

50521
61



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**COMPARACIÓN ENTRE DOS
COLECTORES DE AGUA DE
NUBE Y NEBLINA: UNO
ACTIVO Y OTRO PASIVO**

T E S I S

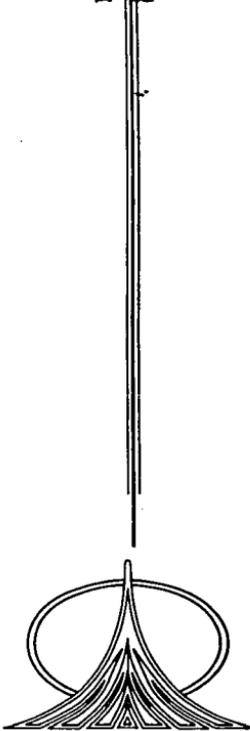
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A N :

RAMON PÉREZ VEGA

YOLANDA ARGELIA QUEZADA PÉREZ



MÉXICO, D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2003

1



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/004/03

ASUNTO: Asignación de Jurado

*** ALUMNO: PEREZ VEGA RAMON *
P r e s e n t e .**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	I.Q. Miguel José Flores Galaz
Vocal:	I.Q. Adolfo Portilla González
Secretario:	Fis. Mat. Javier Ramos Salamanca
Suplente:	I.Q. Balbina Patricia García Aguilar
Suplente:	I.Q. Julio Felix Martínez Reyes

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 31 de Enero de 2003

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRES AQUINO



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/003/03

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNA: QUEZADA PEREZ YOLANDA ARGELIA
P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

	Presidente:	I.Q. Miguel José Flores Galaz	
	Vocal:	I.Q. Adolfo Portilla González	
	Secretario:	Fis. Mat. Javier Ramos Salamanca	
	Suplente:	I.Q. Balbina Patricia García Aguilar	
	Suplente:	I.Q. Julio Felix Martínez Reyes	

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., 31 de Enero de 2003

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRES AQUINO



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Agradezco a Dios que aún cuando yo me he olvidado muchas veces de Él,
Él nunca se ha olvidado de mí.

Agradezco a mis padres: Ma. Guadalupe Vega y Ángel Pérez por su extraordinario
ejemplo.

A Arge porque a pesar de todo, en las buenas y en las malas siempre hemos estado
juntos. Gracias por ser la mujer de mi vida.

Gracias Felipe, por tu inteligencia, humildad y ejemplo, gracias por los momentos
vividos.

A mis hermanos, gracias por existir, por estar juntos.

Agradezco a Virginia y a Javier por su motivación para terminar este trabajo y ejemplo
profesional.

A Guillermina, mi mejor amiga

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A MI FAMILIA

Esto es por y para el hombre que con su ejemplo y su amor me enseñó el camino, gracias Felipe Pérez por tocar con tu luz mi vida y seguir brillando para mí.

Gracias a mis padres Ana Bertha y Bernabé por su apoyo, amor, preocupación y paciencia, a Pau por su cariño y compañía a Irlanda, Dany, Karen y Kenia por su alegría, Abuelita por tu cariño.

A MIS AMIGOS

No se como retribuir al CCH por los amigos, a Vicky por su apoyo incondicional y buenos consejos a Javier por el impulso y a ambos por sus enseñanzas y por su entrega al trabajo que es un aliciente, a Guille por todo lo que me ha ayudado y por su preocupación.

A Adolfo, a Patricia, a Julio por sus consejos y a Miguel por la disposición y empeño para mejorar este trabajo.

Ale gracias por estar cuando te necesito, por la compañía, el apoyo y la tolerancia.

Ramón a ti por lo vivido por ser una parte muy importante de mi vida, por las alegrías y también por las tristezas por el amor y el desamor y por que al fin cerramos el ciclo.

Y sobre todo gracias a Dios dejar que ustedes formaran parte de mi vida.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5

**COMPARACIÓN DE DOS COLECTORES,
UNO ACTIVO Y OTRO PASIVO PARA LA
RECOLECCIÓN DE AGUA DE NUBE Y
NEBLINA**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

PÁGINA

CAPITULO 1 ANTECEDENTES DE LOS COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA	1
1.1 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA	1
1.1.1 Colectores pasivos	2
1.1.2 Colectores activos	6
CAPITULO 2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE METEOROLOGÍA	8
2.1 IDENTIFICACIÓN DE NUBES	9
2.2 ESTRUCTURA ATMOSFÉRICA Y ESCALA	10
2.3 IDENTIFICACIÓN VISUAL DE TIPOS DE NUBE	12
2.3.1 Genero, especie y etapas	12
2.4 CATEGORÍA DE NUBES	15
2.4.1 Nubes Cúmuliiformes	16
2.4.2 Nimboestratos	25
2.5 NUBES CENTRALES (NIVEL MEDIO)	26
2.5.1 Altoestratos	26
2.5.2 Altocúmulos	27
2.6 NUBES ALTAS	29
2.6.1 Cirros	29
2.6.2 Cirroestratos	29
2.6.3 Cirrocúmulos	29

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7

2.7 OROGRAFÍA DE LAS NUBES	33
CAPITULO 3 MICROFÍSICA DE NUBES	37
3.1 MICROFÍSICA DE NUBES	38
3.2 NUCLEACIÓN DE GOTAS	40
3.3 CONDENSACIÓN Y EVAPORACIÓN DE GOTAS	45
3.4 VELOCIDAD DE CAÍDA DE GOTAS	50
3.5 FUSIÓN DE GOTAS	52
3.6 COLECCIÓN ALEATORIA DE GOTAS	54
CAPITULO 4 QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE Y NEBLINA	56
4.1 INTRODUCCIÓN	57
4.2 PRINCIPALES REACCIONES FOTOQUÍMICAS EN LA ATMÓSFERA	58
4.2.1 El dióxido de nitrógeno (NO ₂).	59
4.2.2 El dióxido de azufre (SO ₂).	60
4.2.3 Radicales hidroxilo (HO) e hidroperoxilo (HOO).	61
4.2.4 El ozono (O ₃).	62
4.2.5 Amonio y nitrato.	65
4.2.6 La lluvia ácida.	66
4.3 CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA	67
4.4 CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	69
4.4.1 Contaminación por ozono.	69
4.4.2 Contaminación por partículas suspendidas.	70
4.4.3 Contaminación por monóxido de carbono.	70

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

4.4.4 Contaminación por óxidos de nitrógeno	71
4.4.5 Contaminación por dióxido de azufre.	71
4.5 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD	71
4.5.1 Óxido de azufre	72
4.5.2 La lluvia ácida	75
4.5.3 Efectos de los hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, oxidantes fotoquímicos, asbesto y metales sobre los materiales y la salud.	77
CAPITULO 5 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA ALREDEDOR DEL MUNDO	80
5.1 EMPLEO DE COLECTORES EN CHILE.	80
5.1.1 Proyecto El Tofo.	92
5.1.2 Solución de problemas de agua en Chile.	96
5.1.3 El desierto costero.	96
5.1.4 Transformación de una aldea.	97
5.1.5 Evaluación del potencial de los recolectores de niebla en Chile.	98
5.2 TÉCNICA DEL PROYECTO CHILENO	99
5.2.1 Superficie de captación.	99
5.2.2 La matriz conductora	103
5.2.3. Distribución y red domiciliaria	106
5.2.4. Racionamiento.	107
5.2.5 Calidad físico-química del agua	107
5.2.6 Calidad microbiológica del agua	110
5.3 DISEÑO Y ESTRUCTURA DEL COLECTOR CHILENO	116
5.3.1 Diseño del colector	118

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

5.3.2 Elementos estructurales	119
5.3.3 Estructura de soporte	120
5.3.4 Elemento de captación	120
5.3.5 Cables de sostén	120
5.3.6 Barras de anclaje	121
5.3.7 Canaleta colectora y drenaje	121
5.4 CALCULO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN DEL COLECTOR CHIILENO	122
5.5 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN EN CHILE	125
5.6 OTROS COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA	126
5.6.1 Colectores de neblina en Hawaii, EU	126
5.6.2 Colectores de neblina en Sudáfrica	126
5.7 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA CON FINES FORESTALES	127
5.7.1 Demanda de agua para riego forestal	128
5.8 FACTORES PARA ESTABLECER EL LUGAR GEOGRÁFICO DE COLECCIÓN	130
CAPITULO 6 COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS COLECTORES	132
6.1 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA EN MÉXICO	133
6.2 Estudio comparativo de los colectores	132
6.2.1 Procedimiento del muestreo	134
6.2.2 Descripción de los colectores de agua de nube y neblina empleados	135
6.2.3 Análisis químico	136
6.2.3 Capacidad de colección	139

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 7 CONCLUSIONES

142

BIBLIOGRAFÍA

146

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

11

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Colector metálico pasivo de agua de nube.	2
Figura 2. Colector activo de agua de nube.	2
Figura 3a. Colector omnidireccional (OC) con malla de teflón.	3
Figura 3b. Colector OC con anemómetro incorporado.	3
Figura 4 Colector de tamiz de cinco divisiones	4
Figura 5. Colector activo diseñado por Jacob.	6
Figura 6. Nubes Bajas Stratocumulus (Sc).	16
Figura 6.1a Nube del género cúmulos "humilis".	17
Figura 6.1b Nube del género cúmulos "congestus".	17
Figura 6.2a Nube Cúmulos congestus.	18
Figura 6.2b Nube Cúmulos segunda etapa.	18
Figura 6.2c Nube Cúmulos tercera etapa.	18
Figura 6.2d Nube Cúmulos cuarta etapa.	18
Figura 6.3 Nube con forma de yunque.	19
Figura 6.4 Evolución de la nube Cúmulonimbus.	19
Figura 6.5a Niebla de radiación.	21
Figura 6.5b Niebla en el valle Central de California.	21
Figura 6.5c Formación de niebla.	21
Figura 6.5d Formación de vapor de niebla.	21
Figura 6.6a Nube Estratos.	22
Figura 6.6b Cima brillante de la nube.	22
Figura 6.7a. Nube similar a la Estratos.	23

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 6.7b. La Estratocúmulos algunas veces aparece como un mosaico de masas.	23
Figura 6.8a. Mosaicos o rollos de nubes exteriores o secciones de nubes.	23
Figura 6.8b Nube en forma de Cúmulos.	23
Figura 6.9a Las fotos de satélite muestran de las Estratos y Estratocúmulos.	24
Figura 6.9b Modelo texturizado de una nube Estratocúmulos larga.	25
Figura 6.10. La nube Nimboestratos profunda, parece Cúmulonimbus.	26
Figura 6.11 Nube Altoestratos.	27
Figura 6.12a. Altocúmulos, nube parecida a rollos largos.	28
Figura 6.12b. Nube Altocúmulos con forma de tren.	28
Figura 6.12c Altocúmulos "Floccus".	28
Figura 6.12d Altocúmulos "Castellanuys".	28
Figura 6.13a. Nube Cirroforme primera etapa.	30
Figura 6.13b. Nube Cirroforme segunda etapa.	30
Figura 6.13c. Nube Cirroforme tercera etapa.	30
Figura 6.13d. Nube Cirroforme cuarta etapa.	30
Figura 6.14. Cirrus "Spissatus".	32
Figura 6.15. Halo de una nube Cirroestratos.	33
Figura 6.16. Nubes Lenticulares.	34
Figura 6.17. Nube lenticular con una formación de "herradura".	34
Figura. 6.18. Nubes ondulatorias.	35
Figura 6.19. Nubes ondulatorias en las laderas de los cerros.	35
Figura 6.20. Nubes lenticulares ondulatorias.	36
Figura 6.21 y 6.22. Nubes rotatorias.	37
Figura 7. Precipitaciones en bosques de neblina.	82

Figura 8. Los obstáculos colectores de agua	83
Figura 9. Chungungo en 1925	86
Figura 10 Colector en "El Mirador".	90
Figura 11 Colector poliédrico "Morro Moreno".	91
Figura 12 Base del colector "Morro Moreno".	91
Figura 13 Colector poliédrico en "Los Nidos".	92
Figura 14. Colectores en Cuesta El Tofo	93
Figura 15. Detalle de uno de los filtros de material sólido.	104
Figura 16. Ensayó de formas y tipos de construcción de colectores.	117

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

LISTA DE ESQUEMAS

PÁGINA

Esquema 1. Sección vertical del colector contador de flujo de impactos virtuales (CVI).	5
Esquema 2. Sección transversal del colector activo	6
Esquema 3. Mapa de la localización de Teziutlan.	7
Esquema 4. Perfil vertical de temperatura.	11
Esquema 5 División de la atmósfera.	12
Esquema 6. Embrión esférico de líquido (L) en contacto con el vapor (V) y una superficie de nucleación (C).	43
Esquema 7. Velocidad terminal de gotas de agua < 500 µm de radio.	50
Esquema 8. Velocidad terminal de gotas de agua > 500 µm de radio.	51
Esquema 9. Eficiencia de colisión para colección de gotas.	52
Esquema 10. Representación de los procesos químicos de la atmósfera.	58
Esquema 11. Cumbres de Fray Jorge, Talinay y Santa Inés, Chile.	81
Esquema 12. Collectores empleados en El Tofo, en Chile.	85
Esquema 13. Proceso de formación de la "camanchaca".	89
Esquema 14. Esquema de un colector doble.	99
Esquema 15. Detalle constructivo de los elementos de sujeción y soporte de un colector.	100

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

15

LISTA DE TABLAS	PÁGINA
Tabla 1 Género y categorías de nubes.	14
Tabla 2. Efectos del SO ₂ a diversas concentraciones.	75
Tabla 3. Análisis del agua captada en Chile.	111
Tabla 4. Caracterización granulométrica del polvo.	114
Tabla 5. Costos totales de inversión para construir un sistema de captación básico.	126
Tabla 6. Comparación de la composición iónica del agua de nube (Noviembre, 1995)	136
Tabla 7. Comparación de la composición iónica del agua de nube (Enero, 1997).	137
Tabla 8. Análisis del agua captada en Teziutlan, Puebla, (Noviembre, 1995).	138
Tabla 9. Análisis del agua captada en Teziutlan, Puebla, (Enero, 1997).	138

LISTA DE GRÁFICAS	PÁGINA
Gráfica 1. Productividad de agua de nube y neblina, por sector.	101
Gráfica 2. Productividad de los colectores, agrupados por sectores.	102
Gráfica 3. Comparación entre captación y demanda mensual de agua.	105
Gráfica 4. Frecuencia de la dirección del viento en el "El Tofo".	113

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

**INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS
COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y
NEBLINA**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA

La función principal del desarrollo de los colectores de agua de nube y neblina ha sido básicamente el de recolectar agua con el fin de estudiar la química de la atmósfera de un lugar en particular; el estudio de la química del agua de nube y neblina ha generado un interés significativo a causa del efecto potencial de ésta sobre el medio ambiente.

El estudio de la química del agua de nube proporciona una oportunidad para conocer el origen de las masas de nubes a partir de que esto representa el producto final de un proceso natural principalmente de la condensación-absorción del aire contaminado en pequeñas cantidades de agua de nube.

El uso de los colectores de agua de nube o neblina con el único fin de abastecer de agua potable es nuevo y poco desarrollado, sin embargo es de este modo como se abastece de agua potable a algunas pequeñas comunidades en la zona montañosa de Chungungo en Chile.

Esta tecnología para el abastecimiento de agua potable ya se está estudiando en México a nivel piloto en el Centro de Ciencia de la Atmósfera.

En la República Mexicana existen muchas regiones con pequeños núcleos de población que carecen de los servicios más indispensables, entre ellos agua potable para las necesidades más elementales; muchos de estos sitios se encuentran en lugares montañosos elevados que frecuentemente son impactados por neblina o nubes que contienen agua no precipitable y que por lo tanto, al no llover no se puede disponer de esta fuente de agua; sin embargo, la tecnología y la ciencia están desarrollando métodos con los cuales esta agua de nube o neblina puede

TESIS CON
PALLA DE ORIGEN

colectarse y servir como abastecimiento a estas zonas, solucionando en parte el problema del abastecimiento de agua para usos indispensables.

Existen básicamente dos tipos de colectores: uno *activo* el cual succiona la nube o neblina gracias a un sistema eléctrico de succión y el otro tipo es el *pasivo* en el cual la nube o neblina cruza el colector de manera natural impulsada únicamente por el viento; el análisis detallado de los principales parámetros que diferencian a los distintos colectores así como el propósito del empleo son la pauta básicas a considerar al elegir entre un tipo u otro de colector.

Los colectores activos tienen una mayor capacidad de captación lo que los hace recomendables cuando se desea determinar la química del agua de nube y neblina de manera rápida, sin embargo su empleo con fines de abastecimiento de agua resulta inadecuado ya que es costoso dadas las implicaciones eléctricas necesarias para su uso y, en general, la idea básica de un colector empleado como fuente de abastecimiento de agua es que sea económico y fácil de manejar, por lo que este tipo de colector no cumple con ninguno de estos dos requerimientos.

Por otro lado, los colectores pasivos resultan ideales como fuentes de abastecimiento de agua potable por su bajo costo y facilidad de mantenimiento como lo demuestra el estudio realizado en Chile; sin embargo, para fines de análisis químico requieren un mayor tiempo para la captación de agua de nube y neblina que puede ser de horas o incluso días.

Además cada uno de los colectores presenta un determinado grado de asociación a las especies químicas presentes en la atmósfera, resultado una mayor concentración de ellas en el análisis químico, esto debido al diámetro de los hilos de la malla de cada colector, a la posibilidad de contaminación por agentes extraños asociados al lugar de muestreo (polvo y partículas extrañas) así como a la rapidez de captación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las características de la atmósfera, los procesos de formación de las gotitas de agua de nube y neblina, el empleo de los colectores alrededor del mundo y los estudios realizados en México constituyen el cuerpo de este trabajo.

Como objetivos de esta tesis, se plantean la realización de una investigación bibliográfica del desarrollo de los colectores alrededor del mundo así como su empleo, la elaboración de un estudio de la química de la atmósfera, haciendo hincapié en las principales reacciones fotoquímicas y finalmente un estudio comparativo de los colectores pasivo y activo empleados con fines de abastecimiento de agua potable.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO I

**ANTECEDENTES DE LOS COLECTORES DE
AGUA DE NUBE Y NEBLINA**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2

Una nube puede definirse como una agregación visible de partículas de agua o hielo o ambas; siendo consideradas todas las posibles partículas existentes en la nube como *partículas de aerosol*; las nubes son un enlace vital con el clima global, el ciclo del agua y una parte integral en el análisis y proyección del estado del tiempo.

Existe un gran interés por el estudio de la química del agua de nube y neblina dada la repercusión que tiene ésta en el ambiente; para ello se desarrollaron los colectores de agua de nube o neblina.

1.1 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA

Un colector de agua de nube o neblina es un instrumento basado en la formación de gotitas de agua condensadas al impactarse la nube o la neblina con una serie de hilos entrelazados que forman una trama o malla; esta malla puede estar colocada a un marco o soporte estructural como en el caso de los *colectores pasivos* (figura 1), o sujetas además a un ducto de succión como en *los colectores activos* (figura 2); estas pequeñas gotas se van colectando en un recipiente colocado para este fin.

PAGINACIÓN DISCONTINUA



Figura 1. colector metálico pasivo de agua de nube diseñado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, México.



Figura 2. colector activo (CA) de agua de nube diseñado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, México.

1.1.1 Colectores pasivos

Para el propósito de colección de agua de nube o neblina se han diseñado varios dispositivos, uno de ellos es el multicilindro (figura 3a y 3b), considerado como el primer instrumento del que se tenga conocimiento para tal propósito; este dispositivo fue desarrollado para coleccionar gotas de nube o neblina como una función del tamaño de la gota, descrito por Brun¹ (1955) y posteriormente por Howe² (1984); el instrumento se compone de un pabellón o tamiz de cilindros o hilos de diferentes diámetros. Este instrumento se basa en el principio de separación inercial, es decir que por medio de los pequeños cilindros colectores se consiguen gotas pequeñas y por los cilindros grandes gotas grandes.

¹Brum, R. J., W. Lewis, P. J. Perkins, and J. S. Serafini, 1955: Impingement of cloud droplets on a cylinder and procedure for measuring liquid-water content and droplet size in supercooled clouds by rotating multicylinder method. National Advisory Committee for Aeronautics, Rep. 12225, 43pp.

²Howe, J. B., 1981: The rotating multicylinder method for measuring cloud liquid-water content and droplet size: A reexamination. Preprints, Second Conf. On Mountain Meteorology, Steamboat Spring, CO, Amer. Soc., 401-403.

De la colección del agua de nube o neblina, por el principio de colección diferencial, se determinó que la composición química de las gotas varía de acuerdo al tamaño como resultado de la solubilidad de la fase gaseosa en la gota y las reacciones químicas en ella, por lo resulta indispensable la separación del tamaño de la gota en la colección para su análisis químico.



Figura 3a. colector omnidireccional (OC) con malla de teflón.

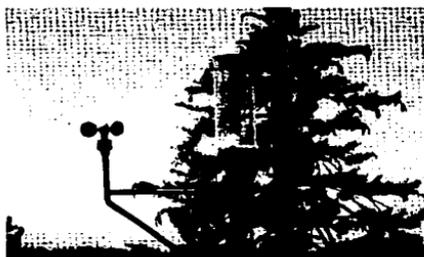


Figura 3b. colector OC con anemómetro incorporado.

Se han encontrado grandes diferencias de la composición química entre las gotas grandes y pequeñas; las especies asociadas a partículas de aerosol grandes (Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) se encuentran en mayor concentración en gotas grandes, mientras que especies asociadas con otras partículas de aerosol pequeñas en el aire (SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+), se encuentran en mayor concentración en las gotas pequeñas.

El Observatorio Monte Washington (MWO)³, en New Hampshire Estados Unidos de Norte América ha empleado el multicilindro en donde se observó que debido a la pequeña área de sección transversal de los cilindros pequeños resultaba insuficiente para coleccionar gotas de agua de nube o neblina muy pequeñas para un análisis químico minucioso; como consecuencia se rediseño el primer colector de agua de nube con el fin de eliminar esta deficiencia, desarrollando así el tamiz o cedazo de nube, incrementando de este modo el área de sección transversal (figura 4).

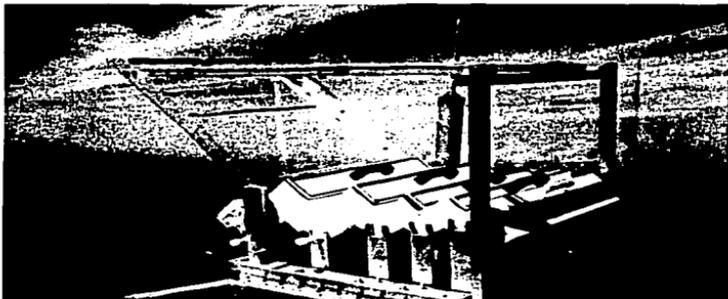


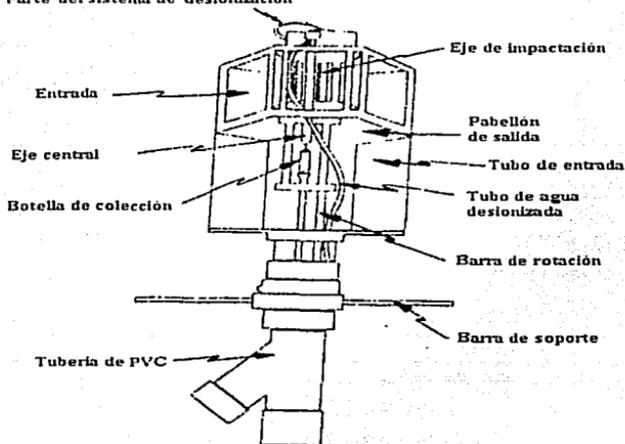
Figura 4 colector de tamiz, sus cinco divisiones le permiten coleccionar simultáneamente cinco tamaños diferentes de gotas de nube.

Posteriormente se desarrolló otro colector, denominado Contador de Flujo de Impactos Virtuales (CVI) (gráfica 1), con el que se efectúa una separación inercial de gotas de un tamaño de alrededor de $10\mu\text{m}$ de diámetro además de contar con un filtro para los residuos. Este colector se probó al noreste del estado de Washington y también en Suiza.

³Por sus siglas en ingles, Mount Washington Observatory

ES CON
FALLA DE ORIGEN

Parte del sistema de desionización



Esquema 1. Sección vertical del colector contador de flujo de impactos virtuales (CVI). El colector está en contacto con tres cilindros de impacto los cuales están localizados en cada una de las entradas.

Los resultados obtenidos del análisis químico de las gotas de agua de nube y neblina son similares a las obtenidas con el multicilindro y el tamiz de nube.

La dependencia de la composición química de la gota de nube o neblina como una función del tamaño de gota es más probable que se deba a una variedad de factores dependientes del tamaño: composición química, núcleo que forma la gota, absorción diferencial de gases y partículas, reacciones químicas internas en la gota y otras aún inciertas.

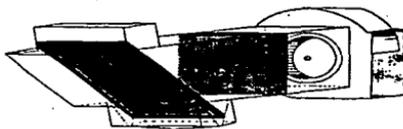
1.1.2 Colectores activos

Los colectores descritos anteriormente son considerados pasivos ya que éstos se colocan en una zona montañosa y se espera que las nubes o neblina se impacten con el colector sin que exista otra fuerza impulsora más que la velocidad del viento que mueve a la nube o neblina.

Posterior a estos colectores, Jacob⁴ diseñó un colector que consistía en un panel a red sujeta a un marco que se colocaba en un ángulo de 35° a un ducto cuadrado de succión de aire ambiental a una velocidad de aproximadamente 9 ms⁻¹ (figura 5 y esquema 2).



Figura 5. colector activo diseñado por Jacob (1985)



Esquema 2. sección transversal del colector activo

Este tipo de colector se considera activo, teniendo una mayor captación de agua de nube o neblina que los colectores pasivos.

En México se han realizado una cantidad importante de trabajos sobre los colectores de agua de nube y neblina por parte del departamento de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la

⁴Daniel J. Jacob; Present address: Center for Earth and Planetary Physics, Harvard University, Cambridge Massachusetts.

Atmósfera de la UNAM, y se han llevado a cabo además, trabajos de comparación de los diferentes tipos de colectores de agua de nube y neblina.

Las pruebas de campo se realizaron en el poblado de Teziutlán, Sierra Madre Oriental, en el Estado de Puebla (esquema 3), encontrando resultados similares a los reportados en otros lugares: La capacidad de colección mayor en el colector activo que en el colector pasivo.



Esquema 3. Mapa que muestra la localización de Teziutlán, en el estado de Puebla, México, en la Sierra Madre Oriental.

CAPITULO 2

PRINCIPIOS BÁSICOS DE METEOROLOGÍA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.1 IDENTIFICACIÓN DE NUBES

Las nubes pueden presentarse en una variada gama de tamaños y formas lo que refleja variaciones en el proceso dinámico de su producción. En este capítulo se revisa la nomenclatura básica para su identificación. Esta se basa únicamente en el tamaño, elevación y apariencia física. Este método de identificación es puramente descriptivo y muy práctico ya que proporciona al observador del estado del tiempo una forma simple y directa de reportar el tipo de nubes sin tener que hacer una interpretación física de lo que esta observando.

Antes de describir el sistema de identificación de nubes, se revisa brevemente la nomenclatura usada para describir las dimensiones verticales y horizontales de las nubes señalado en la sección 2.2.

Las dimensiones verticales frecuentemente se especifican en términos de la nomenclatura usada en la descripción de la estructura vertical de la atmósfera. Para el tamaño horizontal de la nube, de un rango menor a un kilómetro la nomenclatura de *escala-horizontal* se basa en la *descripción y clasificación de nubes*.

El método usado para la descripción y clasificación de nube para el pronóstico del tiempo ha tenido una evolución de alrededor de dos siglos; siendo actualmente un método aceptado internacionalmente. Este método está basado únicamente en describir y clasificar aquellas nubes que una persona pueda observar directamente por ella misma, sin la necesidad de algún

instrumento. Los tipos básicos de nube identificados de acuerdo a este esquema se describen con los ejemplos gráficos.

