

# LA ESTÁTICA EN EL UNIVERSO QUE NOS RODEA: LA NATURALEZA

## Prefacio

En los capítulos anteriores hemos visto los principios de la estática y sus aplicaciones en las diferentes instancias de la vida cotidiana. En este capítulo nos aproximamos a la estática en la naturaleza a través de su aplicación en el estudio de la estabilidad de los árboles.

*Temas que abordamos en este capítulo.*

1. La diversidad en las plantas: las plantas en su reino - Morfología de las plantas - Tejidos mecánicos o de sostén - Morfología y anatomía del cormo - El árbol - Cortinas y barreras forestales - Los árboles en los medios urbanos.
2. Estática de los árboles: una aproximación a la estática de árboles - Estabilidad del arbolado - Una aproximación matemática de la estabilidad del arbolado forestal - Momentos críticos de fractura - Algunas relaciones entre factores ambientales y la caída de los árboles - Diagnóstico de riesgos - Métodos para la identificación de riesgos en árboles urbanos.
3. Casos con historia: el Ceibo jujeño de Alvear (*Erythrina falcata* Benth) - El Drago (*Dracaena draco*) - Riesgo de caída del Drago - Algunas verificaciones *in situ* y primeros resultados.

Inicialmente, se efectúa una descripción muy sintética de las plantas en general. En este desarrollo vemos que todos los vegetales en el curso de su filogenia han adquirido particularidades estructurales que le permiten vivir bajo determinadas condiciones externas.

El reino vegetal se puede estudiar desde muy distintos puntos de vista: por un lado el reconocimiento de estructuras y formas y por el otro, el análisis de procesos vitales, de funciones y de fenómenos de desarrollo.

En las temáticas vinculadas a la estática de los árboles podemos observar que estas plantas, como estructuras físicas vivas, están sujetas a factores que condicionan su vitalidad y a factores que afectan su estabilidad.

El desarrollo de los contenidos permite comprender la importancia de la relación del árbol como sistema en equilibrio dinámico, a nivel fisiológico, mecánico y estructural, y también del equilibrio con el ambiente que lo rodea.

Nos introducimos en...

## 4.1.- La diversidad en las plantas

### 4.1.1.- Las plantas en su reino

El mundo actual presenta una gran diversidad de seres vivos. Entre esas formas vivas, los vegetales constituyen un reino sumamente diverso y versátil que cuenta con innumerables adaptaciones a los medios en que se encuentra.

Un vegetal es un ser vivo capaz de elaborar materia orgánica a partir de sustancias como el dióxido de carbono y el agua, impulsado por la energía lumínica. Como subproducto de esta reacción se libera oxígeno, que es utilizado por todos los organismos de respiración aeróbica durante los procesos de oxidación biológica.

Las plantas son organismos fotosintéticos pluricelulares de reproducción sexual que evolucionaron a partir de las algas verdes y presentan enormes diferencias que se expresan en la diversidad de sus formas y funciones.

Para clasificar las plantas se tiene en cuenta, entre otros, la presencia de vasos conductores y su disposición en el tallo, y la presencia o ausencia de flores.

En función de esto se las divide en tres grandes grupos: las **briófitas** son plantas sin vasos conductores (los musgos); las **pteridófitas** son plantas vasculares sin flores (los helechos), y las **espermatófitas** son plantas vasculares, con flores y semillas. Este grupo se divide en gimnospermas y angiospermas, y estas últimas se subdividen en dicotiledóneas y monocotiledóneas.

#### Reino Plantas

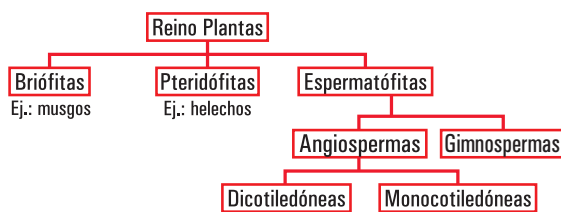


Figura 4.1. Reino plantas

Los biólogos, a través del tiempo han considerado diferentes modelos para clasificar las diferentes formas de vida. La primera organización de las entidades de la naturaleza, atribuida a Aristóteles, se realizó en los siguientes reinos: animal, vegetal y mineral.

