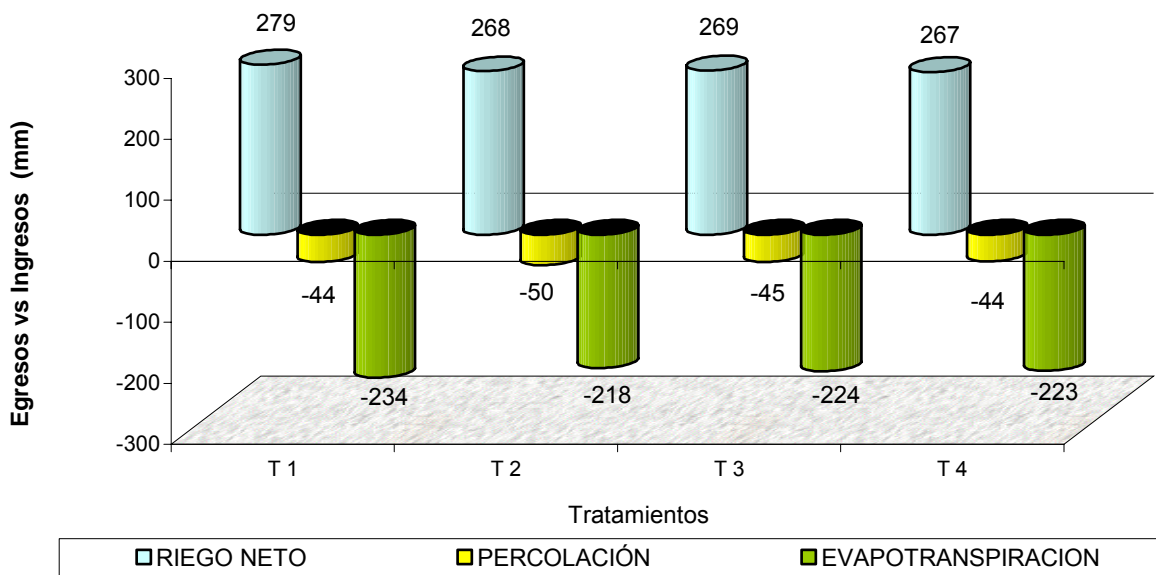
Tratamiento	Coefficiente
1	1.00
2	-1.00
3	1.00
4	-1.00
Probabilidad = 0.0	

El análisis de la dinámica hídrica y energética, conduce a señalar que la energía equivalente para Evapotranspiración (ver gráfico 20) fue menor en el tratamiento 2, lo que sumado a las condiciones térmicas y de humedad relativa en condiciones de alta irradiación en horas de la tarde, posibilitó un mejor desenvolvimiento de las plantas de ese Tratamiento, reflejándose así también en su rendimiento.

5.8. Balance de agua del suelo

El balance de agua para el substrato de las unidades experimentales, (ver gráfico 19) tuvo como único componente de aporte a la lámina de riego neto y como componentes de retiro a la evapotranspiración y a la percolación.

Gráfico 21 Balance de agua del suelo



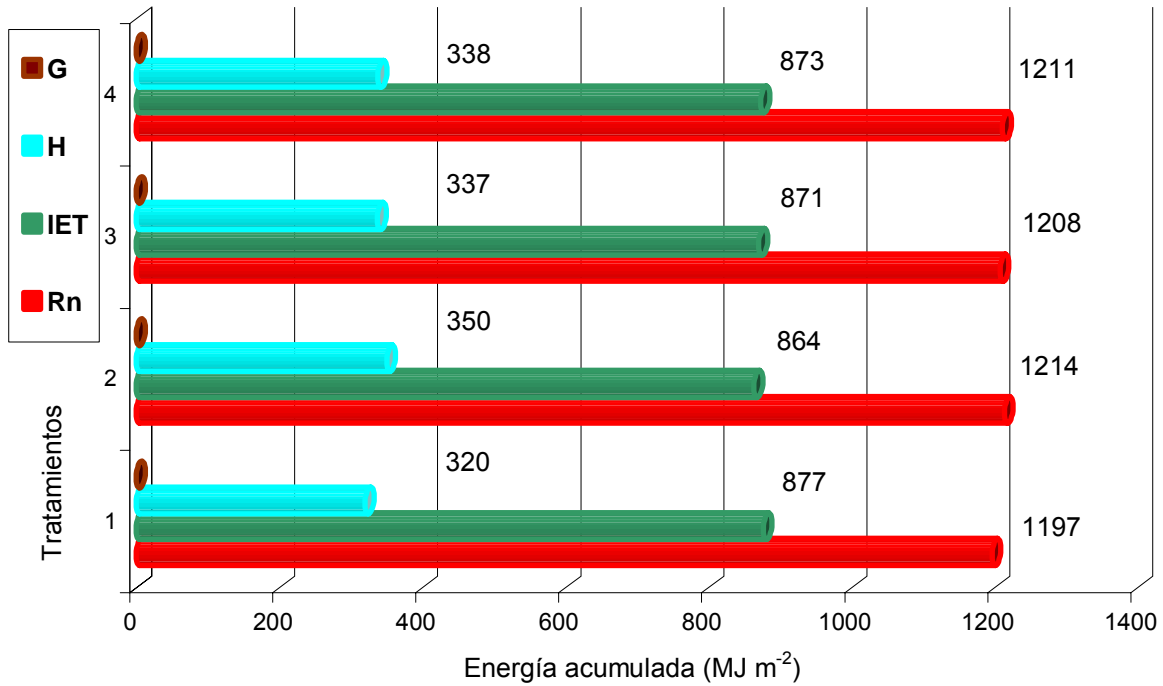
Partiendo de los análisis para cada componente del balance, citados anteriormente, y analizando el gráfico 21, se puede inferir que:

El agua percolada y el riego neto guardan mutua relación con la eficiencia en el uso de este recurso, confirmado con los resultados de evapotranspiración, que evidencian que la mayor pérdida de agua ocurrió a través de la superficie evapotranspirativa: siendo más representativa dicha eficiencia en el caso donde se obtuvo mayor rendimiento, el valor de evapotranspiración fue menor, existió mayor eficiencia energética y la pérdida por percolación fue menor, último factor que solo es posible controlar con instrumentos de precisión disponibles. De estos requisitos únicamente el tratamiento 2 (el que evapotranspiró menos) cumple casi la totalidad de los mismos, lo que demuestra que el uso interno de agua fue menor, esto principalmente debido a la uniformidad de empleo de agua por las plantas, por causa, en primer lugar a la densidad, ya que el espaciamiento de surcos permitió una eficiente regulación energética explicable por una proporción adecuada de superficie evaporativa y evapotranspirativa que posibilitó mayor resistencia superficial y aerodinámica y menor remoción de vapor de agua, seguido muy de cerca en términos de eficiencia por el tratamiento 4 que contó con similar distancia entre surcos, sin embargo este presentó menor rendimiento.

5.9. Balance de energía

El Balance de energía muestra que el Tratamiento que mas energía de origen solar almaceno es el 2 (1214 MJ/m²); sin embargo, es también el tratamiento que obtuvo la menor energía que posibilita la evapotranspiración, es decir λET con 864MJ/m².