El esquema de identificación visual de nubes tiene limitaciones inherentes por el campo de visión del observador.

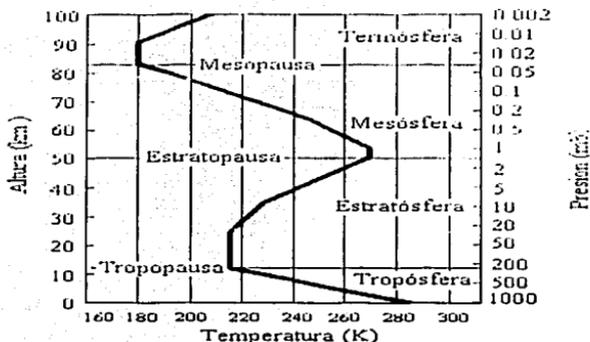
2.2 ESTRUCTURA ATMOSFÉRICA Y ESCALA

La atmósfera se divide usualmente en varias capas basándose en el perfil promedio de temperatura (esquema 4). Muchos sucesos de nubes ocurren en la *tropósfera*, que es la capa más baja la cual contiene casi toda el agua de la atmósfera; la temperatura en general disminuye con el aumento de la altura.

La capa más alta de la tropósfera se llama *tropopausa*, ésta se sitúa alrededor del kilómetro 12 sobre el nivel del mar, esta por debajo de los 12 km sobre los polos y por encima de estos 12 km en la región ecuatorial.

Sobre la tropopausa, el perfil promedio de temperatura es básicamente en un principio isotérmico, después la temperatura en general se incrementa con la altura en la *estratósfera*. La parte inferior de la tropósfera, llamada *atmósfera*, se ve afectada por la interacción que tiene con la superficie de la tierra, a través de la transferencia de calor y cantidad de movimiento. La capa en la cual esta influencia se presenta se llama *capa limite planetaria*, la profundidad de la capa limite planetaria varía mucho, entre un rango de ~10 m a 2-3 km.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



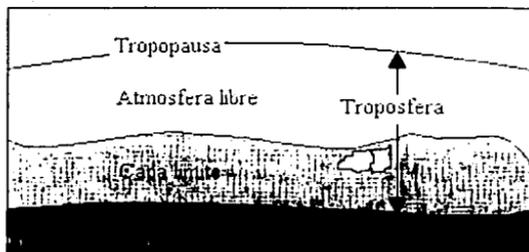
Esquema 4. Perfil vertical de temperatura. Se observa el rango y perfil de temperatura para cada una de los estratos que conforman la atmósfera.

El 10% de la parte inferior de la capa límite planetaria se denomina *capa superficial*, la región encima de la capa límite se denomina atmósfera libre (esquema 5).

Las escalas del aire en movimiento que se encuentra dentro de la dinámica de nubes, pueden dividirse a grosso modo en tres grupos:

1. La escala sinóptica cubre totalmente el fenómeno por encima de los 2000 Km aproximadamente en esta escala horizontal.
2. La mesoescala cubre fenómenos de entre 20 Km y 2000 km aproximadamente.
3. La escala convectiva cubre entre 0.2 km y 20 km.

Esta clasificación es poco segura, sin embargo es físicamente aceptada universalmente (como oposición de la fenomenología).



Esquema 5 División de la atmósfera dentro de dos límites: una capa límite cerca de la superficie y la otra por encima de la atmósfera libre. La parte superior de la capa límite está en algunos lugares a una altura cerca de 1 km, sin embargo, dependiendo de las condiciones del viento y de las propiedades termodinámicas del aire cercano a la superficie, esta puede estar hasta a 100 m de distancia de la tierra. La altitud de la tropopausa es de alrededor de 10 km a 12 km en los polos y de 14 km a 18 km en los trópicos.

2.3 IDENTIFICACIÓN VISUAL DE TIPOS DE NUBE.

2.3.1 Género, especie y etapas

La observación de las nubes muestra que éstas toman varias formas características que se conocen y nombran internacionalmente. Así que el observador del tiempo puede grabar y reportar el estado local del cielo en una dirección estando listo para comprenderlas sin la ayuda de fotografías.

Las estaciones climatológicas hacen sus observaciones cada 6 horas aproximadamente alrededor del mundo, identificando la cantidad y el tipo de nubes presente y esta información se

transmite para su uso inmediato; para realizar una investigación climatológica, muchas estaciones hacen una evaluación más limitada del estado del cielo cada hora.

El método internacional de nombrar a las nubes sirve como una guía conveniente a seguir para organizar o discutir la dinámica de nubes. Las categorías del reporte de nubes por observación se fundamentan solamente en la apariencia visual que presentan. Por lo tanto el observador no requiere hacer una interpretación física, solamente una descripción. El propósito de este método es proporcionar una explicación dinámica para cada tipo de nube.

El método de identificación visual y clasificación de nubes que se presenta es básicamente el de la organización meteorológica mundial del Atlas Internacional de Nubes, el que es el libro guía oficial de todos los observadores del estado del tiempo alrededor del mundo de acuerdo a este esquema de nubes, estos tipos tienen un nombre descriptivo basándose en palabras de procedencia latina. "*Cúmulus*" que significa montón o pila. "*Estratus*" es el pasado participio del verbo aplastado o cubierta por una capa. "*Cirrus*" que significa un mechón de cabello o una cola de caballo, "*Nimbus*" se refiere a una nube precipitándose y "*Altim*" es la palabra para altura. Estas cinco raíces del latín se usan separadamente o en combinación para definir diez géneros de nubes mutuamente excluyentes, que se organizan dentro de tres grupos o etapas, correspondiendo cada etapa a la altura típica de la base de las nubes con respecto a la altura local desde la superficie de la tierra como se indica en la tabla 1.

Las etapas y sus límites varían con la altitud. Cada tipo puede tomar muchas formas diferentes las que se designaron como especies. Las especies son las más recientes subdivisiones dentro de las variedades de nubes. En este trabajo se hace referencia únicamente a pocas especies y variedades sin embargo se considera a todos los géneros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Género	Categoría	Altura desde la superficie a la base de la nube		
		Región Polar	Región Templada	Región trópical
Cúmulos Cúmulonimbos Estratos Estratocúmulos Nimboestratos	Bajo	Debajo de 2 Km	Debajo de 2 Km	Debajo de 2 Km
Altoestratos Altoeúmulos	Medio	2 - 4 Km	2 - 7 Km	2 - 8 Km
Cirros Cirroestratos Cirroeúmulos	Alto	3 - 8 Km	5 - 15 Km	6 - 18 Km

Tabla 1 Género y categorías de nubes identificadas visualmente.

En adición dentro de los géneros de la tabla 1 se incluye a la niebla como el onceavo tipo de nube.

La niebla es generalmente una nube cuya base toca tierra. Sin embargo esta no aparece como un género de nube en la tabla 1 ya que de acuerdo a los procedimientos de especificaciones internacionales para reportar y archivar datos meteorológicos, la niebla no se clasifica como nube por los observadores climáticos, sino que se clasifica como una "restricción a la visibilidad". En este trabajo no se parte de esta convicción, se consideramos a la niebla un tipo de nube. Ésta se agrupa con las nubes de baja etapa ya que la base toca la tierra.

En las secciones 2.4 a 2.6 se definen cada uno de estos tipos de nube, se describen brevemente y muestran ejemplos gráficos correspondientes a los 10 géneros listados en la tabla 1 incluyendo a la niebla. Se examinan estos 11 tipos de nubes en grupos de acuerdo a su etapa, considerando

primero las nubes bajas, después nubes intermedias y finalmente nubes altas. Este orden de discusión sigue el procedimiento que sigue normalmente un observador del climatológico, como el trabajo de observación sirve para describir el estado total del cielo en función de todas las nubes presentes. Primero se identifican las nubes bajas; para obtener dimensiones ya que estas son poco conocidas, después se determinaron las nubes intermedias y finalmente se evaluaron las nubes altas.

Después de discutir los 11 tipos básicos de nubes y su grupo en las secciones 2.4 a 2.6, además, algunas de estas nubes se denominan como *lenticulares* que es una especie de Estratocúmulos, Altocúmulos o Cirrocúmulos, lenticubris; que se considera un genero en sí mismo y por lo que se trata separadamente.

2.4 CATEGORÍA DE NUBES

NUBES BAJAS.

Las nubes de baja altura incluyen seis tipos: los cinco géneros de nubes bajas listados en la tabla I más la neblina. Estos seis tipos pueden dividirse dentro de 2 subgrupos: nube cumuliforme (Cúmulos y Cúmulonimbus), que están compuestas de corrientes rápidas de aire ascendente que da a las nubes un burbujeo y un aspecto de torres y nubes Estratoforme (niebla Estratos, Estratocúmulos y Nimboestratos), que son extensas capas de nubes inactivas caracterizadas por pequeños movimientos no verticales de aire.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6. Los Stratocumulus (símbolo Sc) se componen de gotas de agua y pertenecen al grupo de las nubes bajas (desde la superficie hasta los 2000 metros). Estas nubes son bajas, gruesas y grises. Suelen formar hileras con trozos de cielo azul visible entre ellas. Las precipitaciones ocurren raramente con los Stratocumulus.

2.4.1 Nubes Cúmuloformes

Nubes Cúmulos son nubes separadas, generalmente densas con perfiles de forma desarrollados verticalmente en la forma de Cúmulos ascendentes, domos o torres, cuya parte superior frecuentemente se asemeja a una coliflor. La parte iluminada por el sol de estas nubes tiene una parte blanca brillante, su base es relativamente oscura y casi horizontal. Algunas veces las nubes Cúmulos son imperfectas, estas nubes Cúmulos se encuentran en un rango amplio de tamaños, sin embargo, éstas son menores que un kilómetro de dirección vertical y horizontal y a menudo nunca llegan a un volumen grande (figura 6.1a). Particularmente cuando la nube esta aislada. En otras ocasiones, cuando hay una tendencia de las nubes a arremolinarse, las Cúmulos pueden crecer a un gran tamaño (figura. 6.1b).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.1a Nube del género cúmulos "humilis".



Figura 6.1b Nube del genero cúmulos "congestus".

Una nube Cúmulos de gran tamaño (especie congestus) consiste en un cúmulo en forma de una torre de burbujas cuya forma asemeja una coliflor, éstas pueden extenderse hasta llegar a la 2ª etapa, donde se consideran nubes bajas, esto es porque usualmente la base está en la capa más baja.

Cúmulonimbus: ésta es una nube densa y pesada con un área vertical considerable con una forma de montaña o una torre enorme, en la parte superior tiene una porción mínima, usualmente es uniforme o fibrosa y casi siempre aplastada, se extiende hacia afuera y forma un yunque o un gran penacho. La parte de la base de esta nube, la cual es a menudo muy oscura se mezcla y algunas veces precipitan en forma de "virga" (esta es una precipitación que no llega a la tierra). La Cúmulonimbus es una etapa avanzada del desarrollo de la Cúmulos. Como las Cúmulos congestus continúan creciendo, generan precipitación (hacia la designación de Nimbus) y la parte superior usualmente se vuelve hielo.

Un ejemplo de Cúmulos congestus creciendo a una etapa de Cúmulonimbus se encuentra en las figuras 6.1a y 6.1b. En otra etapa posterior, puede llegarse a producir una estructura de "yunque" ya que en la parte superior el viento no puede "soplar" de abajo hacia arriba por tener

vientos mas fuertes por encima (figura 6.2c y 6.2d). La parte superior del yunque en la nube usualmente esta muy cerca del nivel de la tropósfera; debido a que la nube esta aplastada en la parte superior y no puede penetrar significativamente en la estratósfera ya que es muy estable. Como en la época de glaciación del yunque tiene grandes cantidades de material de nube helada ésta se introduce dentro de lo más alto de la tropósfera (figura 6.3).



Figura 6.2a Nube Cúmulus congestus creciendo a una etapa de Cúmulonimbus.



Figura 6.2b Nube Cúmulus segunda etapa.



Figura 6.2c Nube Cúmulus tercera etapa.



Figura 6.2d Nube Cúmulus cuarta etapa.

Figuras 6.2a - 6.2c Secuencia temporal que muestra el desarrollo de la nube del género cúmulus a un género Cúmulonimbus.

Desde la perspectiva de un satélite, el yunque evoluciona con el viento a su favor, esta es la característica primaria para identificar una Cúmulonimbus (figura 6.4), por ejemplo Cúmulos

Congestus, las Cúmulonimbus se clasifican como nubes bajas porque su base esta dentro de las etapas más bajas, éstas frecuentemente se extienden a través de todas las tres capas aunque el yunque este dentro de la etapa más alta.



Figura 6.3 Como en la época de glaciación del yunque tiene grandes cantidades de material de nube helada ésta se introduce dentro de lo más alto de la tropósfera.



Figura 6.4 Desde la perspectiva de un satélite, el yunque evoluciona con el viento a su favor, ésta es la característica primaria para, identificar una Cúmulonimbus.

La forma de yunque no es una característica esencial de la Cúmulonimbus. En el trópico una Cúmulos con forma de Torre cuyo tope esta por debajo del nivel de temperatura de 0°C , frecuentemente forma un chubasco fuerte de lluvia. Después de esta lluvia, la Cúmulos Torre se transforma a Cúmulonimbus. A latitudes más altas no puede verse la forma de yunque ya que el viento corta a la nube debido a que ésta es débil incluso si la parte superior de la nube esta compuesta de partículas de nieve.

La niebla es generalmente alguna nube cuya base toca la tierra. Por lo tanto ese tipo de nube cubre al cerro o montaña y si esto sucede se reportara como niebla por el observador, aunque éste se localice bajo la nube y se clasificará dentro de los 10 géneros listados en la tabla 1 se

considera una niebla verdadera al resultado del contacto del aire con la tierra y como tal ésta no se describe en términos de uno de los diez géneros propuestos aquí, el tipo más común y difundido de niebla es cuando una capa de aire está en contacto con una superficie fría. "Niebla de radiación" ocurre cuando la superficie se enfría por radiación de rayos infrarrojos, ésta se forma bajo condiciones de mucha calma; turbulencia, en contraparte se asocia con algún viento que destruye la niebla. Un ejemplo de niebla de radiación se muestra en la figura 6.5a. La niebla de radiación puede ser bastante difundida y puede cubrir la mesoescala o la región de escala sinóptica de la tierra (por ejemplo en la figura 6.5b la niebla se ve cubriendo parte del valle Central de California). La niebla se forma cuando el aire caliente toca una superficie fría (figura 6.5c), el vapor de niebla se forma cuando el aire frío toca agua caliente y se forma un vapor turbulento ascendente desde la superficie del agua (figura 6.5d).

La Estratos generalmente es una capa de nube gris con una base bastante uniforme que puede producir llovizna, prismas de hielo o granos de nieve. Cuando los rayos del sol pasan a través de la nube, este perfil es claramente visible, algunas veces en las Estratos se asemeja la forma de "parches defectuosos". Este tipo de nube es difícil de observar completamente desde la tierra porque ésta frecuentemente se extiende horizontalmente y tiende a engañar porque es como una manta y es imposible ver la parte superior o los lados de la nube (figura 6.6a).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.5a Un ejemplo de niebla de radiación.



Figura 6.5b La niebla se ve cubriendo parte del valle Central de California.



Figura 6.5c La niebla se forma cuando el aire caliente toca una superficie fría.



Figura 6.5d El vapor de niebla se forma cuando el aire frío toca agua caliente.

Cuando se hace la observación por encima, como en la figura 6.6b y el sol no está cubierto por nubes medias o altas, la cima de la nube podría ser blanca brillante en contraste a estas figuras grises como cuando se observa desde abajo. La Estratos no es regularmente una nube muy gruesa (≤ 1 km)

Estratocúmulos, se refiere a "una capa o lamina gris o blancuecina" esta nube casi siempre tiene partes oscuras compuestas de mosaicos, masas redondas, rollos, etc., y no es fibrosa (excepto

por la "virga") y que puede o no mezclarse; la mayoría de las organizaciones regulares de los elementos pequeños usualmente tienen una apariencia gruesa.



Figura 6.6a La Estratos generalmente es una capa de nube gris con una base bastante uniforme que puede producir llovizna, prismas de hielo o granos de nieve.



Figura 6.6b Cuando se hace la observación por encima y el sol no está cubierto por las nubes la cima de la nube podría ser blanca brillante.

Este tipo de nube es en general muy similar a la Estratos esta similitud es que ambas tienen una capa baja sobresaliente de nube. Aunque ésta se distingue de la Estratos en que tiene elementos claramente identificables (figura 6.7a).

Vista desde una aeronave, la Estratocúmulos algunas veces aparece como un "mosaico de masas" (figura 6.7b) aunque para otros eventos ésta muestra mosaicos o rollos llamados nubes exteriores o secciones de nubes (figura 6.8a). Las secciones de nubes pueden ser muy largas y los elementos individuales de la nube en las secciones exteriores pueden ser más vigorosas y tomar la forma de Cúmulos, pequeña o moderada (figura 6.8b).



Figura 6.7a. La nube Estratocúmulos es con frecuencia muy similar a la Estratos esta similitud es que ambas tienen una capa baja sobresaliente de nube.

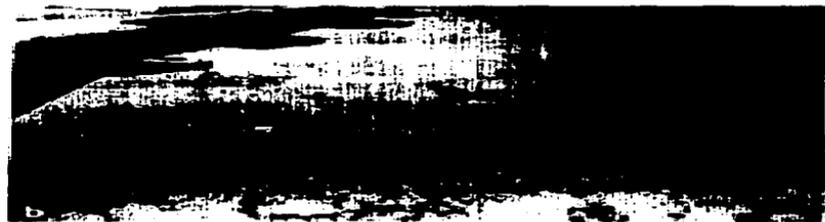


Figura 6.7b. La Estratocúmulos algunas veces aparece como un mosaico de masas.



Figura 6.8a. Mosaicos o rollos llamados nubes exteriores o secciones de nubes.



Figura 6.8b Las secciones de nubes pueden ser muy largas y los elementos individuales de la nube en las secciones en su exterior pueden ser más vigorosas y tomar la forma de Cúmulos, pequeña o moderada.

Las fotos de satélite muestran que las Estratos y Estratocúmulos pueden cubrir regiones de aproximadamente 1000 Km en dirección horizontal (figura 6.9a). Estas además muestran que un campo de Estratos no están separadas comúnmente de las Estratocúmulos. En el ejemplo de Estratos y Estratocúmulos de la costa oeste de Norte América (figura 6.9a) las nubes más cercanas a la costa muestran texturas pequeñas y consistencia de Estratos y/o niebla. Lejos en el mar la capa de nubes se vuelve Estratocúmulos. El modelo se vuelve progresivamente más texturizado, rompiendo la parte superior gradualmente en una Estratocúmulos larga. En el esquema de los litorales del oeste y sudeste de Norte América (figura 6.9b) la forma predominante de nubes es una hilera larga de Estratocúmulos organizada en forma de áreas superficiales de nubes debido a los vientos fuertes que soplan sobre las aguas templadas del oeste del Atlántico y del sudoeste del Golfo de México.

Las secciones exteriores de nubes se extienden más allá del mar y eventualmente se aprecian como un enmarañado de Estratocúmulos. Algunos elementos de las secciones o exterior de las nubes pueden ser Cúmulos pequeños o moderados o Cúmulonimbus consideradas más bien Estratocúmulos, como se muestra en la figura 6.8b.



Figura 6.9a Las fotos de satélite muestran que las Estratos y Estratocúmulos pueden cubrir regiones de aproximadamente 1000 Km en escala horizontal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.9b El modelo se vuelve progresivamente más texturizado, rompiendo la parte superior gradualmente en una Estratocúmulos larga.

2.4.2 Nimboestratos:

Es una nube de capa gris, frecuentemente de apariencia oscura la cual se vuelve difusa por la caída más o menos continua de lluvia o nubes que en muchos casos llega a alcanzar a la tierra, como este espesor está creciendo llegan a ocultar al sol.

La diferencia principal entre Nimboestratos y Estratos es que la forma de la primera puede ser extremadamente profunda en un punto máximo y alcanzar al nivel de la tropósfera y que la segunda nunca produce una precipitación significativa como usualmente la Nimboestratos lo hace. Por lo tanto la nube Nimboestratos profunda, parece Cúmulonimbus, ya que puede extenderse a través de todas las etapas y además la capa superior de la nube está compuesta completamente de hielo. Esto es difícil de ilustrar en una fotografía, ya que simplemente una nube oscura con lluvia cubre completamente el cielo (figura 6.10). Además la base de la nube puede no estar tampoco en la zona baja o media. El área de lluvia es extensa y restringe la

visibilidad horizontal de objetos distantes tales como las islas en la figura 1.10 éstas son progresivamente más oscuras.



Figura 6.10. La nube Nimboestratos profunda, parece Cúmulonimbus, ya que puede extenderse a través de todas las etapas y además la capa superior de la nube esta compuesta completamente de hielo.

2.5 NUBES CENTRALES (NIVEL MEDIO).

Hay solo dos géneros de nubes de la categoría media (tabla 1). La Altoestratos, ésta es una nube de una capa o lámina grisácea o azulada de apariencia rasgada, fibrosa o sin forma que cubre, total o parcialmente el cielo y con partes suficientemente delgadas para dejar ver el sol difusamente como a través de una superficie de hielo.

2.5.1 Altoestratos:

Este tipo de nube no presenta el fenómeno de halo. Esta difiere de la Estratos en que la base de la nube está en la etapa media. La base de la nube es más clara sobre la montaña en el ejemplo mostrado en la figura 6.11 y difiere de la Nimboestratos en que la precipitación de la Altoestratos, no llega a la tierra y no siempre oscurece al sol, la Altoestratos algunas veces presenta una forma de corona compuesta de colores o luces y centellas.



Figura 6.11 Altoestratos, este tipo de nube no presenta el fenómeno de halo.

2.5.2 Altocúmulos:

Es una nube blanca o gris en forma de mancha, capa o lámina, generalmente con sombra compuesta de lámina, masas redondas, rollos, etc. que son algunas veces parcialmente fibrosas o difusas y que pueden o no mezclarse entre sí.

Es usualmente una nube delgada y se distingue por su forma de tren ya que se compone de distintos elementos, éstos pueden tomar diferentes formas y consecuentemente se reconocen varias especies y variedades de Altocúmulus.

Las capas delgadas se rompen en la parte superior en distintas formas, éstas formas se denominan Altocúmulos estratiformes y son similares a las Estratocúmulos excepto en que la base de ésta se localiza en niveles intermedios. Algunas veces las formas de estas nubes son un grupo, no muy bien detallado y dan la apariencia de un mosaico figura 6.12°.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.12a. Altocúmulos, es usualmente una nube delgada y se distingue por su forma de tren .



Figura 6.12b. En otros casos, los elementos pueden parecer rollos largos.

En otros casos, los elementos pueden parecer rollos largos (figura 6.12b). Altocúmulos "Floccus" (que significa copo de lana, figura 6.12c) y "Castellanus" (que significa en forma de castillo, figura 6.1d). Las nubes Cúmulos están más elevadas que las Estratocúmulos.



Figura 6.12c Altocúmulos "Floccus" que significa copo de lana.



Figura 6.12d Altocúmulos "Castellanus" que significa en forma de castillo.

2.6 NUBES ALTAS

De acuerdo a la tabla 1 hay tres géneros de nubes altas: Cirros, Cirroestratos y Cirrocúmulos.

2.6.1 Cirros:

Son nubes separadas en forma de filamentos blancos y delicados o bien blancos o con manchas formando principalmente parches blancos o franjas estrechas. Estas nubes tienen una apariencia de fibras como cabellos con un brillo de seda.

2.6.2 Cirroestratos:

Es una nube blanquecina transparente con halo de fibras parecido a cabello con apariencia tersa que cubren totalmente o parcialmente el cielo y generalmente producen el fenómeno de halo.

2.5.5 Cirrocúmulos:

Es una nube con forma de capa o lámina con manchas sin matices, compuestas de varios elementos pequeños en forma de granos, rizos, etc. mezclados o separados y organizados más o menos regularmente; muchos de estos elementos no son llegan ha ser ni gruesos ni anchos.

Los ejemplos de estos tres tipos de nubes altas se muestran en la figura 6.13a. Las secciones de la figura se organizan en orden de etapas de ciclos de vida de la nube Cirroforme. La capa de la nube en la (figura 6.13a) corresponde a una nube Cirrocúmulos. Pueden verse los elementos individuales de la nube en forma de granos y rizos. Los elementos de estas nubes tienen una apariencia sólida no fibrosa comparada con la forma de Cirros mostrada en las figuras 6.13b-d.

Esta apariencia sólida es característica de los elementos de la Cirros en una etapa de evolución, originada por una corriente de aire ascendente.



Figura 6.13a. Nube Cirroforme primera etapa.



Figura 6.13b. Nube Cirroforme segunda etapa.



Figura 6.13c. Nube Cirroforme tercera etapa.



Figura 6.13d. Nube Cirroforme cuarta etapa.

Las secciones de las figuras se organizan en orden de etapas de ciclos de vida de la nube Cirroforme.

La nube Cirroforme ésta formada casi completamente de partículas de hielo. Muchas de estas partículas, individuales parecen muy largas y la presión de vapor saturada del hielo es lo suficientemente baja para que las partículas de las que está compuesta la nube se evaporen lentamente. Los vientos fuertes a altos niveles pueden por lo tanto transportar las partículas a

grandes distancias, proyectando así, nubes Cirros que se caracterizan por su apariencia fibrosa o filamentosas, que exagerando parece como si la nube creciera.

Las nubes en la figura 6.13b son Cirros "Flocus"; similares en apariencia a las "Flocus" Alto cúmulos observadas en la figura 6.12c, ellas presentan un pequeño avance pequeño de etapa, desarrollándose en esta etapa Cirros que se forman por sólidos frágiles, como aquellos vistos en la figura 6.13a que son Cirrocúmulos dobles y aparentan ser difusas y fibrosas aunque parte de ellas conservan trozos de su estructura. La evaporación lenta de partículas de hielo se debe principalmente a la expansión de la masa de la nube. Los grandes filamentos o hilos de la Cirros, forman un "gancho" debido a que el viento sopla en la parte superior de la nube como se muestra en la figura 6.13c, estas se nombran Cirros "Uncinus", cuyo significado en latín es "en forma de gancho". Estas son una evolución a una etapa mayor, que la Cirros Flocus que se observa en la figura 6.13b. En este caso las nubes producen cristales de hielo tomando un aspecto relativamente débil. Aunque la escarcha que forman las partículas de hielo cae fuera del grupo que forma la nube, tendiendo de esta manera a convertirse en una nube más larga. Este tipo de Cirros en algunas veces se nombra "cola de caballo". La Cirros que no tiene forma de "garfío o gancho" (figura 6.13d) se nombra Cirros "Fibratus" que está en una etapa más avanzada de desarrollo de la Cirros. El ejemplo en la figura 6.13d es un caso especial: Cirros "Fibratus Vertebratus", refiriéndose a los elementos dispuestos dentro de una forma que asemeja un esqueleto de pescado.

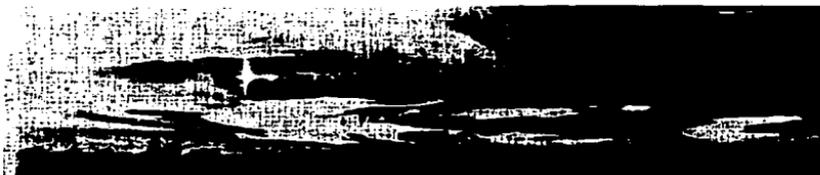


Figura 6.14. Cirrus "Spissatus", este tipo de nubes están llenas de hielo que pueden o no precipitar en forma de partículas de hielo.