Posteriormente, Carlos Linneo diseña un sistema con tres reinos, que los subdividía en clases y en órdenes. Estos en géneros y en especies.

En 1969, la clasificación se realizó en cinco reinos: Animal, Plantas, Hongos, Protistas y Monera.

En 1977, se dividió el Reino Monera en Archeobacterias y Eubacterias lo que resultó en un sistema de clasificación de seis reinos.

Una nueva organización se presenta en 1990, considerando un Sistema de Clasificación de tres dominios: Eukarya, Bacteria, Archaea.

Las briófitas son los vegetales que primero conquistaron el medio terrestre y que al carecer de vasos conductores y **estructura típica del cormo** (raíz, tallo y hojas) viven en ambientes húmedos y sombríos.

Las pteridófitas (helechos) forman un grupo incluido dentro de las cormófitas, pues tiene tejidos diferenciados. Han desarrollado una serie de adaptaciones que les permiten una mejor adaptación al medio terrestre.

Los vegetales con semillas pertenecen al grupo de las plantas vasculares, como es el caso de las espermatófitas.

Las *espermatófitas*, cuyo nombre científico proviene del griego *sperma*, que significa *semilla*, y *fiton* que significa *planta*, se traduce como *plantas con semilla*.



En éstas encontramos las que poseen semillas desnudas (sin estar recubierta por el fruto) gimnospermas, y las que tienen semillas cubiertas (encerradas por los frutos) las angiospermas.

a) *Angiosperma* (del griego *aggcion*, vaso, y *sperma*, semilla):

los miembros de esta división constituyen la forma de vida vegetal dominante y son la fuente de la mayor parte de los alimentos en que el ser humano y otros mamíferos basan su subsistencia, así como de muchas materias primas y productos naturales.

Pertenecen a este grupo casi todas las plantas arbustivas y herbáceas, la mayor parte de los árboles, salvo pinos y otras coníferas, y plantas más especializadas, como suculentas, epífitas y acuáticas.

*Las Angiospermas presentan dos clases:*

*Liliosida* (anteriormente denominada monocotiledóneas)

*Magnoliopsida* (anteriormente denominada dicotiledóneas)

b) *Gimnosperma* (del griego, *gymno*, desnudo, y *sperma*, semilla):

son plantas leñosas, casi siempre arbóreas, a veces arbustivas o de biotipo palmeroides.

*El término gimnospermas es aún utilizado para referirse a los siguientes cuatro taxones de plantas:*

*Coniferophyta* - las coníferas

*Ginkgophyta* - con una sola especie viviente, *Ginkgo biloba*

*Cycadophyta* - las cícadas

*Gnetophyta* - con tres familias, cada una con un sólo género, *Gnetum*, *Ephedra*, *Welwitschia*.

## 4.1.2.- Morfología de las plantas

El reino vegetal se estudia desde muy distintos puntos de vista: desde las moléculas y las células, pasando por los tejidos y los órganos, hasta los individuos, las poblaciones y las comunidades vegetales. En general, todas esas direcciones de estudio se basan en el análisis comparativo de los fenómenos particulares y de su variabilidad, para llegar a una generalización y al reconocimiento de las relaciones regulares que unen dichos fenómenos entre sí y a los cuales siempre deben asociarse los **métodos estático y dinámico**: por un lado **reconocimiento e interpretación de estructuras y formas**, por el otro, análisis de procesos vitales, de funciones y de fenómenos de desarrollo.

La **Morfología botánica**, es la teoría general de la **estructura y forma de las plantas**, e incluye la Citología y la Histología.

Sintetizando podemos concluir que la *Citología* y la *Histología* juntas son necesarias para comprender la Anatomía de las plantas, o sea, su constitución interna y la *Organografía* o *Morfología*, en sentido estricto, tratan de la forma externa.

### 4.1.2.1.- Los niveles morfológicos de organización

Según la altura de organización morfológica se pueden distinguir tres niveles: los *protófitos*, los *talófitos* y los *cormófitos*.