Gráfico 22 Componentes acumulados del balance de energía de los tratamientos (MJ / m²)

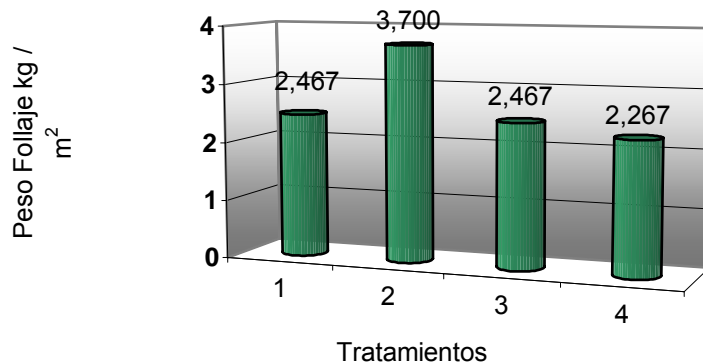


El análisis indica que el tratamiento 2 fue el que mayor energía neta tuvo, por efectos de la humedad y/o de la composición de la vegetación interna, que permitió un menor escape energético y así mismo, que como resultado de ello, generó condiciones de mejor eficiencia evapotranspirativa λET, mecanismos que fueron discutidos en relación al balance de agua posterior.

5.10. Morfología foliar en relación con la limitación de agua

Se tomó en cuenta la relación que existe entre la evaporación del suelo como componente de la evapotranspiración total. En ese sentido, los resultados del follaje fresco (pecíolos y hojas) obtenido de los tratamientos revelaron que, coincidentemente con el mejor rendimiento de raíz (tratamiento 2), el mayor follaje también correspondió a este tratamiento. Esto es importante para analizar el efecto de esta cobertura foliar que permitió la disminución de evaporación de este tratamiento.

Cuadro 18 Promedios de peso follaje (pecíolos y hojas)



5.11. Interrelaciones que influyen en el rendimiento de la planta

Un análisis de las relaciones existentes entre la temperatura, la humedad relativa, la energía proveniente del sol (Rn) que posibilita la evapotranspiración; la evapotranspiración en si misma (ETc), la cantidad de agua aplicada como riego neto (Ri); y el follaje que determina las proporciones de evaporación y transpiración muestra que influyen también en forma determinante en el rendimiento. Tales interrelaciones explican de mejor manera el comportamiento productivo de la planta. En ese sentido, la regresión múltiple ($r^2 = 0.735$) muestra la importante influencia de los factores considerados:

Donde: R es el Rendimiento (kg/m²)
 Rn es la Radiación neta del periodo (MJ/m²)
 ETc es la Evapotranspiración de cultivo
 Ri es el riego neto total, (mm)
 T med es la temperatura media (°C)
 Hr med es la humedad relativa media (%)
 Follaje es la masa de follaje de cada tratamiento

$$\text{Rendimiento} = 18.149448 + 6.2004e-002 \text{ ETc} - 4.2732e-002 \text{ Rn} + 1.2740e-003 \text{ Ri} - 5.7083e-001 \text{ T}^\circ \text{ med} + 7.1631e-001 \text{ H}^\circ \text{ med} - 6.2166e-003 \text{ Follaje}$$

$$\text{Coeficiente de Determinación } (r^2) = 0.735$$

Cuadro 19 Análisis de Varianza de componentes de Regresión Rendimiento

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F - calculado	Significancia
Regresión	0.092410	6	0.01540	2.31	0.188
Residual	0.033282	5	0.00666		
Total	0.125692	11			

5.12. Correlación entre factores que afectan al rendimiento

En cuanto a los factores que mas afectan al rendimiento, el cuadro 15 muestra que la radiación neta jugo el papel mas importante como factor que incrementa el Rendimiento positivamente, seguido por la humedad relativa y por el follaje.

Cuadro 20 Matriz de Correlación

	4	5	6	11	14	16
3	-0.490	0.581	0.046	-0.499	0.447	0.356

4 ETc
 5 R n
 6 Ri
 11 T med
 14 H med
 16 Follaje
 3 Rendimiento

Los resultados de este análisis estadístico comprueban el análisis realizado y prueban la importancia de la regulación hídrica por la cantidad de biomasa o follaje del cultivo (densidad).

5.13. Interrelaciones que afectan a la Evapotranspiración

Así también, un análisis de las relaciones existentes entre la temperatura, la humedad relativa, la energía proveniente del sol (R_n) que posibilita la evapotranspiración, la cantidad de agua aplicada como riego neto (R_i); y el follaje que determina las proporciones de evaporación y transpiración, muestra que influyen también en ambos componentes (ET_c). En ese sentido, la regresión múltiple ($r^2 = 0.984$) muestra la importante influencia de los factores considerados y el grado de relación al momento de su manifestación.

$$ET_c = -599.945902 + 9.7499e-001 R_n + 5.5289e-002 R_i + 9.5018e+000 T_{med} - 1.2222e+001 H_{med} + 3.6497e-001 Follaje$$

$$\text{Coeficiente de Determinación } (r^2) = 0.984$$

Cuadro 21 Análisis de Varianza de componentes de Regresión Evapotranspiración

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F - calculado	Significancia
Regresión	396.759317	5	79.35186	74.31	0.000
Residual	6.407523	6	1.06792		
Total	403.166840	11			

5.14. Correlación entre factores que afectan la Evapotranspiración

En cuanto a los factores que mas afectan la evapotranspiración, el cuadro 20 muestra que el riego neto jugo el papel mas importante como factor que afecta la evapotranspiración positivamente, seguido por la temperatura, así como la radiación neta y la humedad relativa como reguladoras de dicho proceso. Esto se puede entender debido a que la provisión de agua es determinante en la dinámica microclimática, así como las condiciones externas también.

		Cuadro 22 Matriz de Correlación					
		5	6	11	14	16	
5	Rn						
6	Ri						
11	Tmed						
14	Hmed	4	-0.976	0.539	0.443	-0.910	-0.204
16	Follaje						
4	ETc						

5.15. Evaporación tanque clase A vs evapotranspiración de las Camas Bajas Atemperadas

En las fases inicial, media y final se observa que la proporción de evaporación de los tanques clase A es superior en relación a la evapotranspiración media de las camas bajas atemperadas, sin embargo dicha proporción en la fase de desarrollo casi es equivalente con los resultados del tanque utilizado en la

comunidad de Contorno y no se ha observado correlación general entre los valores de los tanques y de las CBAs. Las siguientes gráficas muestran dicho comportamiento.