Otro tipo de Cirros se muestra en la figura 6.14, este se nombra Cirros "Spissatus" (pasado participio del verbo latín cuyo significado es "condensado o ancho"). Este tipo de nubes están llenas de hielo que pueden o no precipitar en forma de partículas de hielo provocando que la nube tenga un gran espesor y debido a la acción del viento en los niveles más altos, presente una forma curva. El resultado de la forma de "garfio o gancho" es una característica que presenta la Cirros "Uncinus" como se ve en la figura 6.13c. La Cirros "Spissatus" puede también ser generada por el flujo o remanencia de "yunque" Cirroforme de una nube Cúmulonimbus (figura 6.13d). Muchas de las Cirros en la atmósfera se localizan especialmente en el trópico.

Cuando la nube Cirroforme produce capas de pequeños granos o una subestructura ondulada, se denomina Cirroestratos. Estas pueden producirse de diversas formas, algunas veces como resultado de un viento sobre la Cúmulonimbus (como en la figura 6.13, pero sobre un área extensa) o esta puede ser introducida al nivel superior o el tope de una nube Nimboestratos. Una forma común de Cirroestratos es la del tope de un sistema frontal de la nube (como puede observarse en la fotografía de satélite). Una característica común de Cirroestratos es la que

produce un halo como los rayos de sol a través de la capa de las partículas de hielo (figura 6.15).



Figura 6.15. Una característica común de Cirroestratos es la que produce un halo como los rayos de sol a través de la capa de las partículas de hielo.

2.7 OROGRAFÍA DE LAS NUBES

El aire en movimiento alrededor o sobre los cerros o terrenos montañosos frecuentemente influye sobre la formación de las nubes. Muchos de los géneros especiales básicos de las nubes ya descritas pueden ser influenciados o afectados orográficamente; por ejemplo, las cadenas de montañas son típicamente localizadas por la presencia de niebla, o preferentemente por Estratos, Estratocúmulos, Cúmulos y Cúmulonimbus. Estas formaciones están afectando la estructura y precipitación de las nubes Nimboestratos asociadas con sistemas húmedos tales como frentes, valles entre montañas, frecuentemente favorecidos por fenómenos de niebla. En suma, la modificación de los tipos de nubes que pueden presentarse en cualquier lugar se asocia con ese lugar ya que hay formas de nubes que son asociadas únicamente con la topografía.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Como se mencionó antes, las especies lenticulares pueden describir algunas de estas formas de nube. Las nubes lenticulares se forman cuando el aire fluye sobre la montaña. Si la montaña es de forma muy picuda, separa a la nube y se forma una capa directamente sobre la cima de la montaña (figura 6.16). Las nubes lenticulares pueden formarse también por la acción del viento a favor sobre el pico.

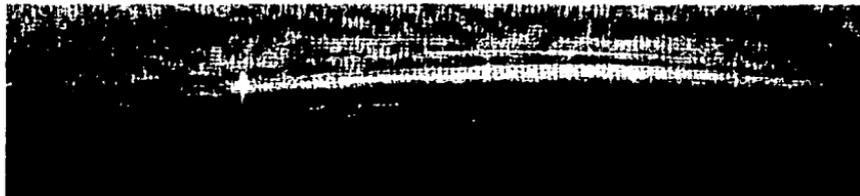


Figura 6.16. Las nubes Lenticulares se forman cuando el aire fluye sobre la montaña. Si la montaña es de forma muy picuda, separa a la nube y se forma una capa directamente sobre la cima de la montaña.

Un ejemplo de este fenómeno se muestra en la figura 6.17, donde la nube lenticular por la acción del viento a favor sobre el pico de la montaña origina una formación tipo "herradura".



Figura 6.17. Nube lenticular con una formación de "herradura".

Si la nube se encuentra en dos direcciones con una montaña, cuyo pico este casi curvo, como redondeado, las nubes ondulatorias pueden tomar la forma de bandas largas. En la figura 6.18 se muestran las nubes ondulatorias asociadas con las regiones continentales de las montañas rocosas en Colorado. En el cerro se forman principalmente las nubes ondulatorias ya que pueden observarse a distancia

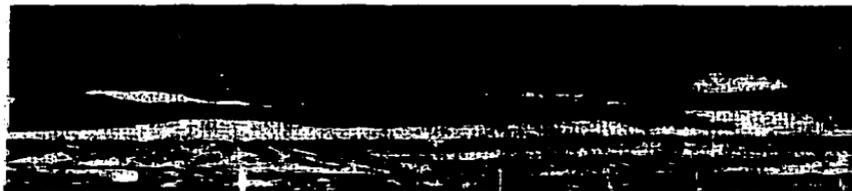


Figura. 6.18. Nubes ondulatorias asociadas con las regiones continentales de las montañas rocosas en Colorado.

En estos cerros se forman franjas o bandas de nubes ondulatorias. Estos grandes montones de nubes lenticulares pueden observarse desde varios puntos a lo largo de la montaña. Algunas veces las bandas de nubes ondulatorias en las laderas de los cerros puede tener el aspecto de una columna de humo (figura 6.18), frecuentemente una serie de nubes lenticulares ondulatorias se forman en los recodos de un cerro o un pico, dichas series de nubes se pueden observar en la figura 6.19 hacia el este sobre el plano continental.



Figura 6.19. Algunas veces las bandas de nubes ondulatorias en las laderas de los cerros puede tener el aspecto de una columna de humo.

Algunas veces los vientos violentos se producen en los recovecos de una colina montañosa. Los vientos violentos se asocian a las nubes rotatorias, que son una línea de nubes que se producen a favor del viento de los cerros (figura 6.20).



Figura 6.20. Nubes lenticulares ondulatorias formadas en los recodos de un cerro o un pico.

El nombre de nubes rotatorias implica que el aire en la nube regresa verticalmente en forma de rollo y cuyo eje es paralelo al viento superior en la montaña. No está claro que el aire regrese realmente siempre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 6.21. Nube rotatoria.

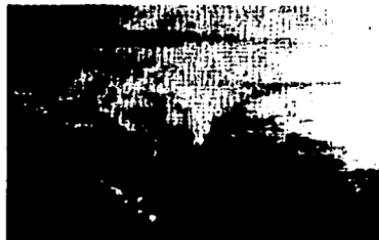


Figura 6.22. Nube rotatoria.

En ambas figuras 6.21 y 6.22 las nubes bajas pueden verse ahorcando la colina montañosa; esta nube esta especialmente clara en la figura 6.22 donde el límite delantero de la nube cubre el área de la colina montañosa.

La característica principal de las nubes es que el aire crece abruptamente en ellas y el resultado es que el movimiento del aire puede ser extremadamente turbulento. Se puede observar un ejemplo de nubes rotatorias observadas desde diversas aeronaves en las figuras 6.21 y 6.22. En ambos ejemplos, se observa claramente sobre el valle vientos bajos de la montaña donde los fuertes vientos de la ladera tienden a impedir la formación de todas las nubes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3

MICROFÍSICA DE NUBES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

37-A

3.1 MICROFÍSICA DE NUBES.

La física de nubes se divide en dos ramas: la microfísica de nubes y la dinámica de nubes, en este capítulo se tratará a la microfísica de nubes, aún cuando es imposible separar el tema de la dinámica de nubes.

Una nube es un conjunto o asociación, de gotitas de agua, aunque muchas veces también lo es de gotas de agua y de cristales de hielo. La masa que forman se distingue a simple vista, suspendida en el aire, y es producto de un gran proceso de condensación, éstas masas se presentan con los más variados colores, aspectos y dimensiones, según las altitudes en que aparecen y las características particulares de la condensación.

El tamaño de las gotitas que integran una nube varía desde unas pocas micras hasta 100 micras. Éstas, al principio son casi esféricas, dependiendo su crecimiento del calibre y composición del núcleo de condensación, así como de la humedad del aire. Cuando las gotitas se hacen mayores, pierden su forma esférica y toman la clásica de pera, con la que casi siempre se las representa, cuando llega el momento en que ya no pueden sostenerse en la atmósfera inician el camino hacia tierra.

Los cambios de fase del agua juegan un papel primordial en la microfísica de la nube. Los posibles cambios son los siguientes:

Vapor \longleftrightarrow Líquido (condensación, vaporización).

Líquido \longleftrightarrow Sólido (solidificación, fusión).

Vapor \longleftrightarrow Sólido (deposición, sublimación).

Los cambios de izquierda a derecha en el esquema anterior son de importancia meteorológica: son los cambios que tienen lugar en orden molecular creciente y que conducen a la formación de la nube. Uno de los problemas de la física de las nubes es que estos cambios tienen lugar en equilibrio termodinámico.

Estas transiciones han de superar una "barrera de energía libre" que las dificulta, las gotitas de agua poseen unas intensas fuerzas de tensión superficial que, para aumentar de tamaño por condensación, tienen que ser contrarrestadas por un fuerte gradiente de presión de vapor. En estas condiciones las gotitas de nube necesitan para formarse humedades relativas superiores al 100%.

Así, el problema de la microfísica de nubes es explicar porque se forman las gotas de nubes en la atmósfera real incluso a humedades menores al 100%. La respuesta está basada en la existencia en la atmósfera de partículas de tamaño micrométrico que tienen gran afinidad por el agua y actúan como núcleos de condensación, es lo que recibe el nombre de nucleación heterogénea (la homogénea sería en una atmósfera limpia, pero necesita saturaciones extremas). En la atmósfera existen muchos tipos de núcleos de condensación; algunos de ellos se humedecen a humedades inferiores al 100%, los núcleos que alcanzan tamaños relativamente grandes son los que pueden dar lugar a gotas de nube. El aire húmedo al enfriarse por ascenso adiabático, llega a alcanzar una humedad relativa cercana al 100%; en estas condiciones los núcleos más higroscópicos empiezan a actuar de núcleos de condensación, si el ascenso continúa, el enfriamiento produce sobresaturación y ésta se agota por condensación sobre los núcleos (la sobresaturación es el exceso de humedad relativa sobre el 100%, por ejemplo, 101.5%). En las nubes suelen existir núcleos suficientes para que la sobresaturación no sobrepase el 1%. Si la nube sigue su ascenso, su cima puede alcanzar temperaturas inferiores a los 0° C, por lo que las gotitas de agua pueden o no solidificar esto dependerá de la existencia

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de núcleos de hielo. La presencia de gotas a temperatura bajo cero en equilibrio con agua líquida es frecuente en la atmósfera a temperaturas de hasta -15°C .

Una nube es un agregado de pequeñísimas gotitas, en número aproximado de unas 100 por centímetro cúbico, cuyos radios son del orden de las 10 micras. En general esta estructura es muy estable y las gotitas no tienden a juntarse y aumentar de tamaño. La precipitación se origina cuando el conglomerado se hace inestable y unas gotas crecen a expensas de las otras.

Dos son los mecanismos que producen este efecto; la colisión o choque directo de las gotas y la interacción entre gotitas de agua y cristales de hielo (en nubes que superan el nivel de los 0°C).

Cuando mediante estos procesos las gotas o los cristales de hielo alcanzan el tamaño adecuado pueden empezar a caer si la velocidad de caída puede compensar las corrientes de aire ascendentes en el interior de la nube, y producirse la precipitación.

3.2 NUCLEACIÓN DE GOTAS.

Las partículas dentro de una nube se pueden formar por un proceso llamado *nucleación*, en el cual las moléculas de agua cambian su forma de un estado de menor orden a uno de mayor orden. Por ejemplo, las moléculas de vapor en el aire pueden agruparse por la probabilidad de que choquen para así formar una gota en fase líquida.

Para observar como se lleva a cabo este proceso, se consideran todas las condiciones necesarias para la formación de una gota de agua pura a partir de vapor.

Este tipo se denomina *nucleación homogénea* para distinguirla del tipo de *nucleación heterogénea*; la cual se refiere a la unión de moléculas que provienen de sustancias ajenas entre sí.

Si la gota "embrión" de agua pura posee un radio R , entonces la energía requerida para alcanzar esta nucleación esta dada por:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma_v - \frac{4}{3}\pi R^3 n_l (\mu_v - \mu_l) \quad (1)$$

El primer término de la derecha es energía requerido para crear una superficie de interfase líquido-vapor alrededor de la gota. El factor σ_v es el trabajo requerido para formar un área unitaria de la interfase, la cual se denomina energía de superficie o tensión superficial; el segundo término de la derecha de la ecuación (1) es el cambio de energía asociada con las moléculas de vapor yendo dentro de la fase líquida, ésta se expresa como el cambio en la energía libre de Gibbs del sistema.

La energía libre de Gibbs de una sola molécula de vapor es μ_v , mientras que de una molécula de líquido es μ_l , y el factor n_l es el número de moléculas de agua por unidad de volumen en la gota. Si el trabajo requerido para crear la superficie excede el cambio en la energía libre de Gibbs ($\Delta G > 0$), la gota "embrión" formada por el cambio de agregación de la molécula no tiene la oportunidad de mantenerse e inmediatamente se evapora; de otro modo si la energía requerida para crear la superficie es menor que el cambio en la energía libre de Gibbs ($\Delta G < 0$), entonces la gota permanece. Esto puede mostrar que:

$$\mu_v - \mu_l = K_B T L n \frac{e}{e_s} \quad (2)$$

Donde K_B es la constante de Boltzman, e es la presión de vapor, y, e_s es la presión del vapor saturado sobre una superficie plana de agua. Sustituyendo esta expresión en la ecuación 1, buscando las condiciones en la cual la energía requerida para cambiar la superficie de la gota sea exactamente igual que el cambio en la energía libre de Gibbs ($\Delta G = 0$), y acomodando términos, obtendremos la expresión para el radio crítico, R_c en el cual esta condición de equilibrio se mantiene. Esta expresión es:

$$R_c = \frac{2\sigma_v}{n_l k_B T \ln(e/e_s)} \quad (3)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esta relación se conoce como fórmula de Kelvin. En esta expresión el radio depende de la humedad relativa (definida como $e/e_s \times 100$), como el aire se expresa como saturado, entonces, siempre la humedad relativa será 100% ($e/e_s = 1$). Sin embargo esto está de manifiesto que para la ecuación (3) es imposible para que una gotita de nube genere las condiciones dentro de la saturación a partir de que entonces $R_c = \infty$, como $e/e_s = 1$; más bien el aire debe ser sobresaturado ($e/e_s > 1$) para que R_c sea positivo. La mayor *sobresaturación* (definida en porcentaje, como $((e/e_s - 1) \times 100\%)$), la reducción del tamaño de la gota debe ser excedida por la oportunidad inicial de colección de moléculas.

Aquí debe notarse que R_c es también función de la temperatura, no solo por que aparezca T en el denominador de la ecuación (3), explícitamente, sino por que σ_w y e_s son función de T .

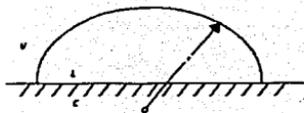
Sin embargo, la dependencia de R_c a la temperatura atmosférica, es comparativamente débil.

En vista de la independencia primaria de R_c sobre la humedad ambiental, no es sorprendente que el índice de nucleación de las gotas excediendo el tamaño R_c sea una función fuerte del grado de sobresaturación.

El grado en el que las moléculas de vapor chocan para formar agregaciones de varios tamaños, se puede calcular usando los principios de la mecánica cuántica estadística aplicada a un gas ideal dado que las moléculas están en un estado de movimiento aleatorio. Esta velocidad de formación de gotas que excede el tamaño crítico es la velocidad de nucleación. Aquí se encuentran los incrementos, desde los valores indetectablemente pequeños a los valores extremadamente grandes sobre un muy reducido rango de e/e_s .

Los valores de e/e_s , en el que la lluvia ocurre son en el rango de 4 a 5. Así, el aire puede ser supersaturado por 300 o 400%, para gota de agua pura, siendo nucleada homogéneamente. A partir de que en la atmósfera, la supersaturación rara vez excede el 1% uno puede concluir que la nucleación homogénea de gota de agua no juega un papel importante en las nubes naturales.

La nucleación heterogénea, es el proceso por medio del cual se forman las gotas de nube. La atmósfera está llena con pequeñas partículas de aerosol y las moléculas de vapor pueden colectarse sobre la superficie de las partículas de aerosol como lo muestra idealmente el esquema 6.



Esquema 6. Embrión esférico de líquido (L) en contacto con el vapor (V) y una superficie de nucleación (C).

Si la tensión superficial entre el agua y la superficie de nucleación es suficientemente pequeña el núcleo es en su interior humedecido, y el agua puede formar una capa esférica sobre la superficie de la partícula.

A la partícula sobre la cual las moléculas se colectan de esta manera se conocen como: *Núcleos de Condensación de Nubes (CCN)*¹.

Si un CCN es insoluble en el agua, la física gobierna la supervivencia del embrión de la gota de nube, siendo éste el mismo caso de una nucleación homogénea, esto puede mostrar que la ecuación 3 puede aplicarse pero R_c ha de interpretarse más generalmente en lo que se refiere al radio crítico de la curvatura de la gota embrionaria. Dado que el radio de curvatura de la gota formada es más grande que el que tendría si el mismo número de moléculas fuera agregada en ausencia de la partícula (esquema 6), la agregación de las moléculas de vapor tendrá una mayor oportunidad para producir gotas excediendo el radio crítico. Si las moléculas de agua agregadas forman una película de líquido rodeando completamente la partícula, entonces, una gota completa se forma en la que el radio es más grande de lo que sería en la ausencia de núcleo.

¹ Por sus siglas en inglés: Could Condensation Nucleus (CCN)

Claramente, tan grande como sea el núcleo, será la posibilidad de la supervivencia de una gota formada por una película alrededor de ésta.

Por esta razón, las partículas más grandes de aerosol tienen la mayor posibilidad de ser sitios para la formación de gotas en una nube natural.

Si sucede que los núcleos de condensación en la nube están compuestos por materiales que son solubles en agua, la eficiencia del proceso de nucleación se incrementa. A partir de que la saturación de la presión de vapor de la solución líquida es generalmente más pequeña que la de una superficie de agua pura, *etc.*, se incrementa de acuerdo a la ecuación 3, el radio crítico entonces se reduce, y la nucleación es más fácilmente alcanzada a la presión ambiental.

Las partículas de aerosol están más que suficientemente humedecidas en el aire para acomodar la formación de todas las gotas de nube. Sin embargo la física del proceso de nucleación solo describe las indicaciones para la primera gotita en la nube que tenderá a formarse al rededor de la más grande y más soluble CCN. El tamaño y composición de las partículas de aerosol en una muestra de aire tiene un profundo efecto sobre la distribución del tamaño de las partículas nucleadas en la nube.

3.3 CONDENSACIÓN Y EVAPORACIÓN DE GOTAS.

Una vez formada, las gotitas de agua pueden continuar creciendo por la difusión del vapor hacia éstas, este proceso se llama *Condensación* en el proceso inverso, las gotas de agua disminuyen su tamaño por difusión del vapor a cualquier otro lugar desde ellas, se llama *vaporización*. El crecimiento de las partículas por condensación y vaporización puede ser representado cuantitativamente considerando que el Flux de las moléculas de vapor a través del aire es proporcional al gradiente de concentración de las moléculas de vapor. En este caso, la densidad del vapor ρ_v (definido como la masa de vapor por unidad de volumen de aire) está regida por la ecuación de difusión:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \nabla \cdot (D_v \nabla \rho_v) = D_v \nabla^2 \rho_v \quad (4)$$

Donde $D_v \nabla^2 \rho_v$ es el flux de vapor de agua por la difusión molecular y D_v es el coeficiente de difusión (considerado constante) para el vapor de agua en el aire. La concentración de vapor alrededor del radio (R) de la esfera de la gota de agua pura, considerando que (R) es simétrico cerca de un punto localizado en el centro de la gota, y la difusión es considerada que está en estado estacionario, Bajo estas consideraciones, ρ_v depende solamente de la distancia radial r , desde el centro de la gota (esquema 6) se reduce a:

$$\nabla^2 \rho_v(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial \rho_v}{\partial r}) = 0 \quad (5)$$

La densidad del vapor en la superficie es ρ_v , como $r \rightarrow \infty$; la densidad del vapor se aproxima a la ambiental o al valor de $\rho_v(\infty)$ libre de aire.

La solución para la ecuación 5, satisfaciendo estas consideraciones en la frontera es:

$$\rho_v(r) = \rho_v(\infty) - \frac{R}{r} [\rho_v(\infty) - \rho_v(R)] \quad (6)$$

Si la gota tiene una masa m , el Flux de moléculas que originan esta masa para incrementar o disminuir esta razón, esta dado por:

$$m_{df} = 4\pi R^2 D_v \left. \frac{d\rho_v}{dr} \right|_R \quad (7)$$

Donde $D_v d\rho_v$ es el Flux de vapor en la dirección del radio a través de la superficie esférica del radio R.

Sustituyendo las ecuaciones 6 dentro de la ecuación 7 tenemos:

$$m_{df} = 4\pi R [\rho_v(\infty) - \rho_v(R)] \quad (8)$$

Donde $m \propto R$, se considera que la condición en el ambiente ($r = \infty$) es conocida. Para obtener una solución para m o R , se requiere otra relación primeramente se considera el balance de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

calor. En la condensación de vapor de agua sobre una gota, el calor latente es retirado a una velocidad Lm_{af} , donde L es el calor latente de vaporización, por lo que el calor es conducido a cualquier otro lugar desde la gota tan rápidamente como inicia a ser retirado, teniendo por analogía de la ecuación 8:

$$Lm_{af} = 4\pi R K_a [T(R) - T(\infty)] \quad (9)$$

Donde K_a es la conductividad térmica del aire y T es la temperatura.

Aplicando la ecuación de estado para un gas ideal al vapor de agua bajo condiciones de saturación sobre una superficie plana de agua pura, es:

$$e_s = \rho_v R_v T \quad (10)$$

Donde R_v es la constante de los gases por unidad de masa de vapor de agua y e_s y ρ_v son la presión de saturación y la densidad sobre una superficie plana de agua. A partir de que ésta depende solamente de la temperatura, resulta evidente de la ecuación 10 que ρ_v es una función conocida de T , de esta manera:

$$\rho_v(R) = \rho_v [T(R)] \quad (11)$$

y las ecuaciones 8, 9 y 11 pueden ser resueltas numéricamente para m_{af} , $T(R)$ y $\rho_v(R)$. Estas ecuaciones pueden ser, además, acomodadas analíticamente para casos especiales de una gotita creciendo o evaporándose en un ambiente saturado. En este caso especial se hace uso de la ecuación de Clausius-Clapeyron.

$$\frac{1}{s} \frac{de_s}{dT} \cong \frac{L}{R_v T^2} \quad (12)$$

Combinado las ecuaciones 10 y 12, además:

$$\frac{d\rho_v}{\rho_v} = \frac{L}{R_v} \frac{dT}{T^2} - \frac{dT}{T} \quad (13)$$

Entonces las ecuaciones 8, 11 y 13 pueden ser combinadas bajo condiciones de ambiente saturado para obtener:

$$m_{dg} = \frac{4\pi R S}{F_k + F_D} \quad (14)$$

Donde S depende de la humedad del ambiente, F_k de la conductividad de calor, y F_D de la difusión de vapor.

Más específicamente, S es la supersaturación ambiental, expresada como una función:

$$S = \frac{e(\infty)}{e_s(\infty)} - 1 \quad (15)$$

Los cuales se pueden calcular por:

$$F_k = \frac{L^2}{K_a R_v T^2(\infty)} \quad (16)$$

y

$$F_D = \frac{R_v T(\infty)}{D_v e_s(\infty)} \quad (17)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Desde las ecuaciones 14 a 17, es evidente que el incremento de la velocidad de difusión de una gota depende de la temperatura y la humedad del ambiente y del radio de la gota.

La ecuación 11, usada en la derivación de la ecuación 14 considera que la saturación de las gotas de la superficie se aproxima a la saturación que se obtendría sobre una superficie plana de agua.

Las gotas también deben de considerarse que están lo suficientemente diluidas con respecto al núcleo disuelto o a otra impureza, y éstas pueden ser consideradas como parte de la composición del agua. Para gotas muy pequeñas sin embargo, los efectos de la curvatura y solubilidad también deben ser incluidos. Si una gota está en crecimiento sobre un núcleo soluble al agua, $\rho_s(R)$ se tiene:

$$\rho_v(R) = \rho_{v,i} [T(R) \left(1 + \frac{a}{R} - \frac{b}{R^3} \right)] \quad (18)$$

Donde el término $\frac{a}{R}$ representa el efecto de la curvatura de la gota sobre la presión de vapor de equilibrio alrededor de la gota. El factor a se obtiene por:

$$a = \frac{2\sigma_{vi}}{\rho_L R_v T} \quad (19)$$

Donde el término σ_{vi} es la tensión superficial de la interfase líquido-vapor y ρ_L es la densidad del agua líquida. El término $\frac{b}{R^3}$ representa el efecto de la sal disuelta en la gota a la presión de vapor en el equilibrio de la gota interior.

El factor b se obtiene por:

$$b = \frac{3i_{NH} m_s M_w}{4\pi \rho_L M_s} \quad (20)$$

Donde i_{NH} es el factor de Van Hoff, m_s y μ_s son la masa y peso molecular de la sal disuelta, respectivamente y M_s es el peso molecular del agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Reemplazando la ecuación 11 con la ecuación 18, obtenemos:

$$m_{df} = \frac{4\pi R}{F_K + F_D} \left(s - \frac{a}{R} + \frac{b}{R^3} \right) \quad (21)$$

La cual se aplica cuando el aire es saturado.

Cuando el aire es insaturado, las ecuaciones 8, 9 y 18 pueden ser resueltas numéricamente para obtener m_{df} , la velocidad de evaporación de la gota.

Cuando las gotas están cayendo, por el aire alrededor de éstas, la difusión del vapor y el calor se alteran. Para considerar este proceso, el lado derecho de las ecuaciones 8 y 9 puede ser

multiplicado por un factor de "ventilación", V_p . En este caso de las ecuaciones 14 y 21 el índice de crecimiento/evaporación bajo situaciones de saturación, se obtiene:

$$m_{df} = \frac{4\pi R V_p S}{F_K + F_D} \quad (22)$$

y

$$m_{df} = \frac{4\pi R V_p}{F_K + F_D} \left(s - \frac{a}{R} + \frac{b}{R^2} \right) \quad (23)$$

3.4 VELOCIDAD DE CAÍDA DE GOTAS

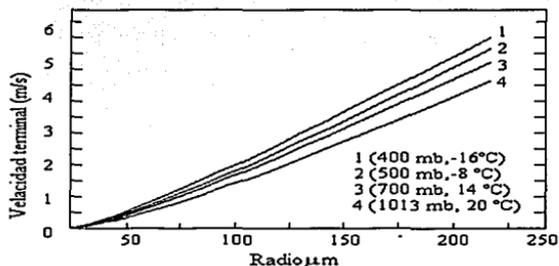
A medida que se incrementa el tamaño de las gotas de nube, estas están sujetas a la fuerza hacia abajo de la gravedad. La fuerza de gravedad sobre una gota es, sin embargo, generalmente compensada por la resistencia de fricción del aire, cuando una partícula es acelerada hacia abajo por la gravedad, su movimiento es gradualmente retardado por el aumento de la fuerza de fricción, esta velocidad final es llamada *Velocidad de Caída Terminal* V . Para las gotas de agua en el aire, V es una función del radio de la gota, R ; generalmente V es despreciable para gotas que tienen un radio de alrededor de 0.1 mm. Esto se considera así usualmente por ser el umbral del tamaño de separación de las gotas de nube, las cuales están suspendidas en el aire de forma indefinida, para la caída o precipitación de las gotas.

Las gotas más pequeñas que precipitan (tomadas por convención, aquellas que tienen un radio entre 0.1-0.25 mm) se llaman llovizna.