Se consideran *protófitos* todos los vegetales unicelulares, así como los que están formados por agregados de células, apenas diferenciadas en el sentido de una división de trabajo.

Los *talófitos*, son vegetales pluricelulares, diferenciados a base de una división del trabajo, por ejemplo, distintas estirpes de algas y hongos de organización superior.

Los *cormófitos*, se caracterizan por la formación de tejidos diferenciados que complementan la función del tejido fundamental o parénquima, en distintas misiones, por ejemplo, la protección superficial, la toma de agua, la conducción y cesión de la misma, la función de sostén.

Como carácter diferencial externo más importante respecto a los talófitos, se pueden citar la diferenciación del cuerpo vegetativo en raíz, tallo y hojas.

Los tejidos en los cormófitos, son sistemas de tejidos, conjuntos morfológicos-fisiológicos, compuestos por distintos tipos de células. Desde el punto de vista ontogenético pueden reunirse en dos grandes grupos: los tejidos embrionales o meristemas y los tejidos definitivos o adultos.

### 4.1.3.- Tejidos mecánicos o de sostén

En los tejidos adultos encontramos los **tejidos mecánicos o de sostén**. La mayoría de las plantas deben su solidez y elasticidad a la posesión de tejidos mecánicos especiales, formados por células dispuestas en masa compacta y con la membrana fuertemente engrosada en parte (colénquima) o en su totalidad (esclerénquima).<sup>1</sup>

El **colénquima**, tejido capaz de **crecer y dilatarse** fuertemente, está presente en las partes vegetales que todavía manifiestan crecimiento activo.

El **esclerénquima**, según tenga que resistir a la **compresión** o la **tracción**, consta de diferentes **células pétreas** de gruesa pared o **fibras de esclerénquima**, alargadas y de membrana más o menos engrosada

*La resistencia a la compresión de la dura y quebradiza cáscara de nuez, se debe en general, a los tejidos de células pétreas.*

*La facultad de curvarse de los tallos y de muchas hojas, la rigidez columnar de los troncos, así como la resistencia a la tracción propia de las raíces, hay que atribuirles a los tejidos de fibras esclerenquimáticas.*

Las células y fibras esclerenquimáticas, se forman aisladas o en grupos y, generalmente, se disponen en cordones, bandas, vainas o revestimientos carentes de espacios intercelulares, que se ordenan de modo que puedan desempeñar su cometido de comunicar a los órganos la necesaria resistencia con ayuda de material de sostén.

#### 4.1.3.1.- Ordenación de los elementos de sostén

La ordenación de los elementos mecánicos de colénquima y esclerénquima en los órganos del vástago se observan en la **figura 4.2.** en F y G.

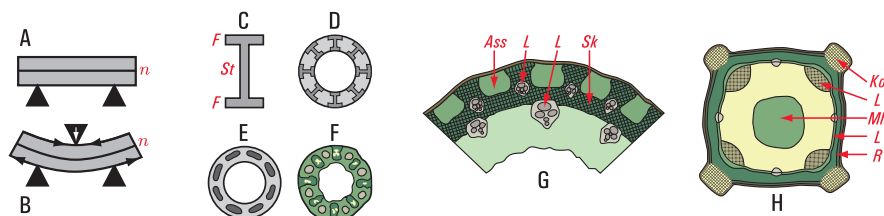
Las funciones que realizan estos tejidos se pueden comprender mejor con el siguiente ejemplo:

En la construcción con hormigón armado, el armazón de las barras de acero se fija dentro de la masa de relleno en los lugares expuestos a mayor acción mecánica (**figura 4.2., D**). En las plantas la ordenación de colénquima y esclerénquima se pueden comparar a este sistema de construcción (**figura 4.2., F, G**) y en lugar de la masa de relleno encontramos el parénquima, que se caracteriza por sus propiedades elásticas.

Asimismo, el peligro de rotura de los elementos estructurales es mayor cuanto más periférico o alejados de la fibra neutra se hallan. Entonces, la disposición de los elementos mecánicos en aristas salientes puede ser favorable para una mayor resistencia a la flexión (**figura 4.2., H**).