Gráfico 23 Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase inicial

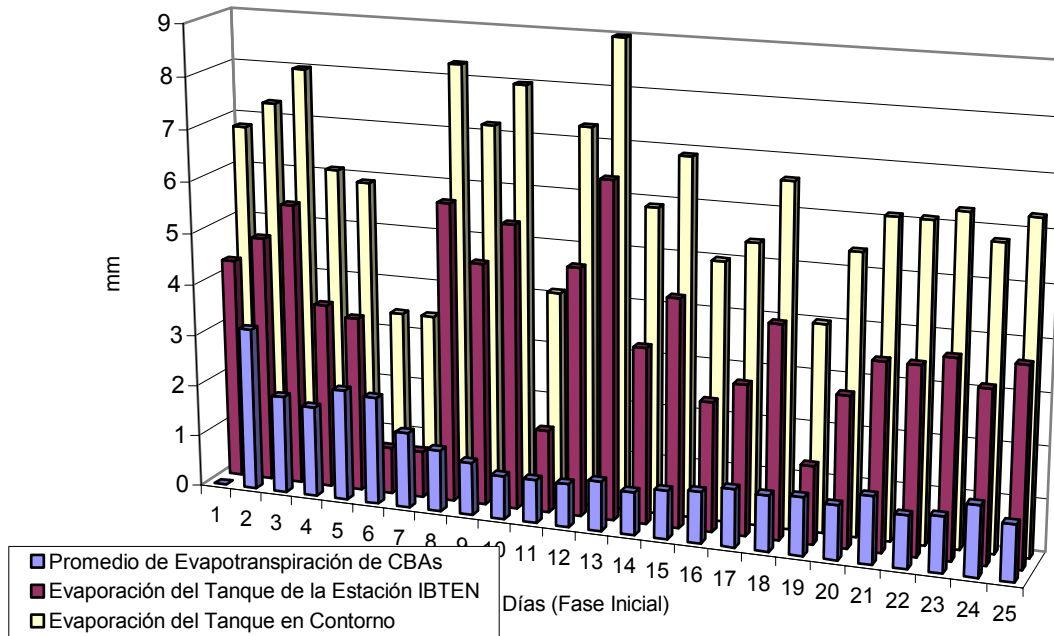


Gráfico 24 Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase de desarrollo

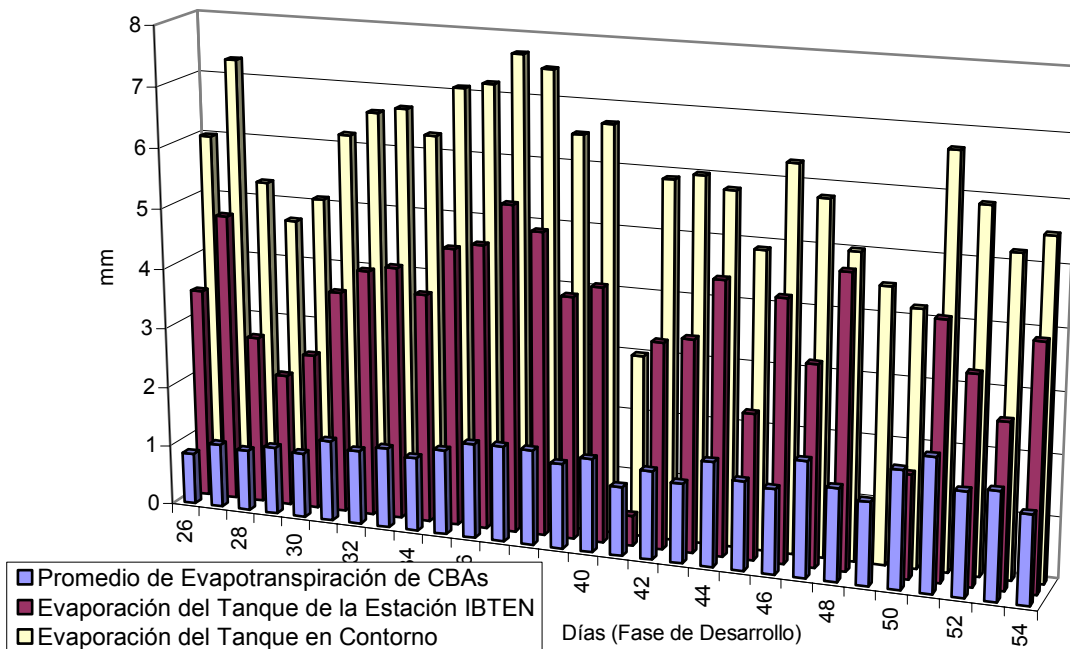


Gráfico 25 Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase media

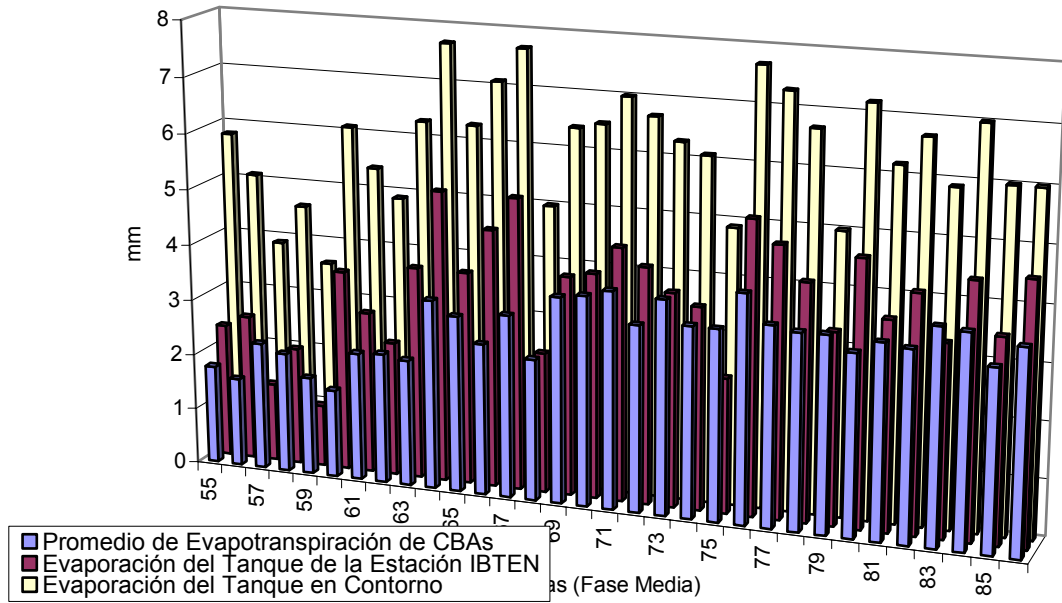
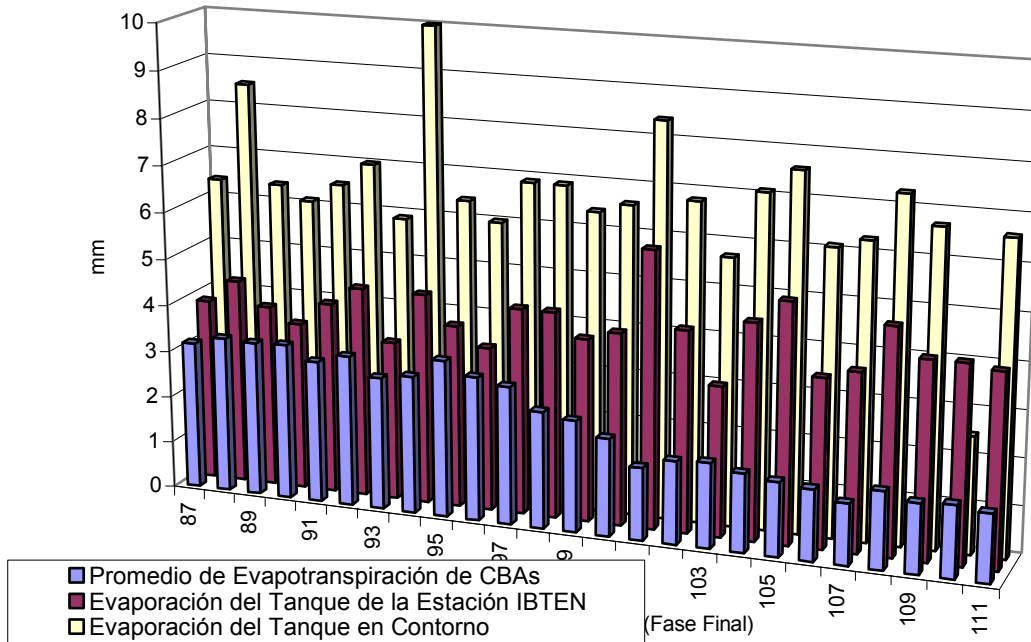