Las gotas > 0.25 mm de radio son llamadas lluvia. Las gotas de llovizna y lluvia tienen una velocidad terminal que aumenta a medida que el radio de la gota aumenta. Podemos representar esta función como $V(R)$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

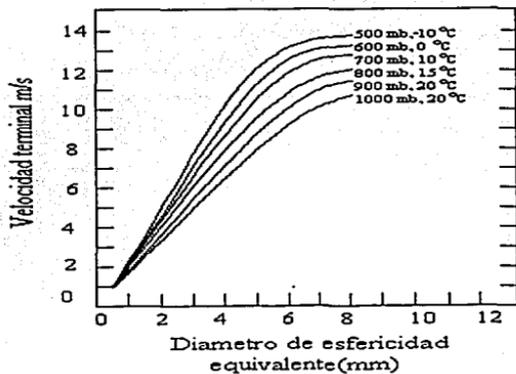
Para gotas de radio $< \mu m$, V se incrementa de manera aproximadamente lineal con el incremento del radio (esquema 7).



Esquema 7. Velocidad terminal de gotas de agua $< 250 \mu m$ de radio para varias condiciones de la atmósfera.

Para gotas de mayor tamaño $V(R)$, se incrementa a una velocidad mas baja (esquema 8), llegando a una constante para un radio de alrededor de 3 mm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Esquema 8. Velocidad terminal de gotas de agua > 500 μm de radio.

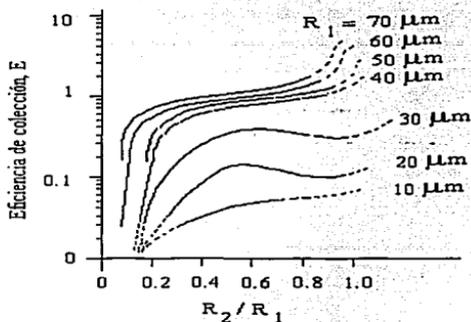
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.5 FUSIÓN DE GOTAS.

Las gotas de nube, aumentan su tamaño por *fusión* con otras gotas que puede imaginarse en términos de una gota de masa m cayendo a través de las partículas de una nube de masa m' . El agua contenida en las partículas de masa m' se considera que está distribuida uniformemente a través de la nube con un contenido de agua líquida ρq_m (gm^{-3}), donde q_m , es la razón de mezcla del agua (masa de agua de nube por masa de aire), como están cayendo, las partículas de masa m , se considera que incrementa la masa de manera continua a una velocidad dada por la ecuación del continuo de colección:

$$m_{\text{col}} = A_m |V(m) - V(m')| \rho q_m \sum_c (m, m') \quad (24)$$

Donde V representa la velocidad de caída de las gotas de masa m y m' (esquemas 7 y 8), ρ es la densidad del aire, $\sum_c (m, m')$ es la eficiencia de colección y A_m es el área efectiva de sección transversal "barrida" por una partícula de masa m .



Esquema 9. Eficiencia de colisión para colección de gotas de radio R_1 con gotas de radio R_2 .

La notación del valor absoluto se usa en la ecuación 24, a partir de que éste es solamente el movimiento relativo de las partículas, con la importancia para el crecimiento por coacción. Para el caso de gotas grandes que colectan pequeñas gotas, el símbolo del valor absoluto es redundante ya que la velocidad de caída de la gota más grande siempre excede el de la gota pequeña, sin embargo, la ecuación 24, puede también ser usado para calcular el aumento de la masa de una gota pequeña fusionándose con una gota más grande. Si no se emplea el valor absoluto para este caso, se tendría un cálculo de crecimiento con signo negativo.

Para el propósito del cálculo del incremento por coacción, las gotas de agua son usualmente consideradas que son esferas, y en este caso, el factor A_m en la ecuación 24, se obtiene por:

$$A_m = \pi(R + R')^2 \quad (25)$$

Donde R y R' son los radios de las gotas de masa m y m' respectivamente. Esta área esta basada en la suma de los radios a partir de que cualquier gota centrada dentro de una distancia $R + R'$ del centro de la gota de radio R puede ser interceptada por aquella gota.

La eficiencia de coacción $\sum_e(m, m')$ es la eficiencia con la cual una gota intercepta y se une con la gota alcanzada. Siendo el producto de una eficiencia de coacción y una eficiencia de fusión. La eficiencia de coacción (esquema 9) está determinada principalmente por el flujo de aire relativo alrededor de la gota que va cayendo, las pequeñas partículas pueden ser llevadas fuera del camino de las partículas mayores, (eficiencia < 1), o las pequeñas partículas no están en el camino directo de las partículas más grandes, pudiendo chocar con las partículas más grandes si ellas son arrastradas dentro de la estela (eficiencia > 1). La eficiencia de unión o fusión expresa el factor que tiene una colisión entre dos gotas que no se garantice que se unan. Bajo algunas condiciones, la eficiencia de unión es alta, especialmente si las gotas están cargadas eléctricamente o si un cuerpo eléctrico esta presente. Las condiciones eléctricas se

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

encuentran a menudo en las nubes y muy poco se conoce de otras condiciones, como las condiciones de la fusión.

En la mayoría de los estudios se considera por estos motivos a la eficiencia de fusión como la unidad.

Una versión más general de la ecuación 24, puede expresarse para el caso en el cual una partícula de masa m , está cayendo con relación a una población de partículas de varios tamaños. Para este caso, la ecuación generalizada del continuo de colección es:

$$m_{,col} = \int_0^{\infty} A_m |V(m) - V(m')| n' N(m') \sum_c (m, m') dm' \quad (26)$$

Donde $N(m') dm'$ es el número de partículas por unidad de volumen de aire en un rango de tamaños de m' a $m' + dm'$.

3.6 COLECCIÓN ALEATORIA DE GOTAS.

El crecimiento de las gotas de nube por fusión no es un proceso continuo, como se considera en (2.24), pero el índice o velocidad del proceso es una manera probabilística discreta atinada. En un intervalo Δt , las gotas de un tamaño inicial no crecen de manera uniforme ya que algunas pueden experimentar un mayor número de colisiones que el promedio y crecer más rápidamente que otras; en consecuencia, se desarrolla una distribución de tamaños de gotas.

La probabilidad natural de colección puede determinarse por medio de la consideración de la distribución de tamaños $N(m, t)$, donde $N(m, t) dm$ es el número de partículas por unidad de volumen de aire en un rango de m a $m + dm$ en un tiempo t . El cambio en $N(m, t)$ con respecto al tiempo se calcula como la velocidad en la que el espacio en el que una partícula de masa m' es arrastrada hacia fuera por otra partícula de masa m , definida por:

$$K(m, m') = A_m |V(m) - V(m')| \sum_c (m, m') \quad (27)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La probabilidad de que una gota en particular de masa m sea colectada por otra gota de masa m' en un intervalo de tiempo Δt esta dada por:

$$P = N(m', t) dm' K \Delta t \quad (28)$$

Donde se considera que Δt es lo suficientemente pequeño para que la probabilidad de más de una colección en este tiempo sea insignificante. Haciendo uso de las ecuaciones 27 y 28, se observa que el número medio de gotas de masa m que pueden colectar gotas de masa m' en un tiempo Δt es:

$$PN(m, t) dm = K(m, m') N(m', t) N(m, t) dm dm' \Delta t \quad (29)$$

Reagrupando esta expresión se obtiene:

$$\frac{PN(m, t)}{\Delta t} = K(m, m') N(m', t) N(m, t) dm' \quad (30)$$

que expresa la velocidad en la cual el número de gotas de masa m son reducidas como resultado de la fusión con gotas de masa m' por unidad de volumen de aire. La velocidad de reducción de la concentración numérica de gotas de masa m como resultado de su fusión con gotas de todos los otros tamaños está dada por la integral:

$$I_1(m) = \int_0^{\infty} K(m, m') N(m', t) N(m, t) dm' \quad (31)$$

Por un razonamiento similar, se puede expresar la velocidad de generación de gotas de masa m por la unión de pequeñas gotas como:

$$I_2(m) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} K(m, m') N(m', t) N(m, t) dm \quad (32)$$

donde el factor $\frac{1}{2}$ se incluye con el fin de evitar un conteo doble de las colisiones ocurridas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 4

QUÍMICA DEL AGUA DE NUBE Y NEBLINA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1 INTRODUCCIÓN

La atmósfera es una capa de gases que rodea a la Tierra y la separa de cierta manera del resto del espacio. Está compuesta principalmente por cuatro gases: nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y anhídrido carbónico. El nitrógeno y el oxígeno son gases transparentes que permiten que los rayos del Sol lleguen a la superficie de la tierra. El vapor de agua también es transparente hasta que se convierte en nubes que sirven como una especie de toldo durante el día, y por la noche retienen el calor del Sol.

La atmósfera tiene una estructura bien determinada, clara y organizada, en la que se distinguen:

- I. La *tropósfera*, que tiene 12 kilómetros de altura y es donde se lleva a cabo los fenómenos meteorológicos. Esta capa le da la apariencia de centelleos a las estrellas. A pesar de que es delgada, contiene el 80% del aire.
- II. La *estratósfera* va del kilómetro 12 al 45. En ella el aire es cada vez más escaso, de modo que estando a 30 kilómetros de altura estamos sobre el 99% del aire. La principal importancia de esta región es que en ella se encuentra la capa superior de *ozono*, a 20 kilómetros de la superficie terrestre. Esta capa funciona como filtro para evitar que lleguen hasta nosotros los rayos ultravioleta provenientes del Sol, y que estos nos dañen.

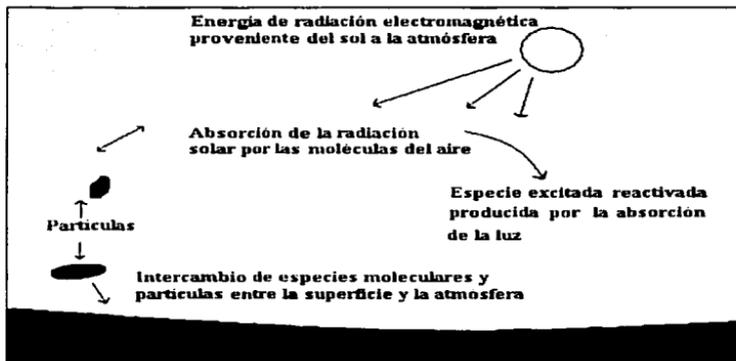
La atmósfera funciona como un sistema autosuficiente, capaz de adaptarse a cualquier cambio, y hasta ahora ha funcionado bien. Sin embargo, su capacidad de carga es limitada y rápidamente ha llegado a un punto en el que se dañará de forma irreversible. Entre las cosas que la afectan se encuentran los gases de invernadero, los óxidos de nitrógeno y azufre que le provocan deterioro, calentamiento global, acidificación y la consecuente lluvia ácida.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

También en la atmósfera se encuentran los clorofluorocarbonos que han provocado perforaciones, específicamente en la capa de ozono de la antártida.

4.2 PRINCIPALES REACCIONES FOTOQUÍMICAS EN LA ATMÓSFERA

La mayoría de los procesos químicos de la atmósfera se representan en el esquema 10. El estudio de estas reacciones químicas en la atmósfera resulta difícil ya que los compuestos químicos presentes se encuentran generalmente en una muy baja concentración y por tanto su detección y análisis resulta complicado; además de las condiciones extremas a gran altitud en los laboratorios de muestreo y a las múltiples interferencias posibles.



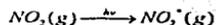
Esquema 10. Representación de la mayoría de los procesos químicos de la atmósfera.

Las moléculas de la atmósfera se mueven continuamente y chocan unas contra otras, como describe la teoría cinético-molecular. A temperaturas ordinarias, casi ninguna de las colisiones logra producir una reacción química. Sin embargo, la atmósfera está bañada por un flujo constante de fotones de luz durante el día, y la absorción de la energía de la luz por estas moléculas en la

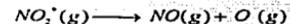
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

atmósfera puede causar reacciones, llamadas *reacciones fotoquímicas*, que de otra manera no ocurrirían a las temperaturas atmosféricas normales. Estas reacciones fotoquímicas desempeñan un papel importante en la determinación de la composición de la atmósfera misma y en la suerte que corren muchas especies químicas que contribuyen a la contaminación del aire.

4.2.1 El dióxido de nitrógeno (NO₂). Es una de las especies más activas fotoquímicamente en la atmósfera. Cuando una molécula de NO₂ absorbe un fotón de luz, *hν*, la molécula se eleva a un nivel de energía más alto; se convierte en una molécula electrónicamente excitada, lo cual se denota un asterisco (*).



Esta molécula excitada podría reemitir un fotón de luz, o podría disgregarse para formar otras dos especies; una molécula de monóxido de nitrógeno (NO) y un átomo de oxígeno (O).

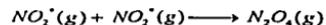


La molécula de NO₂, la de NO y el átomo de oxígeno son ejemplos de especies muy reactivas, llamadas radicales libres, que contienen electrones no apareados.

Algunos radicales libres, como el átomo de oxígeno, son tan reactivos que reaccionan con otras especies casi de inmediato. Otros como la molécula de NO₂, no son tan reactivos y pueden existir por largo tiempo. Casi todos los radicales libres son muy reactivos y de corta vida.

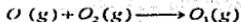
Un radical libre suele reaccionar de una de las siguientes formas:

1. Se combina con otro radical. Cada uno de los radicales contribuye con un electrón a la formación de un enlace, como cuando dos moléculas de NO₂ se combinan para formar N₂O₄ (peróxido de dinitrógeno).

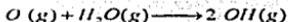


TESIS CON
FALLA DE ORICEN

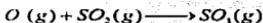
2. Reacciona con una molécula para formar uno o mas radicales nuevos, o una molécula nueva. La *primera* es la formación de ozono, O_3 , a partir de O_2 y O .



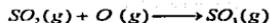
La *segunda* es la formación de dos radicales hidroxilo (HO) por la reacción con H_2O .



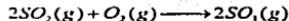
y la *tercera* es la formación de una nueva molécula al reaccionar el SO_2 para formar SO_3 , un precursor de la lluvia ácida.



4.2.2 El dióxido de azufre (SO_2). Casi todo el SO_2 de la atmósfera reacciona para formar trióxido de azufre (SO_3). Pueden ocurrir varias reacciones. El SO_2 podría reaccionar con el oxígeno atómico.



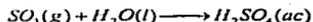
o con el oxígeno molecular.



o bien podría reaccionar con radicales hidroxilo.

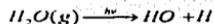


El SO_3 tiene gran afinidad por el agua y se disuelve en gotitas de aerosoles acuosos para formar ácido sulfúrico.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

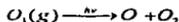
4.2.3 Radicales hidroxilo (OH) e hidroperoxilo (HOO). El radical hidroxilo es la especie individual más importante, este radical se forma de varias maneras. Una es por la fotólisis a gran altitud del agua.



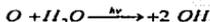
En presencia de materia orgánica, se produce el radical hidroxilo en cantidades abundantes como un intermediario del esmog fotoquímico.



En la tropósfera, el radical hidroxilo se produce como resultado de la fotólisis del ozono.



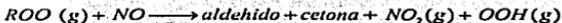
seguido por la reacción del átomo excitado con una molécula de agua.



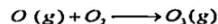
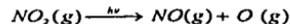
El radical hidroxilo que se produce indirectamente del ozono, ayuda a oxidar los hidrocarburos de la atmósfera.



donde el oxígeno atmosférico es el agente oxidante. *ROO* representa radicales peroxi orgánicos con diversos grupos R. Estos radicales también son agentes oxidantes que oxidan NO a NO₂ y producen diversos aldehídos (RCHO) y cetonas (R₂CO) y el radical hidroperoxilo *HOO*.

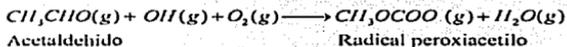


El radical NO₂ puede sufrir entonces la fotodisociación, seguida rápidamente de la producción de ozono.

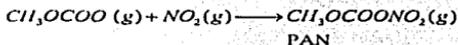


TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Los radicales hidroxilo también intervienen en la oxidación de aldehídos para dar compuestos que pueden reaccionar con el NO_2 . El acetaldehído (CH_3CHO), por ejemplo, reacciona con el radical hidroxilo y el oxígeno.

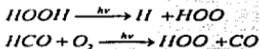


El radical peroxiacetilo puede reaccionar después con NO_2 para producir peroxiacetilnitrato (PAN).



El PAN y compuestos afines son potentes irritantes de los ojos, lo que explica en parte las molestias que se sienten durante etapas de esmog fotoquímico.

El radical hidroperoxilo es un intermediario de varias reacciones atmosféricas importantes; el radical se forma por alguna de las siguientes dos reacciones:



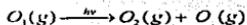
El radical hidroperoxilo reacciona más lentamente que otras especies como el hidroxilo lo que hace complicado su estudio.

4.2.4 El ozono (O_3). Puede ser benéfico o dañino, dependiendo de donde esté; en la tropósfera el ozono es dañino por ser un componente del esmog fotoquímico, siendo perjudicial para la salud. En la estratósfera el ozono resulta benéfico ya que protege de los rayos ultravioleta (UV).

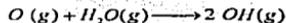
La única reacción química productora de ozono importante en la atmósfera es la combinación de oxígeno molecular y oxígeno atómico. En la parte baja de la atmósfera la principal fuente de átomos de oxígeno es la fotodisociación del NO_2 . A grandes altitudes, los átomos de oxígeno se producen por la fotodisociación de moléculas de oxígeno causada por fotones de luz ultravioleta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

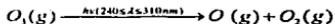
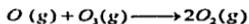
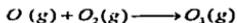
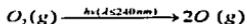
El ozono se fotodisocia para dar un átomo de oxígeno y una molécula de oxígeno cuando fotones del ultravioleta cercano (200-300 nm) inciden sobre él, a cualquier altitud.



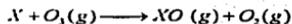
En la estratósfera los átomos de oxígeno pueden reaccionar con el agua para producir radicales hidroxilo.



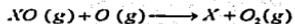
La química de las especies O_3 en la atmósfera superior fue estudiada cuantitativamente ya en la década de los 30's por Chapman (1935), quien estableció las siguientes reacciones nombradas en su honor "Ciclo de Chapman":



Además de estos procesos, existen otros procesos estratosféricos de destrucción del ozono, existen en la estratósfera diversas especies atómicas y moleculares, X en general, que reaccionan de forma eficiente con el ozono en procesos de absorción de oxígeno.

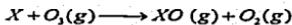


En las regiones estratosféricas en que la concentración de oxígeno atómico es apreciable, la molécula XO reacciona con el oxígeno.

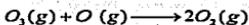


regenerándose X, Es decir, X actúa como un catalizador o como un promotor de una reacción en cadena, ya que la nueva formación de X da lugar a la iniciación del ciclo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La suma neta del ciclo es:



Un factor que aminora la destrucción catalítica del ozono es el requerimiento elevado de oxígeno atómico en el proceso. La destrucción del ozono mediante estos procesos ocurre en las zonas media y alta de la estratósfera donde las concentraciones de ozono no son elevadas. Asimismo, cualquier disminución en la concentración de ozono en esas latitudes dejará pasar más radiación UV hacia las zonas más bajas, produciéndose más ozono en estas. Es decir, hay un efecto de autocorrección de las cantidades totales de ozono.

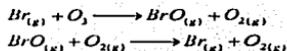
Los átomos de cloro y de bromo son eficientes catalizadores X de destrucción de ozono. El cloro siempre ha estado presente en la estratósfera como resultado de la lenta difusión del clorometano producido por la superficie terrestre en forma natural en la interacción de iones cloruro con material vegetal en putrefacción. Aunque gran parte del clorometano se destruye en la tropósfera, una cantidad alcanza la estratósfera en la que mediante fotólisis o por reacción con radicales hidroxilo, liberan cloro atómico.



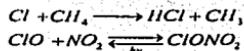
Análogamente al clorometano, también se produce en forma natural bromometano y de igual manera alcanza la estratósfera en la que mediante procesos análogos a los anteriores, se produce bromo atómico, ambos, el cloro y el bromo destruyen el ozono, tal como se indica en las siguientes reacciones:



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



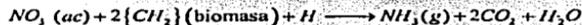
Un único átomo de cloro puede destruir varias decenas de miles de moléculas de ozono. El ciclo finaliza cuando los portadores Cl o ClO intervienen en otros procesos, por ejemplo:



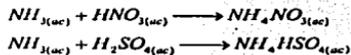
La primera reacción es bastante rápida y es una forma de eliminación del cloro de la estratosfera, ya que parte del ácido se disuelve en las gotas de agua y llegando hasta la superficie terrestre con la lluvia.

4.2.5 Amonio y nitrato. Los conocimientos que se tienen del ciclo de los componentes del nitrógeno en la atmósfera son muy incompletos. La estimación de la velocidad global de sedimentación del nitrógeno-amoniaco (NH_3-N), nitrato-nitrógeno (NO_3-N) es poco confiable ya que no existen estudios actuales sobre este campo.

La especie básica más importante en la atmósfera es el amoniaco en fase gaseosa (NH_3). La mayor fuente de amoniaco atmosférico es por la biodegradación del nitrógeno contenido en la materia biológica y por la reducción del nitrato a causa de las bacterias.

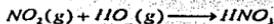
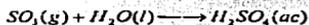


El amoniaco es particularmente importante en la atmósfera ya que es la única base soluble en agua presente en un nivel importante; disuelto en las gotas de agua en la atmósfera juega un papel importante al neutralizar los ácidos en la atmósfera.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2.6 La lluvia ácida. La lluvia ácida es una consecuencia directa de la autopurificación de la atmósfera; por procesos de coalescencia, el agua de la nube arrastra impurezas atmosféricas, dentro de las cuales se encuentran sustancias que causan acidez. No todos los gases son removidos por la precipitación pluvial, pero el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno pueden convertirse en formas químicas de fácil incorporación a las gotas de lluvia, como el ácido sulfúrico y el ácido nítrico.



La radiación solar proporciona la energía a los procesos que convierten a los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre en los correspondientes ácidos, procesos en los que también desempeña un papel principal la cantidad de oxígeno y el agua disponible.

Las reacciones de formación de los ácidos se inicia cuando un fotón entra en colisión con una molécula de ozono (O_3), la cual puede tener su origen en vertimientos atmosféricos o haber sido formada en la tropósfera por la acción de los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos contaminantes. El resultado de la colisión de una molécula de oxígeno (O_2) y un átomo altamente reactivo de oxígeno (O), el cual se combina con una molécula de agua (H_2O) para formar radicales hidroxilos (OH), ésta especie transforma el dióxido de nitrógeno (NO_2) en ácido nítrico (HNO_3), que puede ser incorporado dentro de la nube o ser removidos por el lavado atmosférico e iniciar la reacción que transforma el dióxido de azufre (SO_2) en ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La concentración de los radicales hidroxilos en la atmósfera es de menos de una parte por trillón, pero es prácticamente inagotable, ya que varios procesos de oxidación los regeneran; por ejemplo, el radical hidróperóxido (HOO), uno de los subproductos de la reacción inicial del dióxido de azufre, reacciona con el óxido nitroso (NO), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y genera un nuevo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

radical hidroxilo (OH), el cual a su vez puede oxidar miles de moléculas de azufre, y solo la cantidad de contaminantes en el aire determina cuanto ácido es producido.

La concentración de ácidos en la precipitación sin elemento se define por el valor del potencial hidrógeno (pH) en condiciones no amortiguadas (efecto *buffer*). Desde el punto de vista químico, la cantidad de precipitación ácida puede calcularse a partir del pH de la muestra y de un pH de 5.6, que es el valor del pH para el agua destilada a 20° C en equilibrio con 300 partes por millón por volumen (ppmv) de dióxido de carbono atmosférico, que es el equivalente de una lluvia neutra.

La acidificación es un fenómeno dinámico, y su extensión puede expresarse como el cambio de acidez de un estado a otro. Para medirla en términos cuantitativos que tenga un significado químico con respecto a los sistemas afectados, es necesario introducir un estado de referencia. Por ejemplo, si tenemos como referencia analítica un pH igual a 5.6, que corresponde, como se estableció, al agua destilada, ésta tendrá una acidez de + 43 microequivalente por litro (μeq^{-1}). Si aparte se tiene una muestra de lluvia con un pH de 3.8, entonces ésta tendrá una acidez de + 158.5 μeq^{-1} ; es decir, una lluvia ácida. Esto significa que a medida que se obtienen valores decrecientes del pH, aumenta la concentración en microequivalentes por litro del ion hidrógeno, que es el responsable de la acidez.

4.3 CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA

Un contaminante del aire es una sustancia que degrada la calidad del aire. La naturaleza contamina el aire a gran escala con cenizas volcánicas, vapores de mercurio, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno y sulfuro de hidrógeno de los volcanes; y con compuestos orgánicos reactivos de plantas coníferas como los pinos. La vegetación en descomposición inyecta gas metano en la atmósfera, y los cadáveres de los animales putrefactos y otros materiales proteínicos agregan monóxido de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

dinitrógeno. Sin embargo, los automóviles, plantas termoeléctricas, fundiciones y otros procesos metalúrgicos, y la refinación del petróleo, también añaden cantidades importantes de sustancias indeseables a la atmósfera, sobre todo en las áreas muy pobladas. Millones de toneladas de hollín, polvo, partículas de humo y sustancias que normalmente no se encuentran en la atmósfera son vertidas directamente sobre ella cada año. Los contaminantes que entran directamente en el entorno se denominan contaminantes primarios.

Las partículas contaminantes tienen tamaños que van desde las partículas de ceniza volátil, que se ven a simple vista, hasta moléculas, iones o átomos individuales. Muchos contaminantes son atraídos por las gotitas de agua y forman aerosoles: coloides que consisten en gotitas líquidas o sólidas finamente divididas dispersas en un gas. Las partículas sólidas más grandes en la atmósfera se denominan simplemente partículas. Los sólidos en un aerosol o en las partículas pueden ser óxidos de metales, partículas de suelo, sal marina, cenizas, carbono elemental y hasta pequeñas partículas de metal.

La mezcla tóxica de humo, niebla, aire y otras sustancias se conoce como esmog, término acuñado por el doctor Harold de Voceux (1911) en Londres durante la crisis de contaminación atmosférica sufrida en Inglaterra.

Dentro de los compuestos que más dañan la atmósfera están los hidrocarburos, tales como el petróleo y el gas natural, la combinación de residuos que derivan de su quema, junto con otros contaminantes y la luz del Sol, forman el ozono¹

La composición química de la atmósfera varía considerablemente entre una región y otra, las condiciones geográficas así como la actividad humana en cada región influyen notablemente dando como resultado una gama de acumulación de componentes diversos

¹ El ozono en esta forma es un contaminante altamente dañino.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4 CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) viven alrededor de 20 millones de personas, en ella circulan diariamente más de tres millones de automóviles y operan alrededor de 30,000 empresas industriales, que representan casi el 25% de las industrias de todo el país. Existen también más de 12,000 establecimientos de servicios, todo esto aunado, al resultado de las actividades domésticas, al polvo y las partículas nocivas genera una masa de contaminantes de 4,942,800 toneladas al año.

Del total de la concentración de contaminantes en ZMCM, el 68% corresponde al monóxido de carbono; el 13% a hidrocarburos; el 10% a partículas suspendidas totales; el 4% a óxidos de nitrógeno y el 5% restante son de otros contaminantes diversos, como los óxidos de azufre.

Los principales contaminantes que alteran la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son: el ozono, las partículas suspendidas totales, las partículas suspendidas con un diámetro menor a las 10 micras, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, el polvo y el bióxido de azufre.

Dependiendo del tipo de actividades que se realicen, la emisión de contaminantes varía considerablemente de un lugar a otro. El norte de la ciudad se considera como una de las principales fuentes de contaminación, ya que ahí es donde se localiza la mayor parte de los complejos industriales.

4.4.1 Contaminación por ozono. El ozono es un contaminante poderoso, forma parte de la atmósfera, ahí ayuda a filtrar los rayos ultravioleta provenientes del sol. Es una protección que evita que el 90% de la radiación ultravioleta atraviese la atmósfera y cause algún tipo de daño en las cosechas o en las células de los organismos vivos, ya que puede provocar cáncer de piel. Por

otro lado, el ozono en el nivel del suelo, es un contaminante que no se emite directamente de los escapes o chimeneas, más bien se forma en el aire a partir de la reacción química de los óxidos de nitrógeno y azufre que resulta de la quema de los hidrocarburos. Cuando se quema combustible se producen contaminantes que, al ser vertidos a la atmósfera, reaccionan con la luz del Sol y forman ozono, generalmente en los días tibios y soleados, con temperatura que asciende entre los 24° y 32° C. Es importante señalar que en los últimos años, los niveles de ozono han aumentado considerablemente.