<sup>1</sup> E. Strasburger, F. Noll, H. Schenck y A. F. W. Schimper. 1974. *Tratado de botánica*. Editorial Marín. Barcelona. España.

## Principios de ordenación de los tejidos mecánicos



Principios de ordenación de los tejidos mecánicos. A y B efectos de curvatura en una viga: tracción, de lado convexo, acortamiento (compresión) del cóncavo; la «fibra neutra» ( $n$ ) únicamente se curva, pero no sufre ningún cambio de longitud. C soporte en doble T ( $St$  nervio,  $F$  alas). D cilindro hueco con las paredes reforzadas por soportes en doble T. E chimenea de fábrica construida en hormigón armado: la armadura se limita a ocho pares de varillas de hierro. F sección transversal del tallo de *Trichophorum germanicum*; la posición de los refuerzos y de los huecos es exactamente la misma que en E. G sección transversal del tallo de *Molinia coerulea* (poácea), ( $Sk$  esclerenquima,  $L$  haz conductor,  $Ass$  parénquima asimilador). H sección transversal del tallo de *Lamium album*,  $Ko$  las cuatro aristas de colénquima que protegen el tallo cuadrangular,  $L$  haces conductores,  $R$  parénquima cortical,  $Mh$  cavidad medular. (E y F según Rasdorski; G x 25, H x 10).

(Fuente: E. Strasburger, 1974)

Figura 4.2. Principios de ordenación de los tejidos mecánicos

## 4.1.4.- Morfología y anatomía del cormo

Los órganos funcionales básicos que forman parte de todas las plantas superiores terrestres son: un vástago orientado hacia la luz, provisto de órganos asimiladores planos del mayor tamaño posible, y un sistema que fije la planta en la superficie o en el interior del sustrato, órgano que va a servir, a la vez, para la absorción del agua (Figura 4.3).

### 4.1.4.1.- El vástago

El vástago consta del *tallo*, que es el eje del mismo y, en su forma típica, se presenta como un cuerpo cilíndrico con aspecto de varilla, y de *hojas*, que son apéndices laterales del eje que de ordinario presentan crecimiento limitado. La ramificación del vástago puede producirse de dos maneras: por bifurcación de un eje madre en dos ejes hijos o por formación lateral de ramas hijas en un eje madre que prosigue su desarrollo, es decir, por *ramificación lateral*. Cada sistema de ramas tiene su aspecto propio, su hábito, determinado por: el número de los órdenes de ejes laterales que se desarrollan (grado de ramificación), la disposición de las ramas laterales en los ejes madres, la intensidad de crecimiento y la orientación de las ramas laterales. Muchos de estos vegetales, de larga vida aumentan la solidez de los tallos y raíces, mediante la formación de grandes cantidades de **tejidos de sostén fuertemente lignificados** y, por ello, rígida y dura. Del tallo primario blando resultan fuertes troncos y ramas. Estos vegetales leñosos se denominan **árboles o arbustos**, según la simetría de su ramificación.

### Esquema general de los órganos de una planta A: Vástago — B: Raíz

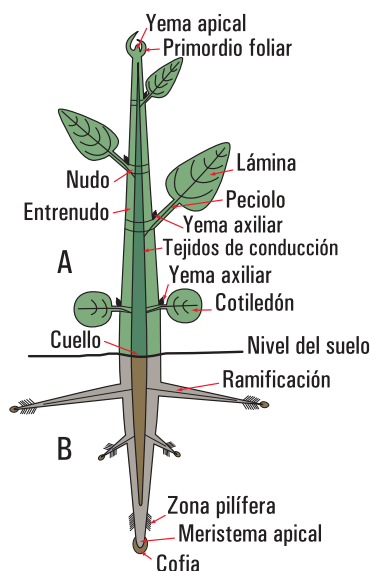


Figura 4.3. Partes de las plantas



#### 4.1.4.2.- Las hojas

Son primordios foliares que aparecen en el ápice caulinar a manera de protuberancias laterales. A diferencia del tallo, con muy raras excepciones, poseen crecimiento limitado.