Gráfico 26 Evapotranspiración vs evaporación tanque clase A de la fase final



5.15. Otros factores

Es preciso finalmente señalar que no existieron otros factores que afectaron los procesos de evapotranspiración.

VI. CONCLUSIONES

En el rendimiento en base a materia fresca de raíz entera del cultivo de Beterraga (variedad Detroit dark red), se ha observado que el segundo tratamiento, es decir el segundo con mayor número de plantas por unidad, se distingue por su mejor rendimiento, lo cual se explica por la dinámica microclimática analizada, que muestra que la radiación y la humedad ambiental determinada por la aplicación de riego son los principales factores que garantizan condiciones favorables para el desarrollo de la raíz y del follaje (peso promedio de materia fresca de hojas y pecíolos). Así también, de los resultados y análisis del balance hídrico y del requerimiento de riego, se deduce que tanto la densidad de raíces, como la cobertura del follaje son factores que afectan la disponibilidad de agua en el sustrato, confirmándose por éste análisis que el tratamiento 2 fue más eficiente en el uso del recurso agua.

El análisis estadístico de riego neto reveló así mismo, que el primer tratamiento, es decir el de mayor número de plantas obtuvo el mayor valor así como el cuarto obtuvo el menor valor, sin embargo la diferencia es de 10 a 12 litros entre ambos valores extremos, con lo cual queda demostrado que sin importar el número de plantas en un rango de 270 a 192 plantas por unidad experimental el riego óptimo (bruto) para dichas densidades en la época del estudio será de 260 mm (litros / m²).

El experimentó demostró que las densidades de siembra (tratamientos) fueron el factor determinante que estableció diferencias entre los valores obtenidos mediante lisimetría de volumen y calculados de la Evapotranspiración. Diferencia que tiene explicación en la relación de volumen del follaje y espaciamento entre plantas y entre surcos utilizados, así como el diseño propuesto de unidades experimentales, que influyen en el efecto de los factores ambientales; en este sentido, se rechaza la hipótesis planteada.

Así también, los resultados del balance de energético indican que el tratamiento 2 fue el que tuvo mejor eficiencia evapotranspirativa, evidenciado por λ ET, así mismo los resultados del balance de agua volumétrico determinado por lisimetría, revelan que el mismo tratamiento tuvo menor evapotranspiración, lo cual confirma que la evapotranspiración del cultivo no disminuye a un mayor o menor número de plantas, por unidad de cama baja atemperada por si misma, sino a una distancia adecuada entre plantas y surcos, que para el presente estudio resultó en 15 cm (entre surcos) y 10 cm (entre plantas).

Se confirmó así también, que los principales factores que afectan la evapotranspiración la radiación, temperatura, humedad del aire y velocidad del viento, (señalado por el documento N° 56 de la FAO). Sin embargo podemos inferir que además de los factores señalados que afectaron el proceso de evapotranspiración, el factor de densidad planteado en términos de distancias entre plantas y surcos afectó de manera significativa el proceso de evapotranspiración para la variedad d.d.r. de Beterraga de mesa, demostrándose la importancia de una adecuada distribución de las plantas en camas bajas atemperadas en cuanto a distancias entre surcos y plantas para mejores rendimientos de raíces y follaje. Dicho factor se considera importante y significativo, tomando en cuenta que la oferta de agua en la época de estudio es limitada en la región, coincidentemente en las dos primeras fases del cultivo.

En cuanto a la utilización del tanque evaporímetro clase A, para la determinación y aplicación de riego para el cultivo de Beterraga, no se logró establecer la utilidad de dicho instrumento para el cálculo de la evapotranspiración, para todas las fases del ciclo de cultivo.

La evaluación de otros factores que afectan los procesos de evapotranspiración permitirá la identificación de alternativas técnicas que mejoren la eficiencia energética y por tanto de la eficiencia en la aplicación de riego en condiciones donde el recurso es limitado.

VII. RECOMENDACIONES

(a) Recomendaciones de Producción:

Al haber demostrado el cultivo de Beterraga (var. Dark Red Detroit) (variedad de mesa) un rendimiento relevante en las condiciones establecidas para el experimento, se recomienda su producción en Camas Bajas Atemperadas en el Altiplano Central de Bolivia, contemplando las siguientes técnicas:

Riego para el cultivo y hortalizas de porte bajo con similar morfología y fisiología en CBAs:

Lámina mayor o igual a 257 mm equivalente a 0.925 m^3 , con tensión matricial no mayor a 10 cbar, - ideal 7 cbar -, en función de las características propias de retención del suelo a emplear, sin embargo, en la fase final se deberá incrementar la tensión de manera creciente hasta un valor aproximado de 60 cbar, a efectos de lograr mejor maduración y resistencia de la piel de la raíz. Así también, se recomienda una frecuencia con intervalos de dos a tres días en las fases inicial y de crecimiento, y de 3 a 5 días en las fases media y final.

Para el pequeño agricultor se recomienda el empleo de sistemas de aspersion manual y/o automática evitando la compactación del sustrato y provoque la uniforme distribución horizontal y vertical de agua de riego; sin embargo en caso de no contar con tales sistemas, el riego por inundación en sustratos bien nivelados será suficiente.

Densidad, labores culturales y manejo:

Producción hortícola con una densidad de 67 plantas / m^2 con distancias entre surcos y plantas respectivamente de 15 y 10 cm, debido a que es la densidad que mejor rendimiento de raíz y follaje produjo y mejor respuesta ha obtenido debido a la distribución de las plantas.

(b) Diseño de Camas Bajas Atemperadas:

Debido a la necesidad de un manejo práctico de las unidades que facilite las labores de cultivo, mejore las condiciones microclimáticas y se utilicen cantidades y tipos de materiales accesibles para el agricultor del altiplano, se recomienda:

Que la profundidad total de las unidades esté en el intervalo de 90 a 80 cm.