4.4.2 Contaminación por partículas suspendidas. Las *partículas suspendidas totales* se producen generalmente por las industrias, los vehículos o por la erosión del suelo. Su origen y composición es muy diverso, ya que pueden resultar de procesos de combustión, de la transformación de otros contaminantes o de mecanismos naturales, ya sea que provengan de los suelos o que tengan un origen biológico como materias fecales, polen, bacterias, esporas o quistes. Dentro de las partículas sólidas, las de mayor impacto sobre la salud son aquellas cuyo diámetro es menor a 10 micras, son muy peligrosas pues, al ser tan pequeñas, una vez que son respiradas ya no salen del organismo y se van acumulando en el cuerpo poco a poco, y a la larga pueden dañar el tejido pulmonar; el total de partículas emitidas al aire diariamente es del 60%.

4.4.3 Contaminación por monóxido de carbono. El *monóxido de carbono* (CO) se forma debido a la combustión incompleta en los motores de los vehículos que utilizan gasolina. Las emisiones de monóxido de carbono dependen directamente de la afinación de los motores y de la eficacia de la combustión de los procesos industriales, de las condiciones y características del sistema vial, del tránsito y los diferentes medios de transporte que se utiliza en la ZMCM. Las emisiones de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

monóxido de carbono es el contaminante que encontramos en mayor cantidad y es muy difícil de eliminar, ya que es incoloro y carece de olor.

4.4.4 Contaminación por óxidos de nitrógeno. Los *óxidos de nitrógeno (NO y NO₂)* son contaminantes que por sí mismos no representan un problema para la salud, pero una vez que reaccionan con la luz solar, producen compuestos tóxicos, especialmente si están presentes los hidrocarburos. Dentro de estos compuestos tóxicos encontramos las acetonas, los aldehídos, los radicales de alquilo y los nitratos de peroxiacetilo, que provocan lagrimeo e irritación de garganta. Los óxidos de nitrógeno provocan que se forme el ozono. Al estar en la atmósfera se oxidan, forman ácidos y nitratos que disminuyen la visibilidad del aire.

4.4.5 Contaminación por dióxido de azufre. El *dióxido de azufre* se genera principalmente por la quema de combustibles que contienen azufre y por la producción de energía en las plantas termoeléctricas, además de los vehículos automotores. La nocividad de este gas radica en que se transforma en ácido sulfúrico en el aire y contribuye a formar la lluvia ácida. Otro factor perjudicial de este óxido es el hecho de que el dióxido de azufre es un precursor del ozono. Las concentraciones de este dióxido se presentan en las áreas de mayor actividad industrial y tránsito vehicular.

4.5 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD

Las partículas, solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro muy grave para la salud. Los contaminantes entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias. Los daños a los órganos respiratorios pueden presentarse directamente, ya que se ha

estimado que más del 50 por ciento de las partículas entre 0.01 y 0.2 μm que penetran a las cavidades pulmonares se depositaran allí.

Las partículas producen un efecto tóxico de una o más de las tres maneras siguientes:

1. Las partículas pueden ser intrínsecamente tóxicas debido a sus características inherentes químicas y/o físicas.
2. Las partículas pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. Las partículas pueden actuar como conductos de una sustancia tóxica absorbida.

El SO_2 produce un mayor deterioro de la salud que la exposición separada a cada contaminante.

Existen muchos estudios que demuestran que las altas concentraciones de monóxido de carbono pueden causar cambios fisiológicos y patológicos y, finalmente, la muerte. El monóxido de carbono es un veneno que inhalado priva a los tejidos del cuerpo del oxígeno necesario.

Desde hace mucho tiempo se sabe que el monóxido de carbono puede causar la muerte cuando se encuentra expuesto a una alta concentración (>750 ppm).

La exposición a concentraciones más altas ha mostrado evidencia de fatiga psicológica en los pacientes con afecciones del corazón. También se han presentado pruebas de que las concentraciones de CO en la cuenca atmosférica de Los Ángeles están asociadas con un exceso de mortalidad. Los promedios ambientales de 24 h para CO están dentro del rango de 10 a 15 ppm en dicha área.

4.5.1 Óxido de azufre

El dióxido de azufre y trióxido de azufre son los óxidos dominantes del azufre presentes en la atmósfera. El SO_2 es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una sensación gustatoria a concentraciones de 0.3 a 1.0 ppm en el aire. A concentraciones mayores de 3.0 ppm, el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

gas tiene un olor acre e irritante. El dióxido de azufre se convierte parcialmente a trióxido de azufre o ácido sulfúrico y a sus sales mediante procesos fotoquímicos o catalíticos en la atmósfera. El trióxido de azufre forma ácido sulfúrico con la humedad del aire. Los óxidos de azufre en combinación con las partículas y la humedad del aire producen los efectos más perjudiciales atribuidos a la contaminación atmosférica del aire. Por desgracia, ha resultado difícil aislar y establecer los efectos que produce solamente el dióxido de azufre. Se presentaran en las secciones siguientes breves comentarios de los efectos de los compuestos azufrados.

Las partículas en suspensión en la atmósfera reducen en el rango visual al dispersar y absorber la luz, de tal forma que los aerosoles del ácido sulfúrico y otros sulfatos que constituyen del 5 al 20 por ciento de las partículas en suspensión en el aire urbano contribuye significativamente a la reducción de la visibilidad. Las investigaciones indican que mucha de la neblina atmosférica se debe a la formación de varios aerosoles resultantes de las reacciones fotoquímicas entre el SO_2 , las partículas, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos presentes en la atmósfera.

En las mediciones de laboratorio, las mezclas de NO_2 y los hidrocarburos más comunes forman pocos o ninguno aerosoles cuando se les irradia. Sin embargo tiene lugar una considerable formación de aerosoles cuando las mezclas de olefinas, NO_2 y SO_2 son irradiadas por la luz solar. Uno de los principales productos de estas complejas reacciones fotoquímicas son las gotitas de niebla de ácido sulfúrico, que dispersan la luz.

Los compuestos de azufre son responsables de los daños más importantes ocasionados a los materiales por lo general, los óxidos de azufre aceleran la corrosión del metal al formar primero ácido sulfúrico ya sea en la atmósfera o sobre la superficie del metal, dependiendo de la clase de metal expuesto así como de la duración de la exposición, en atmósfera urbanas se han observado tasas de corrosión de 1.5 veces la tasa obtenida en ambientes rurales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los ácidos sulfurosos o sulfúricos son capaces de atacar una amplia variedad de materiales de construcción, incluyendo caliza, mármol, pizarras de techo y mortero, formando sulfatos bastante solubles, que luego lava la lluvia. Por otra parte los textiles de nylon especialmente las medias, son también susceptibles a los contaminantes en la atmósfera, aparentemente el debilitamiento lo causa el SO_2 o un aerosol del ácido sulfúricos.

Varias especies de animales, incluyendo el hombre, reaccionan con bronco constricción ante el SO_2 ; este efecto sobre los bronquios se puede evaluar en términos de un ligero aumento en la resistencia en el conducto de aire, y se presenta cuando se tienen de 5 ppm o una mayor cantidad en la atmósfera, algunos individuos sensibles muestran ligeros efectos a 1 o 2 ppm.

Este informe indica que el dióxido de azufre actúa como un gas ocre, sofocante e irritante y afecta la parte superior del tubo respiratorio durante una exposición moderada. Para concentraciones inferiores a unas 20 ppm, el SO_2 produce solamente efectos graves; hasta la fecha, se requieren concentraciones por encima de 1ppm de SO_2 antes de que se puedan esperar efectos graves o hasta significativos sobre la salud de individuos afectados o incluso no afectados.

Efectos del SO_2 a diversas concentraciones.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCENTRACION	EFFECTOS
0.03 ppm, promedio anual.	Normas para la calidad del aire de 1974, lesiones crónicas en plantas.
0.037-0.092 ppm, media anual.	Puede haber, acompañadas por partículas a una concentración de 185 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, un aumento en la frecuencia de síntomas respiratorios y enfermedades pulmonares.
0.11-0.19 ppm, media en 24 h.	Con un bajo nivel de partículas puede haber un aumento en la admisión de personas de edad mayor en los hospitales, debido a trastornos respiratorios. Aumento en la tasa de corrosión de los metales.
0.19 ppm, media en 24 h.	Puede haber un aumento en la mortalidad con bajos niveles de partículas.
0.25 ppm, media en 24 h.	Puede haber un aumento en la tasa diaria de mortalidad, acompañado por partículas
0.3 ppm, 8 h.	Algunos árboles muestran lesiones
0.52 ppm, promedio en 24 h.	Puede haber un aumento en la mortalidad, acompañado por la presencia de partículas; puede ocurrir aumento en tasa de mortalidad.

Tabla 2. Efectos del SO₂ a diversas concentraciones.

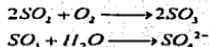
4.5.2 La lluvia ácida.

Las pequeñas gotas de agua formada por condensación en la atmósfera deben tener normalmente un pH cercano a 7. Sin embargo, la disolución del CO₂ atmosférico en el agua de lluvia tiende a bajar el pH debido a la formación de ácido carbónico, éste ácido es muy débil y se encuentra en equilibrio con el CO₂ debido esto último el pH del agua de lluvia tiene un valor cercano a 5.65.

Sin embargo se han registrados valores de pH 4.0 a 4.5 en la parte oriental de Estados Unidos, estos valores tan bajos se deben a la transformación del CO₂ y NO_x en ácidos, al ser absorbidos por el agua de las nubes y las gotas de lluvia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una reacción típica podría ser:



Estos aerosoles ácidos se depositan luego en cantidades significativas sobre la superficie del suelo y de las masas de agua este fenómeno recibe el nombre de lluvia ácida.

Hay varios efectos de la lluvia ácida que son inquietantes. Primero, existe una acidificación de las fuentes naturales de agua, esto puede tener un efecto devastador sobre la vida de los peces. La trucha y el salmón son especialmente sensibles a un pH bajo. La reproducción de muchos peces se impide ante un pH con un valor menor de 5.5, también se observa una disminución en el plancton y la fauna del fondo, lo que reduce el suministro de alimento de los peces. En segundo lugar, tiene lugar una lixiviación de los nutrientes del suelo esta desmineralización puede llegar a una pérdida de productividad de las cosechas y los bosques, o un cambio en la vegetación natural. La vegetación misma puede verse directamente dañada, y se observa un aumento en la corrosión de los materiales. La severidad del daño a las tierras y las extensiones de agua esta parcialmente determinada por los minerales en el terreno de una región determinada, aquellas áreas que contienen rocas como carbonato de calcio o minerales similares se ve protegidas por los mismos contra el ataque de la lluvia ácida. En dichas regiones, los lagos tienden a mantener el pH a más de 5 o 6.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.5.3 Efectos de los hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, oxidantes fotoquímicos, asbesto y metales sobre los materiales

Hidrocarburos.

Los *hidrocarburos* no parecen causar ningún daño apreciable por la corrosión en los materiales. Las partículas o el hollín procedente de los hidrocarburos no quemados, ensucian las superficies. De todos los hidrocarburos, sólo el etileno tiene efectos adversos sobre las plantas ante concentraciones ambientales conocidas, siendo su efecto principal inhibir el crecimiento de las plantas.

Hasta ahora, los estudios de los efectos de las concentraciones de hidrocarburos gaseosos sobre el aire ambiente, no han demostrado la existencia de efectos adversos directos en la salud del hombre. Estudios de las propiedades carcinogénicas de ciertas clases hidrocarburos indican que ciertas formas de cáncer parecen ser causadas por la exposición a hidrocarburos aromáticos que se encuentran en el hollín y los alquitranes. Los carcinógenos inidentificables arrastrados por el aire son su mayoría hidrocarburos aromáticos polinucleares. Los hidrocarburos no quemados, en combinación con los óxidos de nitrógeno y en presencia de la luz solar, forman oxidantes fotoquímicos, los que tienen efectos adversos en la salud del hombre y de las plantas.

Óxidos de nitrógeno.

De los seis o siete óxidos de nitrógeno, el óxido (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son importantes contaminantes del aire. A pesar de que el NO₂ está por lo general presente en la baja atmósfera (formado por acción biológica en la superficie del terreno) no se considera como contaminante del aire, tanto el NO como el NO₂ no causan daños directos a los materiales; sin embargo, el NO₂ puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico que causa considerable corrosión de las superficies metálicas. El dióxido de nitrógeno

absorbe la luz visible y a una concentración de 0.25 ppm causará apreciable reducción de la visibilidad. El dióxido de nitrógeno a una concentración de 9.5 ppm en un período de 10 a 12 días ha detenido el crecimiento de plantas tales como el frijol pinto y el tomate.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 5

**COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y
NEBLINA ALREDEDOR DEL MUNDO**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ESTADO DE

DE EL

ANTECEDENTES DE LOS COLECTORES EN EL MUNDO.

La obtención de agua a partir de la humedad del aire es una técnica sobre la que existen antecedentes remotos. Un buen ejemplo lo constituye el cultivo de la vid en la isla de Lanzarote, Canarias (Dinkins, 1969). Allí cada planta se instala en el fondo de un tazón cubierto con gravilla volcánica. En las tardes y noches por efecto del enfriamiento debido a radiación terrestre, la superficie alcanza la temperatura de rocío. La humedad condensa sobre la tierra y escurre a las raíces de la vid. También es sabido que, bajo condiciones climáticas especiales, cierto tipo de neblinas aportan agua a zonas donde las precipitaciones normales son muy bajas. Este tipo de fenómeno se observa en zonas desérticas frente a las costas de Namibia (África del sudoeste), Australia y el Pacífico frente a Chile y Perú. En el caso de Namibia, existen escarabajos que obtienen el agua para beber de las gotas de neblina que precipitan sobre su cuerpo (Hamilton et al, 1983).

En Chile existe un bosque (Parque Nacional Fray Jorge) con especies propias de zonas donde hay 1,000 a 2,000 milímetros de precipitación al año en una zona donde la precipitación anual está en torno a los 50 mm. Es el mismo bosque que atrapa el agua existente en las neblinas costeras que a menudo lo cubren, supliendo así sus necesidades de agua.

Pero es solo en épocas recientes que se ha abordado en forma sistemática el estudio del fenómeno que da origen a este tipo de neblinas y, más interesante aún, la forma de utilizarlas como una fuente alternativa de agua para consumo humano. Se trata, literalmente, de "ordeñar" las nubes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.1 EMPLEO DE COLECTORES EN CHILE.

En el norte de Chile, donde las "camanchacas" o neblinas costeras son un fenómeno cotidiano, los pequeños bosques que existen en las cumbres de Fray Jorge, Talinay y Santa Inés (esquema 11), han demostrado, en forma natural, que la captación del agua que forma estas neblinas es un proceso sorprendente por su magnitud y efecto².



Figura 1. Plano de ubicación de las instalaciones del Proyecto de Escapes Forestales.
Estación de Condensación
Bosque Condensador
Estación de Acumulación y Filtro
Camino de Anzoátegui a Chungungo

Esquema 11. Cumbres de Fray Jorge, Talinay y Santa Inés, Chile.

En este lugar se tienen árboles propios de zonas climáticas (ubicadas a 2,000 kilómetros al sur de estos sitios), que requieren más de 1,000 milímetros de lluvia al año para sobrevivir, los cuales han desarrollado y mantenido por más de 2,000.000 de años en una región donde la precipitación no supera los 115 milímetros al año.

El fenómeno climático, que permite la sobrevivencia de esos bosques, puede producir 10 o más veces el volumen de agua que aporta la lluvia en la misma área. Las precipitaciones, de esa

² Kummerov, J. 1962. Mediciones cuantitativas de la neblina en el Parque Nacional Fray Jorge. Boletín de la Universidad de Chile, 28, 36-37.

magnitud, son ocasionadas por la intercepción de la neblina en el follaje de la vegetación, principalmente arbórea (figura 7).



Figura 7. Las precipitaciones registradas en el interior de los bosques de neblina son ocasionadas por la intercepción de éste en el follaje de la vegetación, compuesta principalmente por árboles.

En la zona árida chilena, las mismas condiciones climáticas que limitan las precipitaciones a unas pocas decenas de milímetros al año, dan origen a la presencia, en las costas, de una capa permanente de nubes estratiformes cuya altitud varía entre 400 y 1,200 metros sobre el nivel del mar.

Estas nubes, formadas por gotas de agua cuyo diámetro varía entre 1 y 40 mm, se producen cuando las masas de aire húmedo, de origen marino, se encuentran con las frías corrientes litorales, las gotas, de un tamaño suficiente para ser transportadas por el viento, alcanzan las montañas costeras, originando, en algunos casos, periodos persistentes de neblina que permiten la existencia de fenómenos naturales como son los bosques anteriormente citados.

A partir de la observación y medición de este proceso natural, se ha podido comprobar que en aquellos lugares donde la capa de nubes es interceptada por los cerros costeros, cuando la topografía es adecuada, los obstáculos tales como árboles o arbustos, que por momentos se encuentran inmersos en la neblina, son capaces de coleccionar importantes cantidades de agua (figura 8).



Figura 8. Los obstáculos tales como árboles o arbustos, son capaces de coleccionar importantes cantidades de agua.

Estas "precipitaciones" y sus efectos en los ecosistemas áridos motivó a muchos investigadores a estudiar las variables que intervienen en la ocurrencia del fenómeno así como la factibilidad de establecer sistemas artificiales que permitan atrapar una parte de esta oferta de agua.

Hoy, gracias a esas investigaciones, se conoce el potencial que existe en la utilización del agua de las neblinas y su posibilidad de aplicación en aquellos lugares donde las demás fuentes convencionales no pueden satisfacer las demandas de las poblaciones humanas.

Sobre la base de estudios previos¹, realizados en Chile, acerca de las neblinas costeras y su utilización, en 1987, con el apoyo del Centro de Investigaciones para el Desarrollo del Canadá (C.I.I.D.), se inició un proyecto de investigación y aplicación cuyos principales objetivos fueron la investigación básica de las variables físicas y meteorológicas que determinan la ocurrencia del fenómeno y la investigación y diseño de ingeniería que consolidara un modelo de colector o atrapanieblas factible de construir en forma masiva a un costo razonable.

En forma previa al proyecto financiado por el C.I.I.D., en la cumbre del cerro El Tofo, se había realizado una investigación cuyo principal éxito fue el desarrollo y diseño de un tipo de elemento colector, o malla colectora, que destacaba por su facilidad de construcción y bajo costo².

En ese ámbito, los ensayos orientados hacia el estudio de la geometría de los colectores artificiales y de su productividad habían concluido con la obtención de un diseño y la elección de materiales que permitían construir una pantalla plana que dispuesta en forma perpendicular al viento predominante que conduce las neblinas.

Con tales antecedentes, durante la ejecución del proyecto CIID, se realizó la construcción masiva de 50 unidades colectoras de 48 m² cada una, en base a un diseño que optimizaba las características del prototipo que se había desarrollado. Junto con la construcción de los colectores se instaló una matriz de interconexión que encauzaba el agua producida por cada unidad a un estanque abierto de 24.000 litros de capacidad, el agua así producida, fue empleada

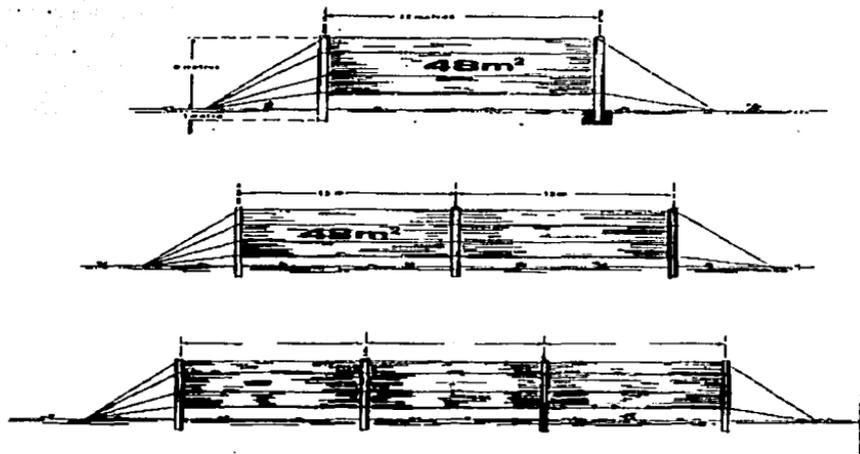
¹ CONAF, 1985. Evaluación de las neblinas costeras (camanchacas) en el sector El Tofo. Informe final de CONAF a SERPLAC IV Región, pp. 128

² Canto, W. y G. Soto, 1990. Abastecimiento de agua potable a la localidad de Chungungo mediante la captación de neblinas. XXII Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, San Juan, Puerto Rico

³ Masson, C.; Canto, W. y J. Cerda, 1992. Cosechando las nubes: Captación de agua de las neblinas XXIII Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, La Habana, Cuba. pp. 25

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

entre los años 1987 y 1991 en el riego de una parcela de ensayo forestal de 1,5 hectáreas y en el abastecimiento de una casa donde habitaron los obreros que ejecutaron el proyecto (esquema 12).



Esquema 12. Tipos de colectores empleados en El Tofo, en Chile.

De ese modo, durante 4 años se ensayó las estructuras y se controló la operación del sistema completo. Los objetivos propuestos inicialmente por el proyecto fueron completamente alcanzados, confirmando así la viabilidad técnica de éste. Los criterios básicos acerca de la selección del sitio donde se debían instalar los colectores, el conocimiento acabado de los procesos físicos que originan la neblina y la construcción de colectores cuya eficiencia y operación fue un hecho establecido y optimizable, permitieron demostrar la factibilidad de

aprovechar esta nueva fuente de agua aportando a la investigación y aprovechamiento del fenómeno, un modelo único en el mundo.

Sobre la base de los resultados anteriores y con el objetivo de mejorar el conocimiento y la aplicabilidad de la tecnología, en 1991, el C.I.I.D. en conjunto con la CONAF y la Universidad Católica inician una nueva etapa de proyecto cuyas principales metas son -en el ámbito de la ingeniería- el mejoramiento técnico-económico del sistema de captación y el diseño de un protocolo de operación, aplicación, manejo y administración de un suministro de agua potable soportado por la captación de agua de nube y neblina y la definición y estandarización de los criterios de selección de sitio.

De ese modo, Chungungo, un pueblito costero de 350 habitantes ubicado en el norte de la Región de Chile (esquema 12), se convirtió en la primera comunidad humana, a nivel mundial, en ser abastecida con agua potable captada de esa manera. Este modelo experimental que se ha ensayado por más de un año ha permitido conocer y mejorar el entendimiento de las variables que intervienen en la sustentabilidad de la operación de un sistema como éste (figura 9).



Figura 9. Chungungo 1925, cuando el esplendor de la minería hacía que ni la imaginación más febril pensara en el futuro que la historia les reservaba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados del proyecto y del desarrollo de la tecnología permiten dar a conocer a la comunidad mundial y convencer a las autoridades de agua potable de países, que al igual que Chile, tienen fenómenos atmosféricos similares, sobre la factibilidad de desarrollar y ensayar este tipo de solución para el problema de la escasez de agua que afecta a los habitantes de las zonas desérticas del planeta.

La "camanchaca" es un tipo de neblina costera muy densa que tiene características dinámicas. Se trata de neblina de condensación en altura que es desplazada hacia zonas costeras por el viento. Su origen se debe al anticiclón del Pacífico que da origen a una capa de nubes tipo *estratocúmulos* las que cubren en forma persistente una franja costera desde el Perú hasta las costas chilenas frente a Valparaíso. La parte superior de la capa de nubes está limitada por la inversión de los *vientos alisios* y su base corresponde al nivel de condensación de una capa límite atmosférica. La base de las nubes en "Antofagasta" (24° S) está a 700 metros y se encuentra unos 200 metros más baja en "La Serena" (30° S).

En la costa, frente a estas nubes existe un cordón montañoso que bloquea la penetración de las nubes hacia el continente. Esto hace que las zonas de montaña en contacto con las nubes permanezcan cubiertas por períodos largos. Se trata de nubes dinámicas, pues, la brisa marina las empuja constantemente hacia la costa.

Esta situación ha permitido que en varias partes de la costa chilena, en las laderas de los cordones montañosos junto al mar, existan manchas de vegetación que son características de lugares (en cuanto a cantidad y tipo de especies) con precipitaciones de 500 a 2,000 mm por año, esto en una zona donde los registros anuales promedio no superan los 50 mm de precipitación. Los lugares más conocidos son: Fray Jorge, Talinay (ambos parques nacionales) y El Tofo, lugar de una antigua explotación de mineral de hierro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aunque la presencia de "camanchacas" es frecuente en las costas norte de Chile y del sur del Perú, los lugares donde es explotable son más escasos, su comportamiento es controlado por la fisiografía de la costa, en particular la macrotopografía de la misma, ésta determina el trayecto que siguen las masas de aire que vienen cargadas de humedad desde el mar y a la vez proveen la "barrera" que intercepta la nube.

A nivel regional existen cuatro aspectos de importancia:

Primero debe haber un cordón montañoso con una altura media de 500 o más metros.

En segundo lugar, el eje de este cordón debe ser perpendicular a la dirección dominante de los vientos (suroeste).

En tercer lugar el cordón montañoso debe estar próximo a la costa. Esto minimiza las pérdidas de agua por evaporación antes de que las nubes alcancen las montañas.

Cuarto, hacia el continente del cordón montañoso debe haber un valle con fuerte radiación solar diurna, éste origina una aspiración de las nubes a través de los pasos del cordón montañoso.

Una vez ubicado un lugar promisorio de acuerdo a estas características generales, hay algunas consideraciones adicionales para maximizar la captura de agua. Los niveles de máxima colección están en la zona media alta de la capa de *Estratocumulos*, es decir entre los 600 y 900 metros sobre el nivel del mar en el caso chileno.

Estas condiciones dan origen a una neblina dinámica, que provoca un proceso permanente de formación y evaporación, es esta característica dinámica la que hace que estas neblinas mojen con mucha facilidad. Una ilustración del proceso de formación de la "camanchaca" se da en el esquema 13.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Esquema 13. Proceso de formación de la "camanchaca", se ha tomado como ejemplo la situación que se da en "El Tofo".

En la franja costera del desierto de Atacama la precipitación media anual no supera los 10 mm. Pero la "camanchaca" ha permitido la vida, a inicios del Siglo XX era posible subsistir en ciertas minas de la Cordillera de la Costa recolectando agua de "camanchaca" captada en forma automática en las techumbres de las construcciones

Desde los años 60 diversos investigadores han concebido el aprovechamiento del agua en las "camanchacas" para uno de los desiertos más áridos del mundo. Destacan, sobre todo, los trabajos hechos por la Universidad Católica del Norte, Chile. En 1961 obtuvo una patente de invención (N° 18.424) por un aparato destinado a "captar agua contenida en las nieblas o "camanchacas". El equipo era un cilindro de 0,7 m de diámetro en que estaban dispuestos 1,300 monofilamentos de perlón de 0,5 mm de diámetro y 2 metros de largo, al fondo de este sistema se encontraba un embudo metálico y un estanque de acumulación de agua.

El equipo descrito (de 1,4 m² de área frontal de captación) fue instalado en un lugar llamado "El Mirador" a 980 msnm, sobre los cerros de la Cordillera de la Costa y casi en la latitud del trópico de Capricornio, en ese lugar el promedio anual de precipitaciones es de 3 mm. El

sistema estuvo en operación y fue controlado en periodos quincenales entre el 14 de Diciembre de 1961 al 29 de Diciembre de 1963. En ese tiempo se realizaron 43 controles en forma no regular. El agua captada varió entre 1,5 L. al día a un máximo de más de 15 L/día, el promedio anual captado fue de 3,9 L al día, una imagen de este colector, se observa en la Figura 10 (Espinosa, 1977).