En casi todos los vegetales leñosos las hojas tienen una vida mucho más corta que los tallos que las han producido. Las plantas cuyas hojas vegetativas se conservan durante varios períodos de vegetación se denominan *perennifolias* o de *hoja persistente*, en oposición a las *caducifolias* o de *hoja caediza*, en las que las hojas sólo son activas durante un único período vegetativo.

#### 4.1.4.3.- La raíz

Las raíces son órganos que crecen, por lo general, por debajo del nivel del suelo (raíces epígeas) y hacia la profundidad del perfil, aunque unas pocas especies presentan raíces aéreas. Pueden tener o no ramificaciones y carecen de hojas, nudos y entrenudos, presentan simetría radial y al principio tienen aspecto filamentosos.

Las raíces sirven para fijar la planta al suelo (raíces fijadoras) tomar de éste, agua y sales, y transportarlas al sistema caulinar (raíces nutricias), y también sirven para el almacenamiento de productos de reserva (raíces reservantes). Por lo general, realizan simultáneamente varias de dichas funciones.

### 4.1.5.- El árbol

El árbol<sup>2</sup> es una planta leñosa que se caracteriza por poseer un tallo principal erguido llamado tronco o fuste, que crece ascendentemente y se ramifica en altura.

Cada árbol se sostiene en su tronco y termina en una copa; ésta se forma por las ramas que nacen del tronco y que se subdividen en ramas más finas, donde nacen las hojas.

Cuando no existen ramas –como en el caso de las palmeras, que sólo lucen una corona de grandes hojas–, no se habla de tronco sino de estipe.

#### 4.1.5.1.- Tamaño de los árboles

Se refiere a las dimensiones aproximadas que adquiere un árbol cuando es adulto. Por ejemplo un plátano (*Platanus acerifolia*) a los 15 años puede alcanzar 20 m de alto y 10 m de ancho en la copa. Los siguientes datos de alto y de ancho permiten clasificar a los árboles en tres categorías: pequeños, medianos y grandes.

Tipo	Altura	Anchura
PEQUEÑOS	Menos de 6 m	Menos de 4 m
MEDIANOS	Entre 6 y 15 m	Entre 4 y 6 m
GRANDES	Más de 15 m	Más de 6 m

#### 4.1.5.2.- Principales formas de árboles

Se distinguen tres categorías principales: los llorones, los erguidos, y los de copa en forma de bola más o menos aplastada.

<sup>2</sup> La palabra *tree* (árbol en inglés) deriva del sánscrito *deru* que significa firme o sólido.

El árbol es una planta perenne, de tronco lignificado, y elevado, que se ramifica a cierta altura del suelo. Fuente RAE.



Figura 4.4. La forma de los árboles

#### 4.1.5.3.- Funciones de los árboles

Son muchas las funciones que cumplen las plantas y en particular los árboles, dentro de ellas, encontramos que albergan y protegen a muchas especies de animales y plantas. Las raíces de los árboles protegen los suelos, mientras que las copas, impiden la erosión que producen los fuertes vientos, distribuyendo las precipitaciones de manera lenta y uniforme, para no dañarlos. Evitan inundaciones. Contribuyen al mejoramiento del clima, moderador de los efectos del sol, del viento y la lluvia, purificación del aire, etc.

**A. Los árboles fuera del bosque:** la FAO<sup>3</sup> ha definido la categoría de *árboles fuera del bosque* con referencia a árboles y sistemas arbóreos que ocupan tierras distintas de las definidas como *bosques y otras tierras boscosas*.

Los árboles fuera del bosque (AFB o TOF, por sus siglas en inglés Trees Outside Forest) incluyen entre otros a árboles en tierras agrícolas, urbanas y periurbanas: árboles a lo largo de la infraestructura humana como carreteras, canales, al margen de ríos o riachuelos, dentro del paisaje agrícola; árboles

<sup>3</sup> FAO. 2002. *Los árboles fuera del bosque: hacia una mejor consideración*. Guía FAO Conservación, 35. FAO. Roma.

en galería; árboles en parques y huertos; y también árboles en tierras naturales donde la cobertura arbórea es tan escasa que la vegetación no cumple con la definición de bosque.