Que la profundidad hasta el sustrato de cultivo sea la mayor posible, es decir se prepare un sustrato de mayor fertilidad y menor espesor en función de la especie y variedad de hortaliza.

Que se utilice el diseño que incluye la impermeabilización y el drenaje como diseño de CBA para la producción y utilización del agua de drenaje.

La factibilidad de instalación de un sistema de riego de micro aspersion en las tapas. O la factibilidad de instalación de un tanque elevado.

Utilizar para sujetar las estacas que sujetan las tapas, empotradas en mortero de cemento

Adaptar la tapa para lograr cosecha del agua de precipitaciones y utilizarla para riego.

Finalmente se recomienda la construcción de camas bajas atemperadas (modelo propuesto) que incluyan una cámara de drenaje y así reutilizar el agua de drenaje, lo cual permitiría un menor lixiviado de nutrientes y partículas finas del sustrato.

(c) *Recomendaciones para estudios científicos*

:

Lisimetría : La elección de un perfil de sitio que permitiera tanto la utilización del horizonte A, así como de una estabilidad de perfiles compactados fue sin duda, condición que permitió la instalación de la impermeabilización, la nivelación, así como la instalación del drenaje y todos los detalles que muestran las ilustraciones, así como las fotografías y el video presentados. Sin embargo, se puede recomendar lo siguiente en la construcción de lisímetros de volumen para evaluar la evapotranspiración de invernaderos:

- La lámina impermeable debe ser suficientemente resistente, así como su adherencia a la conexión que permita la colecta de agua percolada.
- La utilización de grava (sin aristas) es recomendable, sin embargo la utilización de piedras de mayor dimensión (sin aristas) en la base podrían mejorar la percolación, así como el flujo del fondo de los lisímetros de volumen.
- Es recomendable así también, que puedan construirse más de un colector o conexión, o de ser posible uno de los extremos longitudinales adaptarlo completamente (1.2 m) a la salida del drenaje profundo del perfil de producción.

Registro de datos climáticos: Se recomienda registrar los datos climáticos con los instrumentos ubicados al nivel del dosel del cultivo, a objeto de registrar los datos en el nivel de intercambio de energía ambiente – planta, información que permitirá la estimación de los factores de resistencia aerodinámica y estomática.

Investigaciones consecuentes: Nuevos diseños y adaptaciones que permitan mayor eficiencia energética y mayores rendimientos en otras variedades y especies de hortalizas, deben ser desarrollado.

Estudios de influencias de cultivos con bajo nivel de riego para evaluar aportes o pérdidas (percolación profunda y/o ascensión capilar) en distintas zonas geográficas, en consideración de la baja disponibilidad de agua para la producción de hortalizas, así también al que debido a desastres naturales como las heladas y las sequías, el cambio climático y el fenómeno de desertificación no tiene garantía de provisión de alimentos.

Será pertinente evaluar el comportamiento de la variedad y especie estudiada en diferentes épocas. En este sentido se recomienda realizar este tipo de pruebas a efecto de obtener mejores rendimientos en hortalizas de raíz con follaje aprovechable, así también hacer más eficiente el uso del recurso agua, el espacio y el tiempo de atención del cultivo.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, J. 1977./ 500 Consejos Agrícolas./ Madrid - España./ Editorial Mundi Prensa./64-66 pp.
- Aitken, S. J., (1986)./ Manual Agrícola./ Cámara Agropecuaria de Potosí./ Potosí - Bolivia./ 45-46 pp.
- Altamirano, C./ 1997./ Tríptico de construcción e instalación de Pankar - huyus./ Instituto Benson./ La Paz - Bolivia.
- Altamirano, C./ 1998./ Informe de ensayo de orientación y comportamiento agronómico de hortalizas de porte bajo en Pankar – huyus./ Instituto Benson./ La Paz – Bolivia.
- Becker, Gary S., (1967)./ “Human Capital and the Personal Distribution of Income: An Analytical Approach,”./ Ann Arbor: University of Michigan, Woytinsky Lecture./ Republished in Gary S. Becker, Human Capital./ New York: NBER./ 2nd edition 1975./ 94 – 117 pp.
- Becker, Gary./ 1978./ The economic approach of human behavior./ The University of Chicago Press. Chicago and London.
- Bernat, J.C., Andrés, V.J. y Martínez, R.J. (1987)./ Invernaderos. Manual de construcción-manejo-rentabilidad./ Profesores de la Escuela Universitario de Ingeniería Técnica de Barcelona./ Editorial AEDOS,./ Barcelona – España.
- Blanco T., Gonzales, J. y Augstburger F. (1999)./ Invernaderos Campesinos en Bolivia - Sistematización de experiencias./ ECOTOP (Programa de Apoyo a ONG´s) NOGUB-COSUDE./ La Paz – Bolivia.
- Caseres, E./ 1980./ Producción de Hortalizas./ IICA./ San José Costa Rica./ 3ra edición.
- Charmine, S., (1982)./ Terapia completa con zumos de frutas y verdura./ Editorial EDAF, S. A./ Madrid - España./ 71-74 pp.
- Chipana, R./ 1997./ Manual de Riego y Drenaje./ UMSA./ La Paz - Bolivia.
- Contreras, A. (1993)./ El agrosistema andino; Recursos filogenéticos y su uso en la agricultura marginal,./ Centro internacional de la papa – PROIMPA./ Lima – Perú./ 266-276 pp.
- Cosio, C./ 1996./ Áreas agrícolas deprimidas en el occidente de Bolivia; Áreas de extrema pobreza un problema nacional./ Cochabamba – Bolivia./ J.V. pp. 19-30.
- De Fina, A. (1977)./ Fenología y Climatología Agrícolas./ INTA./ Buenos Aires-Argentina./ 161-165 pp.
- Doorembo, J. Y Pruitt, W./ 1977./ Las Necesidades de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje. N° 24. Roma, Italia.
- FAO 39./ 1982./ Lisímetros, Serie de Riego y Drenaje./ Organización para la Alimentación y la Agricultura- FAO./ 56 p./ 1ra edición.
- FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 (1998), Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith / Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),
- Fassbender, W. Hans y Bornemisza E., (1987)./ Químicas de Suelos (con énfasis en suelos de América Latina)./ IICA./ San José - Costa Rica./ 51-52 pp.
- Gainsbor, A./ 1971./ La Cocina en Bolivia./ La Paz - Bolivia./ Ed. Burillo. Ltda./ p-42.