Figura 10. Colector en "El Mirador" donde se observa agua recolectada.

Otro lugar muy promisorio en ese mismo sector es "Morro Moreno", un promontorio de 1,200 m de altura en el cual, de acuerdo a imágenes satelitales, se tienen unos 300 días al año con cubierta nubosa. Este morro, en la parte sur de la península de Mejillones, presenta excelentes condiciones para la formación de "camanchaca". Allí, entre 1979 y 1984 el mismo equipo de la Universidad Católica del Norte instaló un colector de agua de nube y neblina de más de 10 metros de altura. Este tenía una estructura poliédrica de tubos y las caras se revistieron de mallas colectoras, la razón de la estructura poliédrica es que en Cerro Moreno la velocidad de desplazamiento de la "camanchaca" es de 6 a 8 m/s y un sistema simple no resiste bien el viento. En las Figuras 10 y 11 se observan dos imágenes de la instalación de este colector. Al tener una estructura tridimensional, se buscó mejorar la eficacia de captación de

agua, además de hacer una estructura autoresistente, el rendimiento de este colector fue superior al del Mirador.

Sin embargo el agua captada no fue aprovechada, vale la pena indicar que a los pies de "Morro Moreno" se encuentra el balneario de Juan López, el que no cuenta con agua potable. La que se necesita para el consumo humano es traída desde Antofagasta, a más de 30 km. de distancia.



Figura 11. Instalación de colector poliédrico en Morro Moreno (1979) a 900 metros sobre el nivel del mar.



Figura 12 Base de colector de "Morro Moreno". Se observan vértices de captación de agua.

También se realizaron experiencias en "Los Nidos", un cordón al sur de Antofagasta, Chile (Espinosa, 1986). Esos trabajos fueron hechos en coordinación con la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). Allí se implantó un pequeño vivero. Toda el agua para el riego de los árboles y para el consumo del lugar se obtenía de las "camanchacas". Después de un par de años, los árboles crecieron lo suficiente como para captar por sí mismo el agua que necesitaban para regarse. En la Figura 13 se observa un colector poliédrico de "Los Nidos" en proceso de funcionamiento.



Figura 13 Colector poliédrico en "Los Nidos". En la foto se ve el colector en operación (1990).

PROYECTO DE COLECTORES EN CHILE.

5.1.1 Proyecto El Tofo.

El trabajo más reciente y más conocido se ha desarrollado en los cerros cerca del mineral del Tofo a 30° de latitud Sur. Los principales investigadores de este proyecto fueron Pilar Cereceda (U. Católica de Chile), Humberto Fuenzalida (U. de Chile) y Robert S. Schemenauer (Canadá) [Schemenauer, 1988].

En el cordón del Tofo se dan las condiciones para la formación de "camanchaca". Además, a los pies de él, existe un pequeño poblado de pescadores, Chungungo, este tiene aproximadamente 440 habitantes permanentes, llegando a un máximo de algo más de 1,000 durante el verano. Cuando se cerró la faena minera en El Tofo, la caleta de Chungungo quedó sin abastecimiento de agua, debiendo sus habitantes recurrir a camiones aljibe que traían agua de más de 60 km. de distancia.

La CONAF implementó el proyecto de los colectores en el Tofo. Inicialmente se instalaron 62 colectores de 58 m² cada uno, un esquema de los mismos se tiene en la Figura 14. Posteriormente se agregaron 40 unidades adicionales de 90 m² de superficie. En este diseño se

volvió al sistema elemental de colectores, una estructura rectangular atiesada con vientos (cuerdas) que se pone perpendicular a la dirección de la "camanchaca", una malla simple para captar las gotas de agua y canaletas de PVC en la base donde gotea el agua hacia las tuberías de recolección.

El rendimiento promedio de estos colectores es entre 2 y 6 [l/m²/día], con un promedio anual de cerca de 4 [l/m²/día]. En lugares como Los Nidos (Antofagasta, 24°S), el rendimiento obtenido es superior, entre 6 y 8 [L/m²/día], estos rendimientos permiten obtener agua en forma competitiva con otras alternativas.



Figura 14. Colectores de 90 m² en Cuesta El Tofó. Se distinguen las canaletas para recolectar el agua.

La instalación opera en forma permanente desde 1988. En 1992 se construyó un estanque de 40,000 litros de capacidad cerca de Chungungo y una tubería para bajar el agua capturada en los colectores al estanque. En este estanque se acumula, filtra y trata lo captado, el exceso de agua, tanto la no consumida como la usada para lavar los filtros, se emplea en una pequeña huerta de alrededor de 0,3 hectáreas de superficie. Actualmente el pueblo de Chungungo se abastece en forma total del agua de los colectores. Durante la mayor parte del año los habitantes

tienen excedentes que les permiten regar unos pocos árboles. Sin duda este ejemplo es digno de ser imitado.

En otros lugares de la costa chilena se dan condiciones similares, las mediciones efectuadas en ellos revelan un potencial de captación de agua equivalente a precipitaciones anuales sobre los 500 mm, esto a pocos kilómetros de ciudades donde el agua debe ser traída en acueductos de más de 400 km. de longitud. Hay antecedentes de la existencia de al menos 47 lugares en 22 diferentes países donde se capta la neblina en forma natural por la vegetación o bien por colectores (Schiemenauer, 1992).

Otro ejemplo de aplicación de la tecnología desarrollada para el caso de Chungungo se está utilizando en las cercanías de Quito, Ecuador. Allí existe un lugar denominado "El Cráter" que presenta características semiáridas, está a algo más de 3,000 metros sobre el nivel del mar, las condiciones generales que allí se dan son similares a las que forman las "camanchacas" costeras. La diferencia aquí es que el aire húmedo se desplaza sobre la selva hacia la meseta de Quito.

En este lugar se encuentra un restaurante donde toda el agua necesaria para su funcionamiento, incluyendo el riego de una amplia área verde, proviene del agua captada en un atrapanieblas similar a los del Tofo.

El método es aplicable en cordones montañosos cercanos a la costa que cierran valles interiores expuestos a alta radiación. Los colectores deben ubicarse en el frente donde llega la "camanchaca" y en portezuelos que canalizan la niebla hacia el valle posterior. Además debe presentarse inversión térmica sobre el océano. Esto se da en las costas de Chile, Perú, Namibia y Australia occidental.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La altura óptima de instalación de colectores está en la mitad superior de la capa de neblinas Estratiformes que llegan a la costa, esto no es menos de un par de centenares de metros, pues de lo contrario la neblina puede estar contaminada por sales. Los rendimientos esperables se sitúan de 2 a 10 [L/m²/día]. Los trabajos realizados demuestran que el captar agua de las neblinas o "camanchacas" es viable. Sin embargo también ha habido fracasos en este tema, varias veces no se ha respetado las consideraciones generales para captar esta neblina dinámica y no se ha captado lo esperado o bien el agua ha estado contaminada con sales. Esto último ha ocurrido en las costas del Perú donde las neblinas de muy baja altura se contaminan con sal proveniente del mar.

Por otro lado existe aún trabajo por realizar para determinar cuál es la "carga" en agua recolectable de estas neblinas y cuál es la geometría óptima de los colectores. La geometría simple usada en "El Tofu" es adecuada cuando la "camanchaca" viene siempre de la misma dirección, sin embargo pierde efectividad con velocidades de viento más altas. La geometría tridimensional utilizada en los trabajos de la Universidad Católica del Norte favorece la captación en cualquier dirección, así como el recuperar agua que de otra forma se perdería, pero tiende a costos mayores por metro cuadrado de área de captación.

De lo que no cabe duda alguna es que en la "camanchaca" disponemos de un recurso de agua que apenas ha sido utilizado y puede ser una excelente solución para abastecer lugares que de otra forma tendrían penuria total de esta sustancia.

En 1992 un grupo de científicos se puso en contacto con el Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo (IDCR, por sus siglas en inglés), con objeto de presentar una propuesta para recolectar agua de niebla y neblina y suplementar con ello el suministro de agua de Chungungo, remota aldea de la geografía chilena. El agua proveniente de esa niebla flúa por

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

primera vez de los grifos locales. Actualmente, esa simple tecnología ha permitido aumentar a más del doble el suministro de agua per cápita en Chungungo, al mismo tiempo que ha inspirado esfuerzos similares en otras comunidades de todo el mundo.

El proyecto de Chungungo fue uno de los temas más destacados en la Primera Conferencia Internacional sobre Niebla y Recolección de Niebla, celebrada en Vancouver, Canadá. Más de 160 científicos y administradores de suministros de agua asistieron al evento para compartir los resultados de su investigación sobre recolección de niebla en lugares tan distantes entre sí como el Sultanato de Omán, Hawái, África del Sur, Islas Canarias, Croacia y Perú.

5.1.2 Solución del problema del agua en Chile

Robert Schemenauer (1991), desempeñó un papel fundamental en el desarrollo y evaluación del proyecto chileno, así como en la expansión de sus aplicaciones a otras regiones del mundo.

Un colector de niebla consiste en una red de propileno, resistente a los rayos UV, que se extiende sujetándola entre dos postes, la red se sitúa perpendicularmente a los vientos reinantes. A medida que la niebla pasa a través de la red se forman en ésta gotas de agua de que se deslizan hacia las partes inferiores, donde son recogidas por canalones. A partir de ahí el agua fluye a través de tuberías que la conducen a depósitos preparados para tal efecto.

5.1.3 El desierto costero.

La idea de domesticar la niebla para utilizarla como fuente de agua potable se ha venido estudiando durante decenios, pero fue en las montañas del árido desierto costero del norte de Chile donde por primera vez se pudo lograr ese sueño. En 1987, había 50 recolectores de niebla, cada uno medía 4 metros de ancho por 12 m de largo situados en lo alto de un risco que

domina la aldea de pescadores de Chungungo. Actualmente se espera que un total de 88 recolectores proporcionen más de 40 litros de agua por persona al día lo cual superaría con creces los 14 litros de que disponían los habitantes de Chungungo antes de que comenzara el proyecto. Los recolectores están bajo la supervisión de un comité local, que cobra una módica cuota a cada núcleo familiar, si un núcleo familiar sobrepasa excesivamente el consumo de agua promedio mensual, deberá pagar una cuota mayor.

5.1.4 Transformación de una aldea.

Chungungo se ha transformado virtualmente por la presencia de un suministro de agua económico y confiable. Antes de que se instalaran los recolectores, la población de la aldea se estimaba en 350 personas, muchas personas habían abandonado Chungungo con la esperanza de ganar su subsistencia en ciudades más grandes. Algunos de ellos ya han regresado y la población sobrepasa actualmente los 500 habitantes. Los recolectores de niebla proporcionan suficiente agua para el consumo doméstico y para cuatro hectáreas de huertos que mantiene la comunidad, árboles plantados a lo largo de la carretera principal de la aldea y un parque público en el centro de la misma.

Una de las conclusiones principales del experimento chileno es que la participación de la población local es vital. "Es sumamente importante hacer que la comunidad participe en el proyecto no sólo para que la población se familiarice con el mismo, sino para que participe en la construcción de los recolectores, en el mantenimiento de los mismos y en la organización de un comité de agua, así como en la realización de trabajo voluntario para mantener los costos del agua a un mínimo. En realidad el sistema depende de las nubes, pero si la población sabe cómo

usar esta sencilla tecnología y sus integrantes se organizan entre sí, entonces sí funcionará realmente", subrayó la profesora Cereceda.

5.1.5 Evaluación del potencial de los recolectores de niebla en Chile.

El éxito de los recolectores de niebla depende de ciertas condiciones geográficas y meteorológicas en el sitio propuesto. El Dr. Robert Schemenauer, del Ministerio del Medio Ambiente de Canadá, dice que el factor más importante es que haya niebla constantemente, especialmente durante la estación de la seca. Otros factores fundamentales incluyen: patrones de viento mundiales, la presencia de un sistema montañoso y su orientación con respecto al viento, altitud, la distancia del sitio a la línea costera, el espacio disponible para los recolectores de niebla, relieve del área que rodea al sitio, topografía y velocidad del viento, contorno de la cima y dirección desde la que sopla el viento ascendente, la presencia de laderas de vientos ascendentes y la microtopografía del área. Por ejemplo, las laderas de vientos ascendentes de los sitios de recolección son ideales, mientras que los sitios jalonados de pequeños valles, pequeñas colinas o grandes formaciones rocosas son menos adecuados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

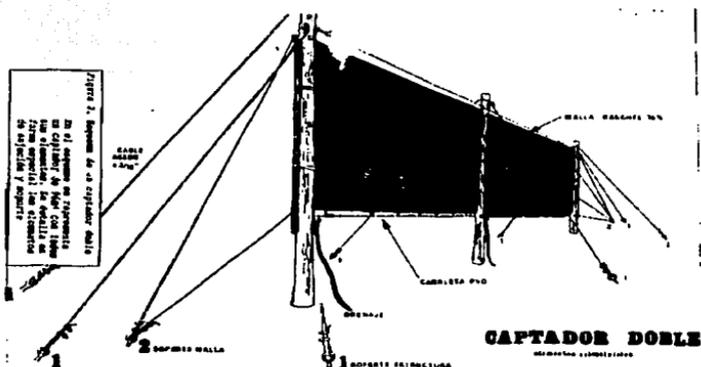
5.2 TÉCNICA DEL PROYECTO CHILENO

Se describen a continuación las actividades técnicas del proyecto relacionadas con el establecimiento de un sistema de abastecimiento de agua potable, su administración, manejo, consideraciones técnicas y uso alternativo del recurso:

5.2.1 Superficie de captación.

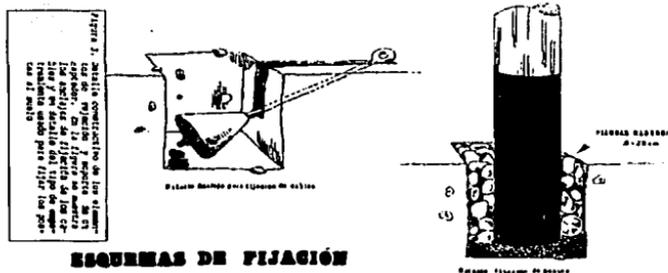
Durante la ejecución del proyecto se obtuvieron dos logros principales en el desarrollo de la tecnología de captación de agua de nube y neblina, estos son:

1. El diseño y construcción de un prototipo mejorado de colector cuyas principales ventajas son, como producto del mejoramiento del diseño mecánico, la disminución de la probabilidad de siniestro parcial o total, la reducción del costo de inversión inicial y reparación y, con ello, la disminución del tiempo de construcción y costo de mano de obra asociados (esquema 14).



Esquema 14. Esquema de un colector doble. En el esquema se representa un colector de 96 m² con todos sus elementos. Se detalla en forma especial los elementos de sujeción y soporte.

El concepto de modularidad ha permitido definir un sistema expandible, capaz de ser adecuado a las características del terreno que, en el caso de exigencias máximas, presenta sólo daños parciales y predecibles en su efecto. La estructura ha sido rediseñada permitiendo un grado de libertad de movimientos que le permite distribuir las tensiones producidas por las fuerzas externas sin presentar fatigas estructurales (esquema 15).



Esquema 15. Detalle constructivo de los elementos de sujeción y soporte de un colector. En el esquema se muestra los anclajes de fijación de los cables y un detalle del tipo de empotramiento usado para fijar los postes al suelo.

Con el avance obtenido durante esta etapa de investigación y basándose en los datos obtenidos durante los primeros 16 meses de operación es posible, ahora, modificar la especificación de algunos materiales y ensayar la estructura con el propósito de disponer, para los objetivos de difusión técnica del proyecto, de un modelo adaptable a otras condiciones geográficas, de operación y de construcción.

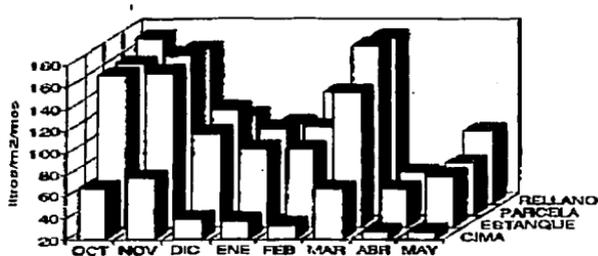
2. La construcción de una superficie adicional de captación de 1,200 m², ha permitido aprovechar un sector que, por sus características fisiográficas, ofrece un volumen de captación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

complementario y superior por metro cuadrado al producido por la superficie habilitada durante el proyecto.

3. Producción de agua de nube y neblina. (octubre 1992 a mayo 1993).

En base a los registros estadísticos de producción, realizados en el periodo 1987 - 90, uno de los principales "cuellos de botella" que enfrentaba el proyecto para abastecer a Chungungo, fue la baja productividad invernal que presentaban los 2,400 m² inicialmente instalados en la cima a 730 metros de altitud. Para mejorar la capacidad operativo del proyecto, fue necesario identificar y medir otros sitios de captación que complementarían la producción del sistema inicial (gráfica 1).



Gráfica 1. Producción de agua de nube y neblina, por sector.

Al observar la gráfica 1, se aprecia que el potencial de producción en distintos sitios del cerro En el Tofo son diferentes, las características topográficas del terreno las que, a su vez, definen el comportamiento de la nube, los sitios de paso de ella y las condiciones particulares del viento. Teniendo presente la oferta diferenciada de cada sector del cerro, con la construcción de

1,200 m² adicionales de superficie de captación los que fueron instalados en el sector denominado "El Rellano" fue posible mejorar la producción de agua en los meses de invierno, donde los eventos de captación son más escasos.



Gráfica 2. Productividad de los colectores, agrupados por sectores.

Considerando la observación hecha en la gráfica 1, en la gráfica 2 se presenta una comparación entre las producciones de los dos grandes conglomerados de colectores ubicados en el cerro: El sector del Rellano y el sector Cima/estanque. Las producciones estimadas para ambos sectores fueron extrapoladas de la producción unitaria de colectores estándar de 1 m² dispuestos en los sitios representativos mostrados en la gráfica 1.

Como se observa en la gráfica 2, la producción del Rellano, con una superficie de captación de 1,176 m², durante el periodo de mediciones, presenta un rendimiento muy similar al sector Cima/estanque, cuya superficie es de 2,208 m², esto implica que para las superficies construidas, la productividad del Rellano es, en promedio, un 50% superior a la productividad del sector Cima/estanque. Este hecho representa una situación que se deberá considerar en la

futura implementación de proyectos similares, puesto que en una línea de cumbre de pocos kilómetros de extensión las variaciones en productividad pueden ser significativas, de hecho, si el proyecto original sólo hubiera considerado la superficie inicial instalada en la cima, la tecnología no hubiera permitido sostener la demanda de la comunidad.

5.2.2 La matriz conductora

La matriz conductora, de 6 kilómetros de extensión, fue finalizada en los primeros días de febrero de 1992, ésta se construyó de acuerdo a las especificaciones de la Empresa de Agua Potable y, luego de 1 año de operación, ha sido posible sugerir y realizar ciertas modificaciones que adaptan el sistema de conducción a las características especiales de operación de esta tecnología. Las principales modificaciones son:

1. Instalación de filtros de intercepción.

Uno de los mayores problemas enfrentados por la conducción ha sido el ingreso accidental e incidental de elementos extraños a ella, dichos elementos que en su mayoría fueron incorporados a las tuberías por personas que la intervinieron con el propósito de extraer agua, obstruyó la conducción ocasionando pérdidas considerables de agua (figura 14)

Para evitar definitivamente este problema, se incorporó a cada reductor de presión un filtro de acero galvanizado que impide el paso, hacia la tubería, de elementos que la puedan obstruir o dañar. Junto con lo anterior y con el propósito de evitar la violación de estos dispositivos, se sellaron todos los reductores incorporando un candado a cada uno el cual sólo puede ser abierto por los operadores del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 15. Detalle de uno de los filtros de material sólido para partículas de mayor malla. Estos filtros están dispuestos en la cumbre o impiden el paso de residuos a la conducción.

2. Modificación de los reductores de presión.

El diseño inicial de los reductores de presión, consideró la utilización de una vía de escape para aire la cual fue construida con una tubería plástica de PVC de 25 mm este diámetro resultó ser insuficiente para desalojar, con la velocidad requerida, la columna de aire que antecede a los caudales discontinuos de agua. Para remediar las pérdidas que producía la saturación de las tuberías se las reemplazó, en el diseño original, por una de mayor diámetro (63 mm).

Aunque las modificaciones anteriores tenían como objetivo eliminar completamente el problema de las pérdidas durante la conducción, se ha observado, según se discutirá más adelante que, durante el período de operación del sistema (gráfica 3), el volumen de agua producido por la captación, ha sido mayor que el volumen demandado por la población de Chungungo.

En el gráfico 3 se aprecia que, en algunos meses del año, como es el caso del mes de noviembre de 1992, la producción de agua por captación supera en un 195% al consumo hecho por el poblado, sin embargo, éste solicita constantemente un aporte extra de agua.



Gráfica 3. Comparación entre captación y demanda mensual de agua.

Esta situación refleja que, si bien es cierto que la producción es suficiente para satisfacer la demanda, al llevar esto a la escala de consumo diario, se observa que los periodos de captación, concentrados en unos pocos eventos por mes, no coinciden con una demanda diaria sostenida. De este modo, la diferencia entre producción y consumo sólo puede ser explicada por la existencia de volúmenes de rebase que se originan en la capacidad limitada del estanque de almacenamiento. La solución a este problema, actualmente en estudio, se encuentra en un mejoramiento en la conducción -eliminando los puntos donde se producen pérdidas por saturación de la tubería- y en el manejo del volumen de carga*, más que en el aumento del

* En futuros diseños de sistemas de conducción del agua captada con atrapanieblas se deberá considerar la incorporación de un estanque de carga de mayor volumen -el cual se calculará según la producción o caudal máximo esperado- en el cual se regulará el caudal que alimentará la tubería limitándolo de acuerdo a los tramos de

volumen de almacenamiento, ya que esto último es más complejo de manejar y representa, a la vez, un costo de inversión mayor.

5.2.3. Distribución y red domiciliaria

La red de distribución general y domiciliaria debió ser modificada, con respecto al diseño original, a partir de dos problemas evidenciados durante la operación, las cuales son:

Limpieza e inspección del sistema.

Se observó durante los primeros 6 meses de operación que la apariencia física del agua sufría cambios negativos en el tiempo, es decir se observó una pérdida de la calidad del agua, principalmente originada por la aparición de turbiedad⁷.

Esa situación obligó a los operarios del sistema a aumentar la frecuencia de lavados del estanque, debiendo en algunas ocasiones descartar cantidades importantes de agua. Junto a lo anterior se observó en periodos de lluvia intensa, que es posible que ingrese a la conducción, en forma accidental, parte de la tierra que, en forma de barro, baja por las quebradas inmediatas al sitio donde se encuentran las partes que componen la conducción.

Ambas situaciones han ocasionado que, en los puntos terminales de la distribución, se acumule el polvo que es arrastrado en la conducción, esta acumulación de polvo y partículas va afectando, en forma paulatina, la calidad física del agua. Para sobrellevar, en parte, este problema se han habilitado, en la distribución, puntos de inspección que permiten al operador

menor pendiente. Cabe señalar que, en la actualidad, en los tramos de menor pendiente del tendido Tofu Chungungo se producen pérdidas en los reductores de presión debido a que la velocidad del agua en esos puntos es menor que la velocidad en los puntos de mayor pendiente y por lo tanto en esos lugares la tubería es incapaz de conducir todo el caudal que recibe

⁷ EL origen y la magnitud de esta turbiedad se discute más adelante al tratar el tema de la calidad total del agua. sin embargo, se debe considerar que por ser la captación un sistema abierto al medio ambiente, es inevitable que el sistema atrape parte del polvo que habitualmente se encuentra suspendido en la atmósfera

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

realizar purgas de limpieza, eliminando en forma periódica los residuos que se pudieran acumular allí.

5.2.4. Racionamiento.

Durante los periodos en que las reservas son insuficientes para cubrir la demanda de la comunidad, se observa que el consumo se incrementa puesto que cada usuario habilita reservas en su domicilio, esto debido al escaso volumen disponible lo que ocasiona que sólo los puntos más bajos de la matriz de distribución tengan acceso al agua, originando una distribución desigual del líquido disponible. Para sobrellevar este inconveniente se habilitan válvulas de sectorización, las que permiten optimizar la distribución del recurso puesto que, en la actualidad, en los periodos de escasez, el agua es repartida por sectores y por turnos.

5.2.5. Calidad físico-química del agua.

La calidad físico-química del agua producida por el sistema de captación ha sido determinada durante el período de operación del proyecto, con el propósito de establecer y definir sus características químicas y los tratamientos necesarios para asegurar su óptima calidad.

Durante la etapa de operación experimental ha sido posible establecer que existen tres tipos de factores que pueden, bajo determinadas condiciones, afectar la buena calidad del agua de origen atmosférico, estos son:

Factores ambientales naturales.

Los factores ambientales naturales se relacionan con las características geográficas y biológicas del sitio donde se instalan los atrapanieblas y son inevitables puesto que la intercepción de las

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

masas de aire -seco o húmedo- que circulan por El Tofo, es un proceso abierto a la atmósfera que no puede ser suspendido en los momentos en que no hay neblina o en los momentos en que las condiciones meteorológicas -principalmente el viento aumentan la probabilidad de atrapamiento de elementos extraños al agua, los que también son movilizados en suspensión, en el viento.

En primer lugar, la vegetación circundante y la fauna entomológica constituyen dos fuentes importantes de aporte de partículas contaminantes. Las hojas secas y los insectos son contaminantes frecuentemente encontrados en las distintas etapas del sistema, por lo que con el propósito de evitar su ingreso a las tuberías, en el cerro, donde se encuentra la red de interconexión de los atrapanieblas, se han dispuesto filtros de intercepción, contruidos con una malla de acero inoxidable de 1 mm cuyo propósito es retener en ese lugar la mayoría de los elementos de mayor tamaño que pudieran haber sido interceptados por los atrapanieblas, estos filtros están dispuestos en tambores plásticos donde el operador del sistema de captación puede realizar limpiezas rutinarias con facilidad.

Pero, además, junto con el ingreso de materia orgánica al sistema, otro problema que es inevitable es la incorporación del polvo que se encuentra en suspensión en la atmósfera en la captación. Principalmente en los períodos en los que no hay neblina, el polvo en suspensión es interceptado por el colector, quedando retenido en la malla hasta que el agua de captación lo ingresa al sistema. Los análisis físicos realizados al agua muestran que, preferentemente, se trata de partículas de diámetros menores a 40 μm . Con el propósito de retener este elemento contaminante se ha dispuesto en el nudo de las matrices de interconexión, un estanque de decantación cuyo objetivo es retener parte del polvo de mayor tamaño que ingresa a la cañería de conducción.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En forma adicional a las etapas de filtración descritas en los párrafos anteriores, tal como se mencionó en el punto relativo a la matriz conductora, existen, además, en cada reductor de presión, filtros de acero inoxidable adicionales que previenen el ingreso de contaminantes o los retienen en esos lugares.

Factores ambientales artificiales

Un punto fundamental a considerar al establecer un sistema de captación de agua atmosférica será la calidad del aire circundante al proyecto, es decir la presencia de fuentes contaminantes que son, por lo general, producto de alguna actividad económica (por ejemplo la minería).

En el Tofo, se instaló en las inmediaciones del cerro una faena para la explotación de un mineral de hierro. Como producto de su actividad (explosiones, tránsito de camiones, movimiento de tierras, etc.), se ha observado un aumento notorio de partículas en suspensión. Por lo anterior, y como consecuencia de que en los meses previos a la primavera (en el año 1992) disminuye la presencia y frecuencia de la neblina, provocó que la calidad, principalmente física, del agua producida disminuyera notoriamente, esto quedó de manifiesto por la presencia sostenida de turbiedad en el agua que era distribuida a la comunidad.