Entre otras características, los árboles fuera del bosque satisfacen muchas necesidades familiares y están integrados en las estrategias de producción, consumo y obtención de rentas de las poblaciones. Proporcionan productos de primera importancia a nivel alimentario, tanto para el hombre como para el ganado (frutos, semillas, nueces, forraje, etc.) o no alimentario (farmacopea, madera de construcción, de trituración, de leña y para uso doméstico, fibras, hojas, etc.).

Algunos productos y servicios que brindan los árboles como aporte potencial para satisfacer las necesidades humanas básicas<sup>4</sup>.

- **Alimentos humanos cosechados de los árboles** (frutas, nueces, hojas, aceites, hongos, etc.).
- **Alimentos para animales** (hojas, frutas, nueces, vainas, corteza, raíces, madera).
- **Fertilizantes** (producto de las podas, de la hojarasca, de la muerte de las raíces).
- **Aportes a la condición nutricional de los cultivos mediante:**
  - a) fijación de nitrógeno;
  - b) acceso a un mayor volumen de nutrientes de los suelos por medio de los árboles de raíces profundas;
  - c) mejor disponibilidad de los nutrientes y materia orgánica.
- **Conservación del suelo y del agua**, regulan la escorrentía y erosión, ayudan en el mejoramiento del drenaje y en el control de inundaciones.
- **Mejoramiento del microclima** asociado con la colocación de los árboles en tierras de cultivo y de pastoreo (barreras de protección, cortavientos, árboles de sombra).
- **Energía:** leña, carbón de leña, astillas, aserrín, briquetas, etc.
- **Materiales de construcción:** palos, postes, tablones, madera aserrada, madera elaborada, techos de material vegetal, madera para pisos, durmientes, etc.

Además, los árboles fuera del bosque, al igual que los árboles de los sistemas forestales, prestan múltiples servicios directos (calidad del medio ambiente, conservación de los ecosistemas, sombra, etc.) e indirectos, como la creación de empleo, el desarrollo de sectores industriales y artesanales.

**B. El árbol en áreas boscosas.** En áreas de bosques, la bóveda de hojas la copa de los árboles, intercepta y redistribuye gradualmente la precipitación, que de otro modo podría causar inundaciones y erosión. Una parte de la precipitación fluye por la corteza de los troncos, el resto se filtra a través de las ramas y el follaje.

Esa distribución más lenta y poco uniforme de la lluvia asegura que el suelo y el agua no sean arrasados de forma inmediata. Además, las raíces de los árboles y las otras plantas sujetan el suelo e impiden inundaciones y el enturbamiento de ríos y arroyos. Los bosques también pueden aumentar la capacidad de la tierra para capturar y almacenar reservas de agua y mantener un flujo constante de agua en ríos y arroyos en tiempos de fuertes precipitaciones o sequías.

*Los bosques fijan 2,5 toneladas de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) por hectárea y por año, y liberan 6,67 toneladas de O<sub>2</sub> (oxígeno) por hectárea y por año.*

**C. El árbol como modificador del ambiente urbano.** Las ciudades con sus construcciones constituyen un medio de tipo rocoso muy buen conductor del calor. Los edificios aumentan la refracción y la absorción de la radiación. Por esto las ciudades se transforman en acumuladores de calor, su capacidad de generar calor aumenta con la actividad socio-económica, son *islas de calor* con temperaturas más elevadas y menor humedad relativa.

La mayoría de los árboles y arbustos en las ciudades se plantan para dar belleza y sombra. Sin embargo, los árboles sirven para muchos otros propósitos y funciones.

<sup>4</sup> FAO 1996. *Características socioeconómicas de los árboles y de las prácticas de plantación forestal*. John B. Raintree. FAO. Roma.



**a1. Rehidratación de la atmósfera.** Tarea realizada por los árboles (y todas las plantas) mediante la transpiración. Mediante este proceso, las plantas entregan vapor de agua a la atmósfera a través de aberturas en la epidermis de las hojas (los estomas).