- Gaita Amilcar./ 2003./ Memorias del Foro Internacional del Agua:./ La importancia del Agua./ Academia de Ciencias de Bolivia./ La Paz – Bolivia./ Presentación de la Autoridad Binacional del Lago Titicaca del Sistema TDPS.
- Gandarilla, M. (1996)./ Áreas agrícolas deprimidas en el occidente de Bolivia: La migración interna./ J.V. ./ Cochabamba – Bolivia./ 141-146 pp.
- [García Magalí \(1999\), Tesis de Maestría \(Post Grado\), Universidad Lovaina./ Bélgica](#)
- Geery, Daniel. /1982 ./ Invernaderos solares, subterráneos (Solar Greenhouses Underground) ./ TAB Books, ./ Inc. Blue Ridge Summit, PA. 400 p.
- Hartmann, F. (1991)./ Invernaderos y ambientes atemperados./ CESIM./ La Paz, Bolivia./ 23-67; 78-95 pp.
- Hillel Daniel (1998)./ Environmental Soil Physics./ Dept. of Plant and Soil Sciences, University of Massachusetts, U.S.A./ Academic Press, Inc./ San Diego./ 771 pages.
- IICA y CATIE./ Redacción de Referencias Bibliográficas./ Normas técnicas del IICA y CATIE (página web)./ 4 ed. / Turrialba, Costa Rica./ Biblioteca Conmemorativa Orton (IICA / CATIE) CATIE 7170, /Presentación Power Point./ Email: bibliot@catie.ac.cr,biblioteca.orton@iica.ac.cr
- INE 1999./ Informe de nutrición: Encuesta Nacional de Demografía y Salud 1998./ Instituto Nacional de Estadística./ Fondo de las Naciones Unidas para la Población./ La Paz – Bolivia.
- INE-DHS 1998. Encuesta Nacional de Demografía y Salud./ Instituto Nacional de Estadística./ La Paz – Bolivia.
- Iturri, L. (1999)./, Evaluación de la disponibilidad y aprovechamiento de recursos hídricos en la comunidad de Choquenaira (subcuenca Pallina, La Paz)./ Tesis de grado Facultad./ La Paz – Bolivia./ Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés./ pp. 26-108.
- Kenneth K. Tanji y Neeltje C. Kielen, (2001), Manejo agrícola del agua de drenaje en áreas áridas y semiáridas, FAO 61, Serie de Riego y Drenaje, Organización para la Alimentación y la Agricultura, 183 páginas.
- Krarup, C., I. Moreira. (1998)./ Hortalizas de estación fría. Biología y diversidad cultural./ P. Universidad Católica de Chile, VRA, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. / Santiago, Chile.
- López T. M. (1994)./ Horticultura./ Editorial Trillas./ D. F. – México./ 1994. 111-112 pp.
- Martínez y Tico, (1967)./ Agricultura Práctica Enciclopedia Hispania./ Editorial Sopena, Barcelona – 1970./ España./ p. 329.
- [Monrroy, Oscar \(1999\), Tesis de Grado./ Facultad de Agronomía de la UMSA./ Programa de Investigación de la papa – PROINPA./ La Paz – Bolivia./](#)
- NARES 33 (1994)./ Ingeniería de Invernaderos./ Servicio Regional (noreste) de Ingeniería Agrícola, Ithaca – Unión Norteamericana./ Tercera revisión (Agosto)./ Capítulo 4º, 11 páginas (traducciones propias).
- Ocsa, W.M. (1995)./ Manual para el Altiplano; el sistema Walipini./ CEFODCA./ La Paz - Bolivia, 6-30 pp.
- ONU (2003)./ Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos./ ONU / WWAP.

- Orsag, V. (1992)./ Altiplano: Agricultura, riego y medio ambiente./ En seminario Recursos hídricos y medio ambiente./ Cochabamba - Bolivia. pp 3-34.
- Raymond, D. (1991)./ Horticultura práctica N° 1./ Blume./ Barcelona - España, 138-145 pp.
- Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, (1998)./ Evapotranspiración de cultivos, Lineamientos para la determinación de requerimiento de agua de los cultivos./ FAO 56 - Serie de Riego y Drenaje./ Organización para la Alimentación y la Agricultura, 300 páginas, primera edición.
- Ruiz, D, T., (1998)./ Manual de Horticultura./ Facultad de Agronomía UMSA, La Paz - Bolivia./ 59-61 pp.
- Valadez, L. A. (1993)./ Producción de Hortalizas./ Editorial Trillas./ México D. F./ 81-95 pp.

IX. ANEXOS

Material de construcción:

- Cascajo
- Callapos (madera de eucalipto)
- Vigas de madera
- Tiras de goma
- Clavos
- Tachuelas
- Pernos
- Cintas de polietileno
- Agrofilm
- Tubos de PVC sanitarios de 1.5 pulgadas
- Polietileno
- Silicona
- Politubo ½ pulgada
- Turriles
- Accesorios de tubería

Herramientas de construcción y operación

- Carretillas y picotas
- Palas
- Rastrillos
- Barretas
- Chontillas
- Martillos
- Sierra de carpintería
- Perforador
- Alicates
- Llaves de plomería
- Desarmadores
- Tarrajadoras
- Limatones

Material de operación:

- Baldes
- Regadera
- Bañadores
- Manguera

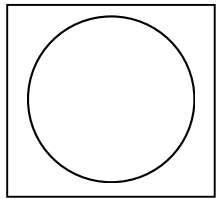
Instrumentos

- Tensiómetros
- Termómetros/Higrómetros
- Luxómetro
- Balanza de precisión
- Bernier
- Reglas
- Flexómetros

Equipos de operación

- Balanza
- Estufa
- Bomba de agua de 1.44 HP
- Generador de Energía
- Taladro
- Sierra eléctrica