No obstante las etapas de filtración incorporadas al sistema han disminuido parcialmente este efecto, para resolver este inconveniente, fue necesario recurrir a la empresa minera vecina, con el fin de que ellos aportaran una solución definitiva al problema ocasionado. De esta manera, el sistema del Tofo, tendrá un filtro multicapas de arena/cuarzo cuyo propósito es retener completamente las partículas suspendidas en el agua. Esta solución, junto con mejorar definitivamente la calidad físico-química del agua, permitirá disminuir en forma efectiva la frecuencia de las limpiezas del estanque de almacenamiento práctica que, antes de instalar el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

dispositivo filtrante, representaba para la comunidad la necesidad de perder importantes volúmenes de agua.

5.2.6 Calidad microbiológica del agua

Durante la operación del sistema se ha establecido que, en general, la calidad microbiológica del agua captada es buena. Sin embargo, se debe tener presente que esta variable depende enteramente de mantener un nivel de cloro residual, en el agua, que impida el desarrollo de la microflora. Esto, por ser una labor ejecutada por la comunidad depende enteramente de la labor de instrucción que se realice, principalmente, con el operador del suministro. Es importante tener presente en este punto que, debido a las características de la conducción, no es económicamente viable la instalación de un sistema automático de cloración pues el sistema de detección de caudal adecuado tiene un costo elevado y requiere de energía eléctrica para su operación. Debido a ello es importante considerar en la ejecución del proyecto la capacitación intensiva de los responsables de la calidad microbiológica del agua suministrada a la población. En la siguiente tabla se presenta un resumen de las principales características físico-químicas del agua captada por el sistema.

ANÁLISIS QUÍMICO Y NORMA

UBICACIÓN DE LA MUESTRA

Elemento analizado	Norma chilena (NCh 409)	Cumbre	Rellano	Reductor de presión	Estanque
Cianuro (CN)	0,2	ND	ND	ND	ND
Cloruro (Cl)	250,0	62,0	75,0	65,0	80,0
Fenoles	0,002	ND	ND	ND	ND
Detergente	-	ND	ND	ND	ND

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Flúor (F)	1.5	ND	NO	ND	ND
Mercurio (Hg)	0,001	ND	ND	ND	ND
Arsénico (As)	0.05	0,07	0,09	ND	ND
Cadmio (Cd)	0.01	ND	ND	ND	ND
Cobre (Cu)	1,0	0,1	0,36	ND	0,05
Cromo (Cr-IV)	0.05	ND	ND	ND	ND
Hierro (Fe)	0,3	12,0	39,0	1,1	3,9
Magnesio (Mg)	125,0	8,0	15,0	6,0	16,0
Manganeso (Mn)	0.1	0,25	0,53	0,21	0,34
Amonio (NH ₄)	0.25	2,6	3,4	1,5	0,9
Nitrito (NO ₂)	1,0	0,004	0,018	0,022	0,73
Nitrato (NO ₃)	10,0	5,0	7,7	3,9	9,1
Plomo (Pb)	0.05	0,07	0,06	ND	ND
Selenio (Se)	0.01	ND	0,005	ND	ND
Zinc (Zn)	5,0	0,28	0,16	0,26	0,16
Total de sólidos filtrables	1000,0	200,0	332,0	196,0	604,0

Tabla 3. Análisis del agua captada según Norma Chilena de Agua Potable (NCh 409). En la tabla se reflejan los resultados de un análisis físico-químico realizado al agua producida por el sistema. Las muestras fueron tomadas en distintos puntos del sistema durante un sólo evento de captación (ND significa no detectado).

Las muestras Cumbre y Rellano fueron tomadas en el estanque decantador, en las tuberías que encauzan los caudales, por separado, de los dos conglomerados de colectores. La muestra Estanque corresponde al agua almacenada en el estanque acumulador y, por último, la muestra

Reductor fue tomada en el caudal de llegada del reductor de presión ubicado en el sector de Peralito, donde se encuentra uno de los ensayos forestales, todos los valores en la tabla están expresados en miligramos por litro (mg/L).

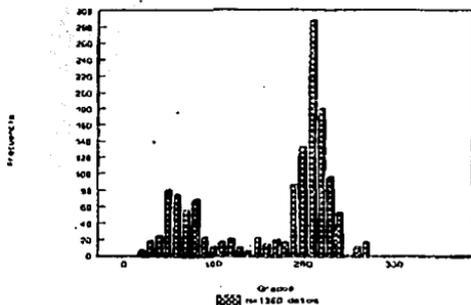
En la segunda columna de la tabla se presentan los valores de concentración máxima de cada elemento establecidos por la norma chilena de calidad de agua potable (NCh 409). En aquellos casos que la muestra, en alguno de sus elementos, excede los valores de la norma el recuadro es representado achurado.

En los resultados de la tabla anterior se observa que las concentraciones de los elementos Arsénico, Plomo, Hierro, Manganeso y Amonio aparecen excediendo la norma chilena de agua potable. Para determinar el origen de esta contaminación se realizó diversos análisis y estudios con el propósito de ubicar la fuente contaminante y así determinar si la calidad del agua se ve afectada por fuentes ajenas a la nube o si los contaminantes son inherentes a la captación misma.

Como primer criterio de estudio se establece que al Este del sistema de captación se encuentra ubicada, desde 1990, una faena de explotación minera donde se extrae y se procesa mineral de hierro, dicha faena produce grandes cantidades de polvo fugitivo sedimentable. Esta inmisión de partículas tiene su origen, principalmente, en dos molinos eléctricos de molienda de mineral, tal como se observa en la gráfica 4, donde se representa la distribución en frecuencia, de las direcciones de viento medidas en el "El Tofo", las observaciones más frecuentes corresponden a vientos provenientes del Este/Este-Noreste (frecuencia = 22%) y del Sur/Suroeste (frecuencia = 52%), éstas dos direcciones, opuestas entre si, representan el flujo normal de las masas de aire en el sector del Tofo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La velocidad promedio del viento en la estación meteorológica de donde se obtuvo los datos anteriores, fue para el período de medición, de $3,9 \text{ ms}^{-1}$.



Grafica 4. Frecuencia de la Dirección del viento en el sector del rellano "El Tofo".

Teniendo en consideración los antecedentes aportados, se observa, en la gráfica, que el 22% del tiempo la dirección del viento fluctuó entre los 50 y 9 ms^{-1} es decir predominantemente este/noreste. Durante ese lapso, es posible asegurar, que todas las partículas que son producidas por la faena minera, son arrastradas hacia el sitio donde se encuentran los colectores de neblina. Como se considera que si el origen de la contaminación fuera la faena minera, se debieran encontrar tres características en el polvo contaminante:

- 1.- Las partículas deberían ser de baja granulometría, por el hecho de deber ser transportado desde la faena hacia los colectores.
- 2.- Considerando la cantidad de sedimento observado, el origen del polvo sólo podría encontrarse en la dirección de los dos vientos predominantes, y

3.- La composición química del polvo debía coincidir con el material que extrae y procesa la faena minera.

En la tabla 4, se muestra la caracterización granulométrica del polvo colectado desde el estanque donde convergen los caudales de los colectores, en ella se aprecia que más del 90% del material corresponde a partículas de tamaños inferiores a 40 μm .

MESH	% Tamizado	μm	% bajo tamaño
+ 100	0,0	-30	98,2
+ 200	0,5	25	80,1
+325	0,4	20	62,5
-325	99,1	15	45,3
		10	28,8

Tabla 4. Caracterización granulométrica del polvo.

Junto con lo anterior, se realizó un análisis químico de una muestra del sedimento decantado en el estanque de carga, la composición en términos de porcentaje de los elementos de mayor concentración, es la siguiente (las cifras representan el porcentaje del total de la muestra):

Fe	P	S	SiO ₂	V	Ti	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	CU	Na	K	Mn
23,23	0,134	0,049	35,11	0,12	0,98	7,50	4,95	5,99	7,47	0,02	1,19	0,74	0,15

Análisis de muestra de sedimento

Es de señalar que los resultados de éste análisis muestran que uno de los principales componentes del sedimento encontrado en el estanque de carga corresponde al hierro, como metal y como magnetita, deduciéndose de ello que el origen más probable se encuentra en la faena minera.

Al comparar la composición química del sedimento y la composición química del mineral extraído por la faena minera, en el entendido que cada mineral, dependiendo de su procedencia, tiene características que le son propias y que lo identifican de los demás, se observa que el polvo sedimentado, según la tabla anterior presenta contenidos de Vanadio y Titanio que son elementos propios y característicos del mineral que es extraído del Tofo.

Sin embargo, teniendo en consideración que los datos entregados a CONAF no contenían información acerca de la presencia de Plomo y Arsénico en el mineral, se procedió a determinar la presencia de estos elementos en el mismo material sedimentado en los estanques. El resultado es el siguiente:

PLOMO 130,920 mg/Kg.

ARSENICO 0,150 mg/Kg.

Teniendo en cuenta la información anterior y de acuerdo a los requerimientos del sistema de agua potable (norma Chilena), se determinó la necesidad de instalar, en forma urgente, un filtro capaz de retener las partículas finas, compuestas principalmente por fierro, hasta una turbiedad (máxima medida) de 113 U.N.T. Dicho filtro, por razones de operación, puesto que el sistema es administrado y operado por la comunidad, debería ser ubicado en la llegada del estanque acumulador de 100 m³.

Toda la información escrita en este documento ha sido obtenida a partir de análisis realizados por el Centro de Investigación Minero-Metalúrgica, por el Laboratorio de Análisis de la Universidad de La Serena y por el Laboratorio de Análisis de la Compañía Minera del Pacífico. Para el caso de la concentración de amonio, que excede la norma en todo el sistema, es conocido que este compuesto es un indicador de contaminación microbiológica. Por lo tanto se

han realizado una serie de análisis microbiológicos del agua producida para identificar los niveles de contaminación y, basándose en este estudio, en la actualidad, se está diseñando un protocolo de cloración, por aspersión, de las mallas con el propósito de determinar la frecuencia y concentración de cloraciones rutinarias que se deberán efectuar al sistema de captación.

5.3 DISEÑO Y ESTRUCTURA DEL COLECTOR CHILENO

Un elemento colector artificial, como los que se han empleado en el proyecto chileno, consiste en una malla plana, que es ubicada en forma perpendicular a la dirección del viento predominante. Durante el proceso de captación del agua contenida en la nube, las gotitas que son atrapadas por la malla, se agrupan allí hasta formar una gota de mayor tamaño que se desliza por gravedad hasta ser colectada por una canaleta dispuesta en el borde inferior del panel.

Se estima que se requiere coleccionar cerca de 10 millones de gotitas contenidas en la neblina, para formar una gota del tamaño de la cabeza de un fósforo.

De lo anterior se desprende que el colector artificial es un elemento completamente pasivo ya que el agua atrapada es drenada sólo por flujo gravitacional hasta el punto donde será usada.

La producción de agua de un sistema de paneles colectores, o "atrapanieblas", depende del contenido líquido y características físicas de la nube, expresadas como tamaño de la gota y velocidad del viento que conduce a la nube, por una parte, y por la otra, de la naturaleza y características de la superficie de captación, expresadas como su área útil de intercepción y su eficiencia de producción. La duración de cada evento de neblina, también es una variable determinante del volumen total de producción.

El panel atrapaniebla empleado en las experiencias realizadas en Chile, tiene como elemento de captación una malla que comúnmente es usada en la agricultura, la malla es elaborada en base a un tejido de filamentos planos de polipropileno de 1 mm de ancho por 0,1 mm de espesor.

En los paneles del proyecto chileno se ha elegido, luego de haber ensayado su eficiencia de producción, una malla de mediana densidad, la cual está dispuesta en doble paño (figura 16).



Figura 16. Durante esta etapa de la investigación, se ensayó muchas formas y tipos de construcción, gracias a esos experimentos hoy se dispone de un diseño funcional y de bajo costo.

El sistema de paneles atrapanieblas se instala en sitios previamente elegidos por su potencial de producción de agua y por sus características topográficas apropiadas. Las unidades colectoras son interconectadas por tuberías que conducen el agua hasta un estanque de almacenamiento. Desde allí podrá ser entregada a los usuarios en distintas formas, dependiendo esto del uso que se le dará al recurso y del costo que tendrá el sistema de distribución.

El diseño de este sistema colector fundamenta su ejecución en los conceptos de la tecnología apropiada ya que, por estar estos proyectos principalmente orientados a los sectores rurales, se

debe concebir la creación de una estructura que solucione el problema de obtención de agua a bajo costo, utilizando elementos eficientes y disponibles en un amplio mercado.

El montaje del sistema es a base de elementos pasivos y estáticos que son de fácil construcción o ensamblaje en la obra.

La instalación de cada panel y su interconexión es rápida y simple, no se requiere gran cantidad de mano de obra para su ejecución. Debido a lo simple del diseño del sistema, no se requiere de personal altamente calificado para su construcción además, por ser la conducción del agua un flujo gravitacional, ésta no emplea mecanismos que usan energía para su funcionamiento y/o que sean complejos de operar y reparar.

La tecnología de captación de agua atmosférica, es particularmente ventajosa en proyectos que por su tamaño relativamente pequeño, no justifican inversiones de gran magnitud.

5.3.1 Diseño del colector

En términos simples, el panel colector consiste en dos postes, distanciados a 12 metros, entre los cuales va dispuesta la doble malla de 4 metros de altura (esquema 14), sin embargo, el colector incluye varios elementos que en conjunto le dan las características de funcionamiento.

Estos paneles colectores pueden ser módulos simples, es decir conformados por una sola malla de captación, sostenida por dos postes (48 m^2), o pueden ser módulos múltiples, es decir compuestos por varias mallas de captación, sostenidas por postes comunes (96 m^2 , 120 m^2 , etc) manteniendo la orientación de los paneles en forma perpendicular a la dirección del viento.

El criterio para seleccionar el número y tipo de módulos a construir (paneles simples, dobles, etc.) será determinado fundamentalmente por la topografía del terreno, además puede influir en esta decisión la calidad de los materiales empleados en la construcción del panel colector.

Esta característica de modularidad del sistema, establece que el costo de cada subunidad de un panel múltiple sea inferior al costo de cada panel simple, por lo que la producción de agua se limitará sólo a la adición de unidades colectoras, lo cual se puede adecuar en el tiempo al crecimiento de la demanda.

Otra característica importante del sistema es la baja probabilidad de interrupción del proceso de producción de agua, ya que el daño causado por siniestros naturales esperados nunca afectará a la totalidad del sistema de captación instalado.

5.3.2 Elementos estructurales

Antes de describir la arquitectura del panel, se debe considerar que el esfuerzo más importante sobre la estructura lo provoca el viento, por eso en la elección de los materiales y en el diseño de Ingeniería de detalles es imprescindible tener presente lo siguiente:

1. El panel colector debe estar diseñado y construido en base a elementos cuya resistencia soporte la demanda estructural solicitada por el viento, la humedad, el roce entre piezas y la oxidación química y/o galvánica.
2. La estructura nunca debe ser rígida, de modo tal que los elementos tengan cierto grado de libertad (movimiento) que les permita distribuir las fuerzas de trabajo sin fatigarse.
3. Ante un eventual colapso en la estructura, el daño deberá ser parcial y, además, predecible en sus efectos. Para ello se diseñó una estructura en que los elementos de sustentación vertical son distintos de los elementos de sostén de la malla colectora, basado en que los primeros son de mayor costo y mayor dificultad de reposición.
4. Ya que la malla recibe y transmite la fuerza del viento, se planifica su operación de modo tal, que frente a vientos de gran magnitud el daño será absorbido por ella sin ocasionar la pérdida

total del colector cabe mencionar que la pérdida total de la malla incide en un 3.78% del costo de un colector.

Elementos de un colector

El panel colector, está compuesto por los siguientes elementos:

5.3.3 Estructura de soporte

Esta estructura está conformada por dos o más pilares, que en este caso son postes de Eucalipto de 7 metros de altura y 5 pulgadas de diámetro en la punta superior, la cantidad de postes depende del número de subunidades que compongan el panel colector. Además, componen esta estructura los cables de sostén de los postes, que se sujetan al suelo por medio de anclajes prefabricados.

5.3.4 Elemento de captación

La superficie colectora está compuesta por una doble malla, de 12 x 4 metros (aprox. 100 m² de material), la cual va cosida a un grupo de cables de sostén y sujeta a los postes por un conjunto de barras de anclaje.

Los elementos que componen el sistema de captación son:

5.3.5 Cables de sostén

Existen dos grupos de cables que cumplen distintas funciones:

Elemento de sustentación vertical: Está compuesto por dos cables de acero de 3/16" de diámetro (superior e inferior) cuyo rol es soportar verticalmente la malla.

Dado que la malla se ha definido como el elemento de sacrificio frente a un siniestro mayor, los cables en su punto de anclaje llevan un "fusible de seguridad" constituido por un tramo pequeño hecho con un cable de menor resistencia.

Elemento de sustentación horizontal: Dado que la fuerza del viento produce una catenaria en la malla, lo que ocasiona una pérdida significativa del agua captada, se optó por subdividirla en tres paños discretos de las mismas dimensiones para esto se dispuso entre los cables superior o inferior, dos líneas de alambres galvanizados y plastificados de 5.11 mm de diámetro.

5.3.6 Barras de anclaje

Ellas están compuestas por dos o más pares de tablillas de pino tratado para prevenir el ataque de hongos, en las que se envuelven los extremos de la malla, estas barras, que van adosadas a cada poste, permiten la tracción de la malla en forma pareja y a la vez le otorgan un cierto grado de rigidez.

5.3.7 Canaleta colectora y drenaje

En el cable inferior de la malla colectora se cuelga una canaleta por medio de alambres galvanizados, ésta recibe las aguas que escurren por gravedad en la malla y las conducen hacia una aducción que se conecta a una cañería matriz o estanque de acumulación. En la experiencia chilena se ha usado, como canaleta, una tubería de PVC de 110 mm de diámetro, cortada longitudinalmente en parte de su sección.

5.4 CALCULO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN DEL COLECTOR CHILENO

La superficie de captación está definida por el área útil de intercepción, esta superficie corresponde a la malla que va dispuesta entre los postes de Eucalipto. En un proyecto de captación y suministro de agua atmosférica, para determinar la superficie de captación necesaria para abastecer una población humana, se deben considerar tres factores determinantes, estos son:

- 1.- El tamaño de la población objetivo.
- 2.- La dotación mínima, considerada necesaria para satisfacer la demanda de la comunidad, y
- 3.- El volumen potencial de captación (propio de cada sitio), expresado en litros/m²/día.

Las variables citadas definirán, en términos básicos, el tamaño de una obra de captación del agua contenida en las neblinas. En el caso de Chile, al aplicar esta tecnología a un lugar determinado, será necesario tener presente las siguientes consideraciones:

- a) Según ha sido determinado por estudios realizados en algunas comunidades de la región, los habitantes de estos lugares consideran que una dotación de 25 litros/persona/día es suficiente para cubrir todas sus necesidades de uso de agua.
- b) De acuerdo a lo estimado, por estudios teóricos para neblinas, como las presentes en el sector del "El Tofo", con un contenido líquido de 0,25 gm⁻³, el proyecto permite abastecer con 30 litros por persona al día, a comunidades pequeñas, con un máximo de 3,000 habitantes.
- c) Las limitaciones a la aplicación de la tecnología, en términos del costo de la obra, están fundamentalmente determinadas por el largo de la tubería de conducción. Es decir, mientras más cercana se encuentre la comunidad al punto de captación, menores serán los costos de inversión de la obra.

d) Al instalar un sistema de captación la elección del tipo de colector a emplear (simple, doble o triple) será determinada por las características topográficas del terreno elegido. Sin embargo, por razones de costo unitario de construcción, es recomendable el empleo de estructuras múltiples.

e) Los cálculos de este informe se han realizado en base al volumen de captación mínimo estimado para el "El Tofo", este es de 3 litros/m²/día, cifra que parece ser suficientemente conservadora, como para que pueda ser extrapolada a otros lugares de la costa chilena.

f) Por último, un factor fundamental a determinar en el estudio de la factibilidad técnica del proyecto y en la optimización del sistema de captación será la frecuencia de ocurrencia y la estacionalidad del fenómeno. Como referencia, en el caso del "El Tofo" se ha dimensionado el proyecto en base a una permanencia de la nube de un 62% del año, distribuida en forma homogénea. Dicho de otro modo, se estiman períodos máximos de no captación de diez días. De acuerdo a las consideraciones anteriores, para estimar la superficie de captación necesaria para satisfacer la demanda de una comunidad dada se deberá realizar el siguiente cálculo:

$$P_d = D N$$

Para el caso de una comunidad de 350 personas con una demanda de 25 litros/persona/día, se requieren contar con una producción diaria (Pd) de 8,750 litros.

Utilizando un factor de seguridad de suministro (F) de 30%, el volumen de producción diaria total será de:

$$P_d = D N F$$

Por lo tanto, para el ejemplo práctico, la producción total diaria (PD) será de 11,375 litros.

Para estimar la superficie total de captación que se necesitará construir, previamente se deberá disponer de la estimación del volumen potencial de captación para el sitio elegido, para el caso

de las instalaciones del "El Tofo", el promedio anual de captación es de 3 litros/m²/día. Por lo tanto, la superficie total se expresará como:

$$S = \frac{P_d}{C_p}$$

Es decir, para una demanda de 11,375 litros por día, se requiere construir 3,792 m² de superficie de captación. Como se ha definido al colector como una unidad o un conjunto de subunidades de 48 m² cada una el valor anterior debe ser expresado en número de subunidades de 48 m², aproximando el resultado al entero superior.

$$S_u = \frac{S}{48}$$

Donde:

S = Superficie de captación a instalar (m²)

Su = Superficie de captación expresada como cantidad de unidades de 48 m²

D = Dotación demandada (litros/persona/día)

Cp = Volumen potencial de captación (litros/m²/día)

Pd = Producción diaria básica

PD = Producción diaria total

N = Número de personas que debe abastecer el proyecto

F = Factor de seguridad de suministro

Del cálculo anterior, se obtiene que para abastecer la demanda de una población de 350 habitantes con un promedio de 25 litros/persona/día, se deberán construir 79 subunidades colectoras de 48 m² cada una. El ordenamiento y la estructuración de estas subunidades en

módulos simples o múltiples, como se expresa en el párrafo d) estará definido por la superficie de terreno disponible y por su topografía.

5.5 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN EN CHILE

La tabla 5 especifica los costos de inversión necesarios para construir un sistema de captación similar al instalado en el "El Tofo", en Chile.

a) Costos Directos para construir un colector de cada tipo (en USS).

CONCEPTO	SIMPLE (48 m ²)	DOBLE (96 m ²)	TRIPLE (120 m ²)
Materiales	275,75	432,71	568,58
Mano de obra	62,81	107,05	150,01
Gastos Generales	39,04	64,08	89,10
TOTAL	377,60	603,84	807,69
Costo por metro cuadrado construido	7,87	6,29	6,73

Tabla 5. Costos totales de inversión necesarios para construir un sistema de captación básico.

5.6 OTROS COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA

5.6.1 Colectores de neblina en Hawai

En la región de Kihikinui de las islas hawaianas de Maui perteneciente a los Estados Unidos de Norteamérica, la deforestación y la erosión que han azotado severamente el suelo son obstáculos principales al reasentamiento de la población indígena de Hawai. Durante los veranos de 1996 y 1997, James Juvik, de la Universidad de Hawai, investigó la cantidad de agua que podrían producir tres sitios de recolección de niebla.

En la mayoría de los casos en esta área, la severa deforestación ha causado cambios hidrológicos. El agua del manto freático es muy salina y las laderas de las montañas se elevan con mucha rapidez a medida que uno se desplaza hacia el interior. Esto significa que cuando se excava un pozo para sacar agua hay que excavar al menos 1 km. de profundidad antes de encontrar el precioso líquido, de modo que para suplementar el suministro de agua durante la temporada seca, se consideró la densa cobertura de nubes como una posible fuente de agua.

El estudio de Juvik llegó a la conclusión de que el agua producida por la niebla excedió la recolección de agua de lluvia en los sitios de prueba, más aún, la cantidad de agua recolectada dependía de la elevación del sitio. El recolector de niebla más alto, situado a 2,200 m, recogió la mayor cantidad de agua, es decir, 3.92 litros/m² por día, actualmente se llevan a cabo planes para instalar en las laderas superiores de Kahikinui un modelo experimental de recolector de niebla que mide 6 m de alto por 170 m de largo.

5.6.2 Colectores de neblina en Sudáfrica

En el árido clima de Sudáfrica, solamente el 1% de la tierra recibe más de 500 milímetros de lluvia cada año. Esta realidad, conjuntamente con la severa sequía y la falta de agua potable en

muchas áreas, llevó a los investigadores a explorar las nieblas y neblinas que se desplazan por algunas regiones como una fuente potencial de agua. Basándose en experimentos realizados a principios de siglo y en el éxito de los recolectores de niebla chilenos, Jana Olivier, profesor de la Universidad del Norte, completó un estudio de factibilidad sobre el potencial de los recolectores de niebla para aumentar los existentes suministros de agua en el Escarpado Oriental de Sudáfrica.

En 1995, instaló recolectores de niebla en cuatro sitios de prueba, en dos de los sitios, cada recolector produjo hasta 10 litros de agua por día. El profesor Olivier llegó a la conclusión de que la recolección de niebla y lluvia en sitios cuya altura fuera superior a los 1,400 m probablemente resolvería la escasez de agua en las comunidades locales.

La investigación mostró que éste es un sitio sostenible para la recolección de agua de neblina debido a que en la estación de seca, la neblina aparece con mayor frecuencia que durante la estación de las lluvias. Este factor, unido a los vientos, el terreno, la accesibilidad del sitio y el rendimiento, hacen de la tecnología de recolección de niebla algo muy factible.

5.7 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA CON FINES FORESTALES

En las zonas áridas, en climas secos y muy secos, el riego es uno de los factores más importantes en su establecimiento y desarrollo, éste en plantaciones bajo condiciones bioclimáticas y edáficas similares, se puede lograr, ya sea plantando en un año con buena pluviometría o bien, adicionando riego artificial a la plantación.

En el experimento realizado en El Tofo se observa que las plantas, durante su primer período de vida, muestran ser poco eficientes en la captación de agua para su propio riego. Sin embargo, algunas especies, a medida que van creciendo, son capaces de atrapar el agua que contienen las

neblinas, este hecho, se ha podido comprobar que está directamente vinculado a características fenológicas de la planta, como son la forma y tamaño de la hoja o la forma y altura del follaje. Esto hace necesario, para definir cuando y cuanto riego se produce por este medio, diseñar e instrumentar un método que permita medir la magnitud de esta oferta en términos del aporte que la captación de neblina representa para el riego de cada planta, a partir de una edad determinada.

Un factor importante junto con la medición de la oferta hídrica de la neblina, es el conocimiento de las variables biometeorológicas que interactúan y definen el comportamiento de la vegetación plantada bajo condiciones de neblina, en la cumbre de los cerros costeros.

En tal sentido, para estimar el rendimiento de una plantación forestal o agrícola en esos lugares, será necesario conocer con precisión el clima imperante en el lugar.

Puesto que hasta el momento sólo se ha investigado la factibilidad técnica del uso forestal del agua y suelos de las cumbres costeras, no se dispone en la actualidad de indicadores de la viabilidad y/o conveniencia económica de la forestación en estos sectores. Puesto que el beneficio de esta práctica, en zonas áridas, es mayormente social; sería necesario establecer una evaluación socio-económica de la forestación en cumbres costeras o de prácticas agroforestales combinadas en esos sectores.

5.7.1 Demanda de agua para riego forestal

Se ha calculado en forma somera, de manera experimental, una demanda de agua para riego. Se observa que la aplicación de un tratamiento de riego quincenal -sumado a un riego inicial suplementario- mejora notoriamente la sobrevivencia de las especies plantadas, en base a esto se puede estimar que, para el establecimiento de una parcela forestal de una hectárea de

superficie plantada con una densidad de 1,100 plantas/hectárea. -es decir una distancia de plantación de 3 x 3 metros- se requiere de un riego total al año de 192,500 litros.