*Se estima aproximadamente que una hectárea de Raulíes del sur argentino, transpira de 3.000 a 5.000 m<sup>3</sup> de agua por año.*

**b2. Refrescamiento del aire.** Mediante la transpiración del agua y las superficies sombreadas, los árboles reducen la temperatura del aire (Nowak, 1995). Las plantas toman del aire el calor necesario para llevar el agua del estado líquido al gaseoso y así evaporarlo al aire mediante la transpiración.

*Por este mecanismo puede llegar a disminuir 6° C la temperatura ambiental en época de calor en una zona cubierta por la vegetación.*

*Si la cubierta vegetal es de un 30% la disminución de la temperatura puede llegar a 4° C.*

*Este beneficio es muy claro en el verano cuando las personas se acercan a plazas y parques.*

**c3. Intercepción de la radiación solar.** Los árboles interceptan la radiación solar en cantidades que dependen en verano, del tipo de copa (ligera, densa, extra densa) y, en invierno, de la condición de desnudez de la misma.

*Comparando la cantidad de sol que atraviesa la copa en dos especies urbanas: Plátano y Fresno en invierno (I) y en (V) verano.*

*- Las dos especies se encuadran dentro del tipo caduco (es decir pierden las hojas en invierno)*

*La cantidad de sol que atraviesa la copa (en porcentaje):*

*Plátano 41% (I) / 9,8% (V)*

*Fresno 70% (I) / 16,2% (V)*

*Si comparamos los valores de invierno, el Plátano presenta la particularidad de que las hojas secas permanecen en la copa en el período invernal por lo que no deja pasar tanto el sol como el Fresno.*

*En verano los valores demuestran una copa más densa para el Plátano y más ligera en el Fresno.*

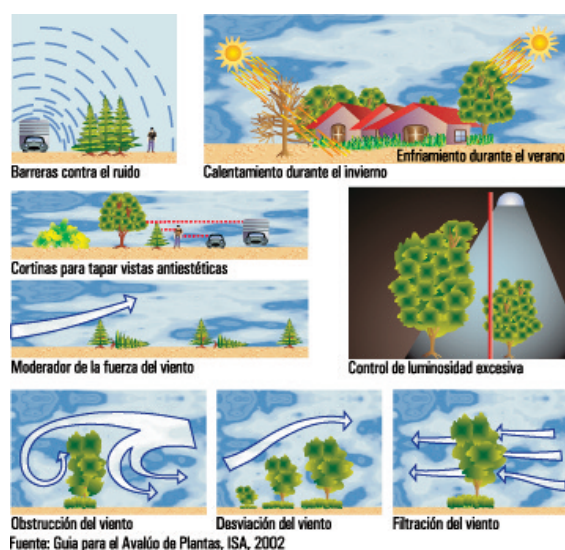


Figura 4.5. Funciones de los árboles

En las ilustraciones siguientes se pueden observar algunas de las funciones de los árboles, que fueron citadas precedentemente.

#### 4.1.5.4.- Cortinas y barreras forestales

La acción del viento como fuerza extrema, sobre el bienestar de las personas y de los animales suele ser un severo problema en los espacios abiertos que están desprovistos

de vegetación vegetal, también el viento puede en muchos casos llegar a ser una limitante para el crecimiento de algunas plantas.

Las cortinas cortaviento reducen los efectos negativos del viento y están conformadas por varios tipos de estructura. Las forestaciones que se plantean como barrera o cortinas incorporan más de una línea de árboles.

*Las avenidas de árboles mitigan los efectos del viento pero no conforman estrictamente una barrera forestal.*

La elección de la cortina se efectúa de acuerdo al tipo de cultivo u objeto a proteger. Una clasificación está basada en la porosidad:

### **Permeabilidad o porosidad**

*Está dada por la capacidad de la cortina forestal para interceptar mayor o menor proporción de viento libre. Esta característica está determinada por diferentes distanciamientos (entre hileras y entre plantas) y composiciones (plantas de diferentes especies).*

**Cortinas Densas** con una porosidad menor al 15%, es utilizada para proteger casas, ganado, invernáculos. **Cortinas Semipermeables** con una porosidad de 15 a 45%, es utilizada para proteger cultivos, pasturas sensibles.

**Cortinas Permeables** con una porosidad mayor a 45%, es utilizada para proteger cultivos poco sensibles a la acción del viento.