Anexo 2 Croquis del Experimento



Cámaras de drenaje

Densidad
2

Densidad
1

Densidad
4

Densidad
3

Densidad
2

Densidad
1

Densidad
4

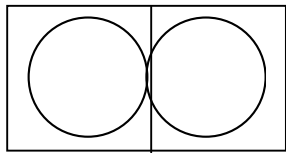
Densidad
3

Densidad
2

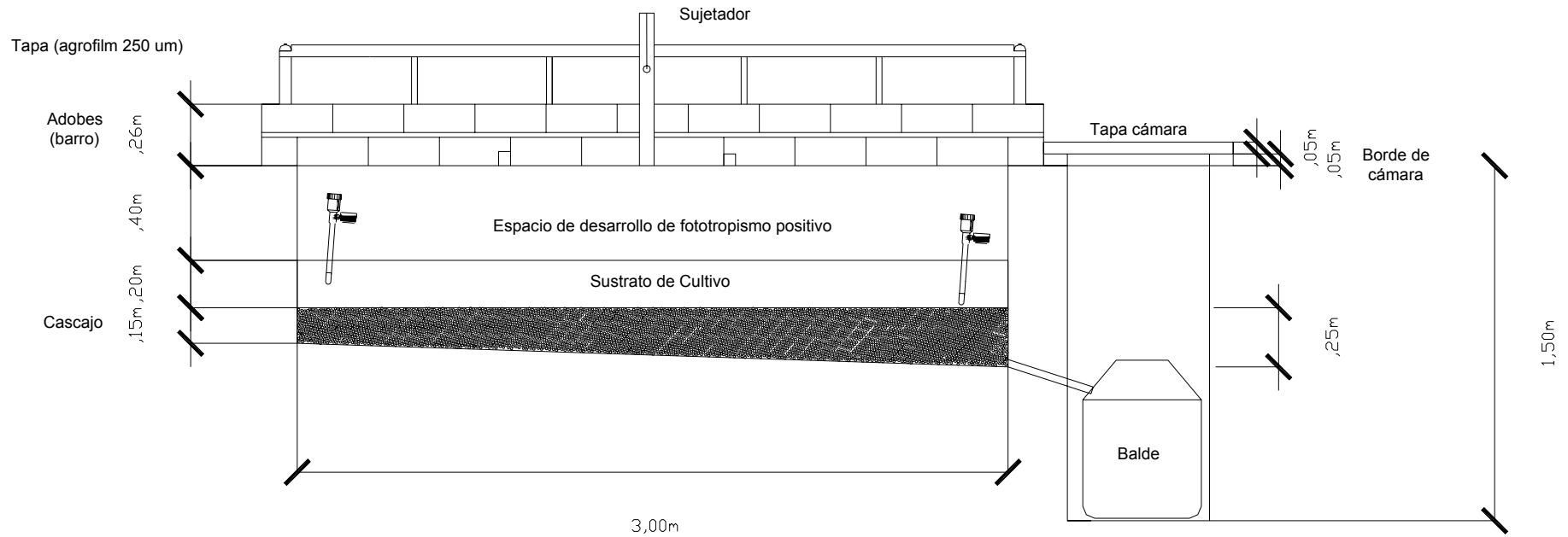
Densidad
4

Densidad
3

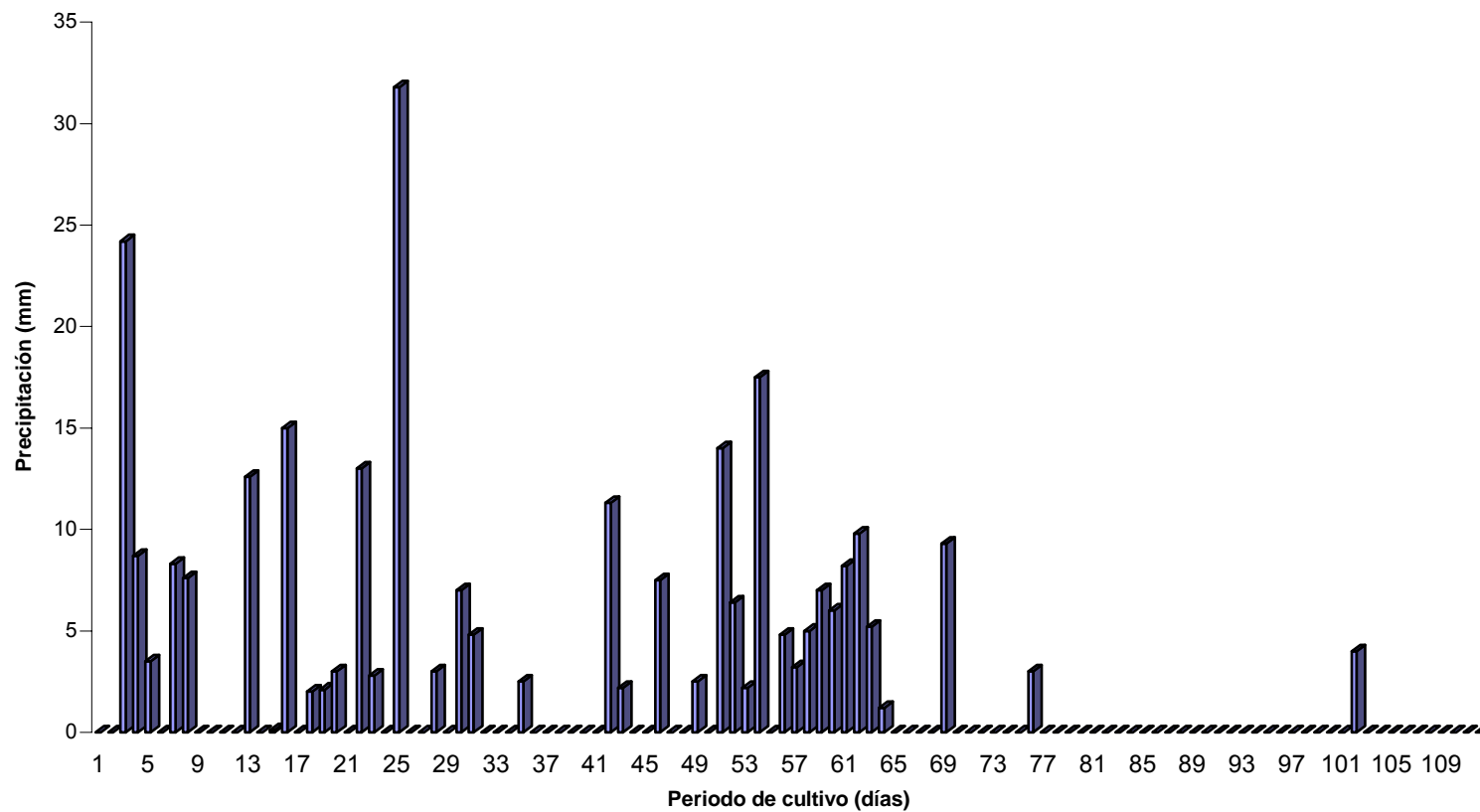
Densidad
1



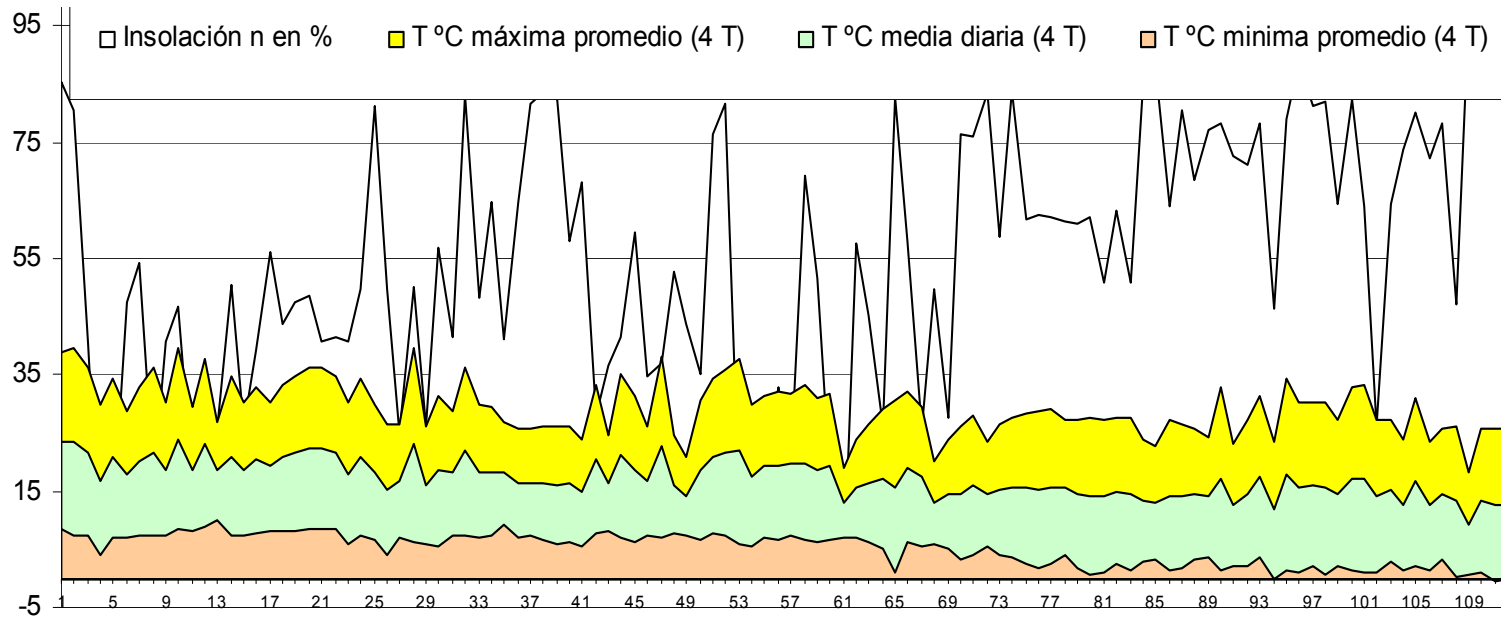
Anexo 3 Diseño del lisímetro de drenaje libre acondicionado al modelo de cama baja atemperada, en cada una de las unidades.