Dicho valor llevado a la escala diaria representa una demanda de captación de agua de 527 litros por días sobre una base anual.

Asumiendo que la productividad en el sector del ensayo El Tofo es de 4 litros/m²/día, se obtiene que para producir el volumen demandado es necesario construir una superficie de captación de 132 m². Este valor expresado en términos de subunidades de 48 m² cada una equivale a un colector triple de 144 m².

De acuerdo a lo anterior, la producción diaria esperada será de 576 litros por día, asumiendo que sólo el 60% del tiempo habrá neblina presente, se ajusta la cantidad a una producción de 345 litros por día. Así, de acuerdo a lo estimado, cada 15 días será esperable disponer de una acumulación promedio de, aproximadamente, 5,175 litros.

Aunque tal cantidad es suficiente para los riegos quincenales, se debe tener presente que se ha establecido al inicio de la plantación un riego suplementario que eleva la demanda a una cifra superior a los 10,000 litros cada 15 días. Por lo tanto será recomendable modificar el protocolo de riego ajustándolo a los 5,175 litros quincenales, es decir el equivalente a un riego de 4,75 litros por planta cada 15 días.

El cálculo anterior, por efecto de la manipulación matemática de los datos, trabaja sobre la base de un fenómeno cuya frecuencia de aparición es homogénea durante el año, sin embargo, se conoce que la ocurrencia de neblina es un fenómeno aleatorio que no se distribuye en forma homogénea en el corto y mediano período.

Esto representa, suponiendo 10 días de no-neblina, un déficit hídrico de 3,450 litros, los que deberían ser cubiertos almacenando agua en los períodos en que la producción supera la media.

Los resultados obtenidos de estos experimentos hacen suponer que el empleo con fines forestales es adecuado aún cuando es necesario un mayor estudio.

5.8 FACTORES PARA ESTABLECER EL LUGAR GEOGRÁFICO DE COLECCIÓN

El éxito de los recolectores de niebla depende de ciertas condiciones geográficas y meteorológicas en el sitio propuesto, el Dr. Robert Schemenauer, del Ministerio del Medio Ambiente de Canadá, establece que el factor más importante es que haya niebla constantemente, especialmente durante la estación de seca.

Otros factores fundamentales incluyen: patrones de viento mundiales, la presencia de un sistema montañoso y su orientación con respecto al viento, altitud, la distancia del sitio a la línea costera, el espacio disponible para los recolectores de niebla, relieve del área que rodea al sitio, topografía y velocidad del viento, contorno de la cima y dirección desde la que sopla el viento ascendente, la presencia de laderas de vientos ascendentes y la microtopografía del área. Por ejemplo, las laderas de vientos ascendentes de los sitios de recolección son ideales, mientras que los sitios jalonados de pequeños valles, pequeñas colinas o grandes formaciones rocosas son menos adecuadas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPITULO 6

**COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS
COLECTORES**

6.1 COLECTORES DE AGUA DE NUBE Y NEBLINA EN MÉXICO.

El primer estudio realizado del agua de nube y neblina que se tiene registrado en México fue realizado por Vogelmann (1973) quien estimó la cantidad de agua que captaba la vegetación de manera natural en los eventos de neblina y por la impactación de nubes sobre la Sierra Madre Oriental (Oeste de México) donde este estudio determinó la cantidad de agua líquida en la nube así como su composición química.

Los estudios más recientes realizados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, han tenido varias finalidades entre ellas la de comparar y establecer las diferencias entre los dos tipos básicos de colectores de agua de nube y neblina que existen: el colector pasivo y el colector activo.

6.2 ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS COLECTORES

Para este estudio se utilizaron tres diferentes colectores de agua de nube con el objetivo de estudiar la química del agua de nube y neblina de una zona montañosa de la República Mexicana, la capacidad de colección de cada uno de los colectores y la evaluación de las posibles diferencias entre los colectores.

Se colectó simultáneamente agua de nube y neblina en un sitio montañoso, esta colección fue realizada en Teziutlán, un poblado localizado en la Sierra Madre Oriental, en el estado de Puebla, México. (esquema 3).

Teziutlán está localizado en una zona de vientos en una ladera de la Sierra Madre Oriental, en una región montañosa inclinada al noroeste de la República Mexicana, esta ubicación hizo de Teziutlán un sitio favorable para el muestreo de agua de nube y neblina ya que está expuesta

esta zona directamente al aire húmedo y a nubes provenientes del Golfo de México además de contar con lapsos de niebla durante todo el año con una mayor frecuencia de neblina durante los meses de noviembre a enero.

La topografía del lugar juega un papel importante ya que está íntimamente relacionada con los "nortes" (término empleado para nombrar el arranque de aire frío proveniente del Golfo de México), además del incremento considerable de neblina durante el invierno debido a los vientos del norte que son predominantemente perpendiculares a la inclinación de la montaña. Finalmente Teziutlán también proporciona las facilidades de infraestructura requeridas para instalar de manera segura y confortable la estación de monitoreo y los colectores de agua de nube y neblina.

El clima de Teziutlán de acuerdo a la clasificación de Köppen es $C(fm)w^*b(i)g$, esta nomenclatura intenta medir la lluvia y nubosidad invernal en Teziutlán siendo menor al 18% de la precipitación total anual (alrededor de 1600 mm), teniendo dos temporadas grandes de lluvia durante el verano acompañadas de una de sequía durante el invierno; la temperatura media mensual oscila entre los 5 °C, con una temperatura máxima durante el verano de 16°C.

6.2.1 Procedimiento del muestreo

Los colectores fueron colocados en una construcción techada de seis contenedores localizada en lo alto de un cerro, bajo la lluvia del Golfo de México, el diseño experimental incluye tres muestreos conjuntos en el mismo sitio y la operación simultánea de los colectores durante un evento de neblina.

Los muestreos se llevaron a cabo durante campañas intensivas, el diseño para la colección del agua de nube y neblina fue tal que cada colección correspondía a cada evento de neblina, teniendo de este modo muestras de cada evento de periodos cortos.

Durante los episodios largos (de varias horas o días incluso), se tuvieron submuestras o fracciones colectadas en lugar de muestreos simples.

Debido a las diferentes características inherentes de los colectores se tienen diferentes muestreos a diferentes velocidades dadas las diferencias de colección, siendo el colector activo el más rápido en coleccionar muestras suficientemente grandes para su análisis químico.

Durante el muestreo se miden los parámetros meteorológicos principales como la velocidad y dirección del viento y la temperatura, estos parámetros se registran mediante una estación de monitoreo móvil, estos son importantes para establecer las adecuaciones de diseño y eficiencia del colector.

6.2.2 Descripción de los colectores de agua de nube y neblina empleados

Se emplearon dos tipos de colectores para el muestreo en Teziutlán, Puebla, dos colectores pasivos y otro más del tipo activo. Los colectores fueron diseñados con diferentes superficies de colección en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM; se probaron las diferentes superficies de captación con la finalidad de incorporar las modificaciones en materiales y geometría a nuevos colectores.

El primero de ellos fue un colector omnidireccional (OC) (figura 3a.), el cual se construyó basándose en el colector pasivo usado en otros países, comúnmente conocido como Colector de Cuerdas de Investigación Científica (ASRC, Atmospheric Science Research Center String Collector). Schemenauer (1986) describe totalmente este colector; consiste en una doble película de alambres exteriores en una estructura cilíndrica los alambres son idénticos a los empleados en el colector activo, su longitud total y área activa es de 258 m y 0.0646 m² respectivamente.

El otro colector pasivo es un colector de malla metálica (MMC, Metallic Mesh Collector). Este consiste en una superficie plana de 0.041 cm. de diámetro de alambre en un marco de polietileno en un tipo de "raqueta" similar al descrito por Hindman (1992), la longitud total del hilo de alambre es de 815.5 m, con un área efectiva de colección de 0.33 m². (figura 1).

El colector activo (CA), se construyó de acuerdo con lo establecido por Jacobs (1985); el diseño consiste en un ducto cuadrado de aspiración de aire a una velocidad de 3.5 m s⁻¹; las gotas de agua de nube y neblina se impactan en una malla de acero inoxidable de hilos de un diámetro de 0.025 cm colocada de manera vertical e inclinada 30° al flujo de aire, colocada en un marco de teflón entre dos varillas de polietileno conectado directamente a un recipiente de captación también de polietileno. La longitud total de los alambres es de 88.69 m dando un área de colección efectiva de 0.022 m² (figura 2).

6.2.3 Análisis químico

Las muestras captadas fueron analizadas en el laboratorio mediante Espectrometría de Absorción Atómica para Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, y Na⁺. Cromatografía Iónica para HCO³⁻, Cl⁻, NO³⁻ y SO⁴²⁻ y pH mediante el uso de un potenciómetro de electrodos de vidrio.

Los resultados de estos análisis se encuentran en las siguientes tablas:

Colector	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺
ASRC	17	6.0	11.0	7.5	1.0	14.0	12.0	6.0	10.0
CA	16.5	6	10.5	7.0	4.5	14.0	11.5	6.0	10.0

Tabla 6. Comparación de la composición iónica del agua de nube de dos colectores uno activo (CA) y otro pasivo (ASRC) (Noviembre, 1995).

En esta tabla no se observan diferencias entre la composición de las muestras de agua de nube y neblina entre los colectores activo y omnidireccional, excepto para el potasio.

Colector	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺
ASRC-MMC	5.99	5.81	4.60	7.25	8.78	4.84	2.76	8.25	2.05
CA	5.55	5.75	4.55	3.50	10.75	4.90	2.70	4.25	5.07

Tabla 7. Comparación de la composición iónica del agua de nube de dos colectores uno activo (CA) y otro pasivo (ASRC-MMC) (Enero, 1997).

En esta tabla se observan diferencias en la composición de las muestras entre los colectores activo y pasivo. Esto puede deberse simplemente a un gran número de muestras analizadas, sugiriendo que al tener un mayor número de muestras analizadas, las diferencias probablemente se incrementan.

No existe evidencia que muestre diferencias entre la composición química del agua colectada entre los dos tipos de colectores pasivos (ASRC-MMC) por lo que no se separan en la tabla.

La prueba realizada muestra diferencias para el sodio, el potasio y los iones de amonio. La concentración de iones amonio hace una diferencia sistemática entre el colector activo y el pasivo.

Las tablas 8 y 9, muestran la capacidad de colección de distintos colectores colocados en Teziutlán en diferentes días así como las condiciones meteorológicas del lugar en ese momento (velocidad media promedio del viento, temperatura, etcétera.).

Día	Hora	Tipo de colector	Volumen (mL)	Velocidad del viento (m/s)	T (°C)	diámetro de corte (µm)	CAL (gm ³)	CC (gm ³ h ⁻¹)
27	11:00-13:00	ASRC	77.4	0.48	11.44	1.158	0.35	399.07
27	15:45-18:15	ASRC	118.9	0.98	9.78	12.92	0.54	736.22
28	10:00-13:55	ASRC	224.7	0.61	10.18	10.21	0.40	888.08
28	14:00-16:35	ASRC	114.4	0.22	9.45	17.09	0.87	685.51
28	16:35-18:25	ASRC	66.3	0.09	8.60	26.74	1.74	557.28
28	10:00-13:55	Activo	203.6	0.61	10.18	3.94	0.16	2341.58
28	13:55-16:30	Activo	201.5	0.27	9.15	4.11	0.25	3403.72
28	16:30-18:18	Activo	127	0.10	8.66	4.20	0.25	3178.18

Tabla 8. Velocidad del viento, diámetro de corte, contenido de agua líquida (CAL) y capacidad de colección (CC) para diferentes colectores colocados en Teziutlán, Puebla. Noviembre, 1995).

Día	Hora	Tipo de colector	Volumen (mL)	Velocidad del viento (m/s)	T (°C)	diámetro de corte (µm)	CAL (gm ³)	CC (gm ³ h ⁻¹)
18	22:55-00:25	Activo	39.1	1.32	11.63	3.64	0.07	1171.17
19	00:25-01:35	Activo	69.5	1.29	11.30	3.66	0.16	2683.40
19	01:35-06:55	Activo	487	1.10	8.98	3.72	0.25	4113.18
19	07:00-07:50	Activo	36.5	0.90	7.80	3.80	0.12	1972.97
19	07:50-08:35	Activo	45	0.90	7.85	3.80	0.12	2702.70
19	08:35-09:10	Activo	59.9	1.10	7.80	3.71	0.28	4625.48
19	10:00-11:00	Activo	62.5	1.30	7.57	3.63	0.16	2815.32
19	11:52-13:15	Activo	24.4	0.90	7.77	3.80	0.05	794.53
19	13:15-15:00	Activo	136.9	1.06	7.74	3.73	0.21	3523.81
19	15:00-18:42	Activo	103	1.01	6.84	3.74	0.08	1253.96
18	22:30-00:35	ASRC	238	1.24	11.88	7.19	0.40	1768.42
19	00:35-01:35	ASRC	207.8	1.29	11.30	7.04	0.69	3216.72
19	01:35-07:00	ASRC	981.8	1.10	8.98	7.61	0.71	2805.81
19	07:00-07:50	ASRC	83.2	0.90	7.80	8.39	0.48	1545.51
19	07:50-08:35	ASRC	163.4	0.90	7.85	8.40	1.04	3372.55
19	08:35-10:00	ASRC	385.2	1.33	7.70	6.92	0.88	4209.07
19	10:00-11:00	ASRC	181.4	1.30	7.57	6.98	0.60	2808.05
19	11:52-13:23	ASRC	73.9	0.77	7.78	9.05	0.27	754.26
19	13:23-15:00	ASRC	174.7	1.06	7.74	7.74	0.44	1672.78
19	15:00-16:55	ASRC	196.2	1.08	7.08	7.66	0.41	1584.60
18	22:30-00:40	MMC	525.4	1.24	11.88	9.21	0.16	725.16
19	00:40-01:40	MMC	516.7	1.29	11.30	9.02	0.33	1545.16
19	01:40-07:10	MMC	2216.9	1.10	8.98	9.74	0.30	1205.36
19	07:15-07:55	MMC	106.7	0.90	7.80	10.75	0.15	478.62
19	07:55-08:40	MMC	248.4	0.90	7.85	10.75	0.31	990.43
19	08:40-10:05	MMC	575.8	1.33	7.70	8.86	0.25	1215.45
19	10:05-11:00	MMC	234.7	1.30	7.57	8.94	0.16	465.66
19	11:52-13:23	MMC	40.8	0.77	7.78	11.59	0.03	80.45
19	13:23-15:05	MMC	190.1	1.06	7.74	9.91	0.09	334.40
19	15:05-16:55	MMC	219.1	1.08	7.08	9.80	0.09	357.38

Tabla 9. Velocidad del viento, diámetro de corte, contenido de agua líquida (CAL) y capacidad de colección (CC) para diferentes colectores colocados en Teziutlán, Puebla. Enero, 1997).

6.2.3 Capacidad de colección

Para el cálculo del contenido líquido de agua (CLA) (LWA, Liquid Water Content), en la nube es necesario en primer término calcular el diámetro de corte $[d_{50}]$ (Hindman et al, 1992), empleando la siguiente expresión.

$$d_{50} = \left[0.9 \left(\frac{\rho U}{18\eta d_c} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \times 10^4$$

Donde:

d_{50} = Diámetro de corte en μm .

ρ = Factor de corrección de escurrimiento, cerca de 1 para gotas de nube.

ρ = Densidad de las gotas de lluvia $\approx 1.0 \text{ g cm}^{-3}$.

U = Velocidad del viento en cm s^{-1} .

η = Viscosidad dinámica del aire ($=2.48 \times 10^{-6} \times T^{0.754}$; en g cm^{-1} , T en K).

d_c = Diámetro del alambre en cm.

Para gotas más grandes del diámetro de corte el contenido de agua líquida se calcula para los parámetros del diseño de los colectores (Hindman et al, 1992), mediante la ecuación.

$$LWC = \frac{v}{UA t}$$

Donde:

LWC = Contenido de agua líquida en la nube, en g cm^{-3}

v = Volumen de muestra de agua de lluvia en cm^3

U = Velocidad del viento en m s^{-1}

A = Área efectiva de colección en m^2

t = Tiempo de muestreo en s

Para el colector activo.

$$U = \hat{U} + 3.5$$

Donde:

\hat{U} = Velocidad del viento en $m s^{-1}$

3.5 es la velocidad en $m s^{-1}$ para el aire que es atraído dentro del colector a la superficie de colección en ambientes de baja velocidad del viento, este factor no es necesario ya que la velocidad del viento U , puede considerarse como $3.5 m s^{-1}$.

Cuando la velocidad del viento es casi cero, se emplea la ecuación de corrección siguiente con el fin de tener valores más reales de la colección.

$$CC = \frac{v}{At}$$

Donde:

CC = Capacidad de colección en $g m^{-2} h^{-1}$.

v = Volumen de muestra de agua de lluvia en cm^3

A = Área efectiva de colección en m^2

t = Tiempo en horas.

La capacidad de colección no es un sinónimo de la eficiencia de colección ya que la eficiencia de colección está relacionada con el radio de las gotas de agua de nube y neblina colectadas del total del líquido colectado.

En general el colector activo tiene una mayor capacidad de colección de gotas de nube y neblina esto debido a la capacidad de succión del aire lo que incrementa considerablemente la velocidad media promedio del viento.

El colector de malla metálica desvía el flujo de aire de manera que la nube no cruza la malla de manera perpendicular lo que provoca una disminución en la eficiencia de colección.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

El estudio de la química de la atmósfera es de vital importancia debido a las reacciones que en ella tienen lugar que son potencialmente perjudiciales para la vida.

La capacidad autoregenerativa de la atmósfera se ve cada vez más limitada debido a la influencia en mayor grado de la actividad humana. Las emisiones de gases de invernadero, los clorofluorocarbonos son cada vez mayores.

El estudio de la atmósfera presenta varias complicaciones tanto en el muestreo como en análisis de las muestras. En primer lugar resulta difícil muestrear las capas altas de la atmósfera donde se llevan a cabo las reacciones importantes (reacciones fotoquímicas) y en segundo lugar la baja concentración relativa que tienen los componentes que se desea muestrear.

Los colectores de agua de nube y neblina facilitan de alguna manera el muestreo ya que permiten condensar en un mililitro de agua o menos a las partículas existentes en un m^3 de aire lo que implica un análisis más detallado de la atmósfera.

Los primeros trabajos realizados con el fin de analizar la química de la atmósfera datan de los años setentas. Más recientemente se le ha dado además el empleo de medios para coleccionar y abastecer de agua potable a pequeñas poblaciones.

El primer desarrollo de colectores con este fin se encuentra en Chile, en el cerro llamado "El tofo"; este sistema de colección con un área de 2,400 m^2 abastece a 3000 habitantes del poblado llamado "Chungungo" con un abastecimiento de 30 litros por persona por día, teniendo una producción diaria cercana a los 100,000 litros diarios.

El costo de construcción y mantenimiento de esta obra esta calculada cercana a US\$ 377 por cada 48 m^2 , por lo que resulta viable para esta comunidad.

Un colector es simplemente un aparato diseñado con el fin de presentar una malla de hilos perpendicular al movimiento de la nube o neblina y que produce una condensación de gotas de agua sobre estos hilos. Se han desarrollado dos tipos de colectores: el colector pasivo donde la nube o neblina se impacta con la malla colectora impulsada solamente por el viento, y el

colector activo donde la nube o neblina es succionada mediante un sistema de aspiración sobre la malla de colección.

Las nubes son agregaciones visibles de agua o hielo, estas se clasifican de acuerdo a su altura en tres grupos: nubes altas, nubes medias y nubes bajas; y de acuerdo a su forma en diez subgrupos.

Para el empleo de los colectores se requieren de nubes bajas, estas nubes tienen una altura por debajo de los 2 Km. Las nubes bajas son responsables de la neblina ya que logran descender hasta el suelo o impactar sobre cerros o montañas de mediana altura.

Dentro de la nube se llevan a cabo procesos fisicoquímicos que determinan el tamaño y la química de las gotas. Para formar una gota de agua de nube es necesario un núcleo sólido de condensación llamado en términos generales "aerosol".

La Nucleación es el proceso por el cual se forman las gotas a partir del núcleo sólido. Una vez formada la gota, continúa creciendo por un proceso llamado condensación, al tener la gota un porcentaje de saturación de humedad mayor al del vapor de agua. Las gotas de este modo se pueden unir a otras por fusión lo que trae como consecuencia la posible precipitación de la gota.

A medida que se incrementa su tamaño, la gota está cada vez más sujeta a la acción de la gravedad o fuerza hacia abajo que hasta ese momento se encuentra en equilibrio con la fuerza de fricción del aire; al precipitarse la gota, tiende a aumentar más su tamaño al chocar con otras gotas.

Los estudios experimentales realizados empleando diferentes tipos y geometrías de colectores han demostrado que existen diferencias sustanciales entre ellos y que dependiendo del propósito o fin de las muestras colectadas se podría elegir entre un tipo y geometría de colector.

La química del agua colectada se modifica dependiendo del tipo de colector, esto debido a las reacciones que ocurren en las gotas más grandes al incrementarse la solubilidad. Un colector activo tiene un potencial de captación superior al colector pasivo logrando así coleccionar muestras más rápidamente y con esto reducir la posibilidad de contaminación de las muestras con agentes extraños como polvo u otras partículas.

La concentración de los aerosoles es diferente en cada colector esto debido al tamaño de gota captado, teniendo una mayor concentración de SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ para gotas pequeñas y mayor concentración de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} para gotas grandes.

El tamaño de la gota colectada depende del diámetro del cilindro o hilo de la malla del colector, variando de este modo la química del agua de nube o neblina recolectada. Los cilindros pequeños colectan gotas de agua pequeñas de alrededor de $3\mu\text{m}$ y los cilindros grandes colectan las gotas más grandes.

Se encontró que existen diferencias en la química del agua entre los distintos tipos de colectores debido básicamente a la capacidad de captación. Sin embargo no se ha encontrado diferencias significativas entre las distintas geometrías del colector pasivo por lo que este factor solo altera la cantidad de agua líquida captada. El colector omnidireccional muestra una mayor capacidad de colección que la que observa el colector de malla esto se debe a la menor sensibilidad que presenta el colector omnidireccional a los cambios en la dirección del viento. El colector de malla es muy sensible al cambio en la dirección del viento lo que disminuye considerablemente su capacidad de colección.

La correcta elección del tipo y geometría de un colector en conclusión depende principalmente del uso que se pretenda dar al colector como instrumento de análisis o como medio de abastecimiento de agua y las necesidades del estudio.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFIA

Baez A. P., Belmont R.D., Azpra E., Torres M.B. and Padilla H.G. (1997). Cloudwater and Precipitation Chemistry at Popocatepetl Volcano, Journal of Environment Quality, **26**, 253-258.

Baez A. P., Belmont R.D. (1996). Chemical composition of precipitation at two sampling sites in México: a 7-year study. Atmospheric Environment, **31** 915-925.

Boutron C., Martin S and Lorius C., (1980). Trace constituents in cloud water, rainwater and aerosol samples collected near the west coast of Indian during the southwest monsoon. Atmospheric Environment, **14** 1-6.

Botger A., Gravenhorst G. and Ehhalt D.H. Deposition Rates of Ammonium and Nitrate in the Northern Hemisphere. Atmospheric Aerosol and Nuclei, 287.

Buat P. Menard and Arnold M. Heavy Metals Chemistry and Atmospheric Emissions of Aerosols from Etna Volcano, Atmospheric Aerosol and Nuclei, 294.

Collett, J.Jr., Daude B., Hoffman R.M. (1990). The Chemical composition of intercepted cloudwater in the Sierra Nevada, Atmospheric Environment, **24** 259-272.

Collett, J.Jr., Daude B., Hoffman R.M. (1990). Cloud chemistry: Dependence on drop size and relationship to precipitation chemistry, Atmospheric Environment, **27**, 33-42.

Cooney Y. R. (1980) Vapour cloud dispersion and evaporation of volatile liquids in atmospheric wind fields I and II., Atmospheric Environment, **14**.

Dikaikos J. G., Tsitouris C. G. (1989). Rainwater composition in athens, Greece. Atmospheric environment, **24B**, 171-176.

Federic C. (1990). An intercomparison of continuous flow, and automatically segmenting rainwater collection method for determining precipitation conductivity and pH, Atmospheric Environment, 24, 2299-2306.

Figueruelo J. E. y Dávila M. (2001). Química física del medio ambiente. México: Reverté.

Fuzzi, Gorzi S., Nardini G. and Facchini M.C. (1988). Heterogeneous processes in the Po Valley radiation fog. Geophys. 23, 11414-11151.

Hindman E. (1992). Collecting supercooled cloud droplets as a function of droplet size, Journal of atmospheric and oceanic technology, 9, 337-353.

Jacob J.D., Waldman M.J., Haggi M., Hoffmann R.M. and Flagan C.R. (1985). Instrument to collect fog water for analysis, Rev. Sci. Instrum. 58, 1291-1293.

Jaenicke R. (1979). The importance of atmospheric ozone and hydrogen peroxide in oxidising sulphur dioxide in cloud and rainwater. Atmospheric Environment, 13 1-6.

Joos F. (1991). A field study on chemistry, S(IV) oxidation rates and vertical transport during fog conditions, Atmospheric Environment, 25A, 217-230.

Kassner, I. (1989). Satellite cloud investigations; Cloud droplet size, optical Thickness of clouds. Meteorologic and Geostrophysical Abs. 26 438.

Khemni L. T., Mominn G.A. et al. Chemical Compositions of Cloud Water at a Hill Station, Atmospheric Aerosol and Nuclei, 233.

Lovett M., Reiners W.A., and Olson R.K.. (1982). Cloud deposition in subalpine balsam fir forest. Hydrological and chemical inputs, Science 218, 1303-1304.

McGreevy G. (1987). Liquid water content of clouds; Cloud droplet deposition, Washington State. Meteorologic and Geostrophysical Abs., 46 115.

Mertell E. A. (1987). Liquid water content of cloud estimation from satellite microwave radiation measurements, Meteorologic and Geostrophysical Abs, 46 383.

Moore S. y Word. (1980). El mundo de la química, conceptos y aplicaciones. (2ª Ed.). México: Pearson Educación.

Nishioka K. (1993). Cloud-radiation relationships; Cloud-climate relationships. Meteorologic and Geostrophysical Abs., 19 159.

Padilla H., Belmont R.D., Azpra E, Torres M.B. and Baez A. P. (1996). A field comparison of cloud water collectors in mountainous region under low wind speed conditions in Eastern Mexico, Atmosphere, 189- 199.

Rice H., (1992). Cloud Classification. Meteorologic and Geostrophysical Abs, 17 128.

Roddy A.F and Scully J. G, A satellite view of the synoptic-scale organization of cloud properties in mid latitude and tropical circulation system, Meteorologic and Geostrophysical Abs., 46 p. 377-415.

Roddy A.F and Scully J. G., Uncertain in cloud optical depth estimates from satellite radiance. Meteorologic and Geostrophysical Abs., 46 318.

Rogers R. R. (1977). Física de las nubes. España: Reverté.

Ronald S. and Dinkar K. (1978). Geochemical implications of summers monsoonal rainwater composition over India, Journal of applied meteorology, 17, 390-396.

Saxena W.R., and Lin N.H. (1988). Relative importance of dry, wet, and cloud capture mechanisms for acidic deposition, 189-194 In R.K.M Jayanty and S. Hochheiser (ed.) Measurements of toxic and related air pollutants. Air pollute. Control Assoc., Pittsburgh.

Schnell R. C. Modelling of nighttimes nitrogen and sulphur chemistry in size resolved droplet of organic cloud, Meteorologic and Geostrophysical Abs, 46 , 386-412.

Wagner P. E and Pohl F. G., (1980). Measurements of hydrogen peroxide in rain water. Atmospheric Environments, 14 1-6.

Yuen T.S., Harrison and H, Charlson R.J. Sensitivity of Sulphate Aerosol Cycles to Meteorological and Chemical Processes. Atmospheric Aerosol and Nuclei. 274.