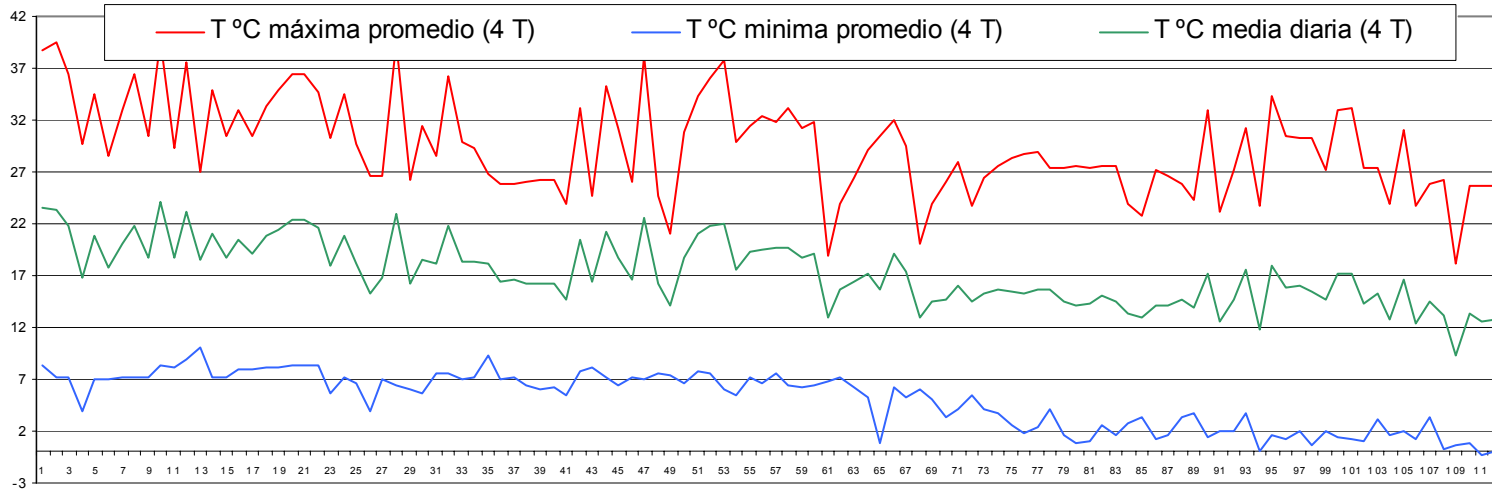
Anexo 4 Precipitación registrada en la Estación de IBTEN durante el experimento



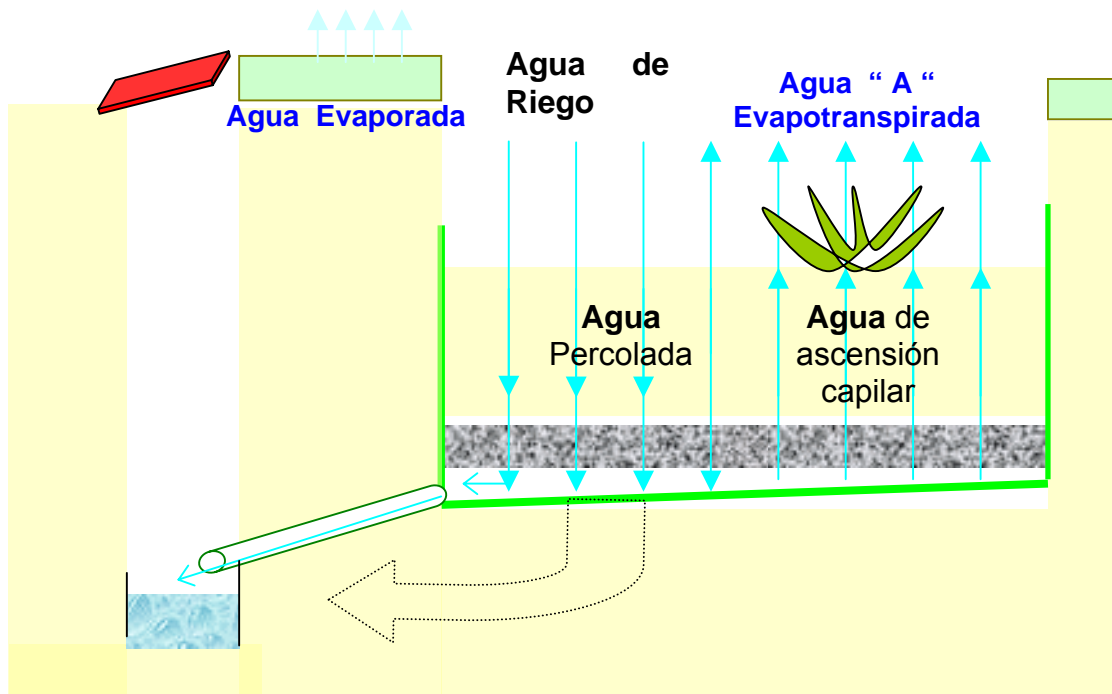
Anexo 5 Temperaturas (°C) e Insolación (%) dentro de las CBAs



Anexo 6 Temperaturas registradas dentro las Camas Bajas Atemperadas de los Cuatro Tratamientos



Anexo 7 Esquema de Operación de Lisímetro



FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Inicio de Excavación (Escuela de Contorno Centro)



Fotografía 2

Diseño propuesto de Cama Baja Atemperada



Fotografía 3 Estación experimental instalada (etapa de incorporación de abono)



Fotografía 4 Instalación de lisímetros (impermeabilización y drenaje)



Fuente de agua para riego
(Pozo de la escuela)



Tanques de almacenamiento



Cámaras de Drenaje
(Lisímetros de Volumen)



Fotografía 5 Sistema de Riego y Drenaje

Fotografía 6 Composición de Fotografías de Experiencia en la Estación de Letanías (Instituto Benson)