**Barrera para el viento.** Al oponerse una barrera a la libre circulación del viento, se producen turbulencias, que consisten en remolinos de grupos de moléculas de aire con componentes perpendiculares a la dirección del viento, tanto vertical como horizontal. Esta turbulencia es afectada por la densidad o porosidad de la barrera en forma directamente proporcional, y al elevarse por encima de la copa de los árboles, ofrece un mayor obstáculo al viento, aumentando la acción de la barrera. Es decir, que el fin de la cortina no es detener el viento, sino provocar que éste pase de un régimen turbulento a uno laminar de menor velocidad, reduciendo el daño que podría ocasionar a su paso.

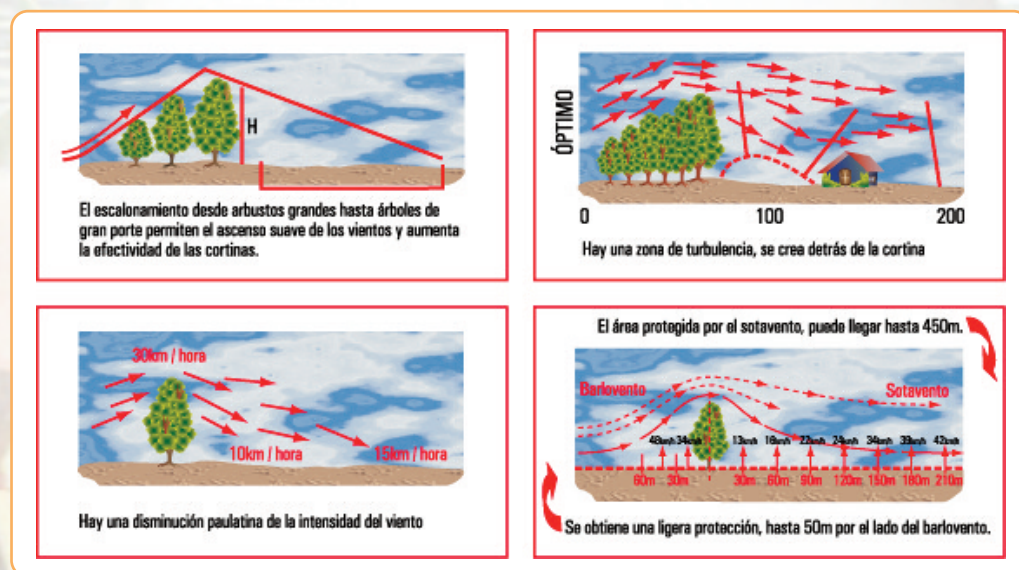


Figura 4.6. Barrera para el viento



### Algunos beneficios de las cortinas forestales

- disminuir la erosión del suelo, evitando la pérdida de fertilidad de los suelos protegidos;
- otorgar protección y mejorar la productividad de los cultivos;
- incrementar el peso y sobrevivencia de los animales protegidos en los meses de invierno, al disminuir la velocidad del viento y aumentar la temperatura;
- otorgar protección a cursos de agua, y aumentar la biodiversidad;
- proteger galpones, corrales, casas y otras infraestructuras;
- disminuir los requerimientos energéticos de los hogares protegidos, abaratando los costos de calefacción;
- producir productos forestales, como madera, postes, leña y productos forestales no madereros (PFnM);
- aumentar la rentabilidad del predio, al ser consideradas como una mejora ambiental y productiva.

### Cortinas Cortavientos y de Protección

Entre las consideraciones que se deben tener presente al establecer una cortina cortavientos están

- **el efecto de la altura**, dado que determina el área que protege la cortina: el área de mejor protección fluctúa entre 3 a 5 veces h (altura). La altura va a depender de la especie utilizada, el manejo realizado y la edad de la cortina.
- **efecto de la densidad**: si una cortina tiene una densidad baja, el viento pasará a través de los árboles sin oponer mayor resistencia y su velocidad no disminuirá en forma importante; si la cortina tiene una densidad muy alta, el flujo de aire se eleva rápidamente, pero al traspasar la cortina, provocará fuertes turbulencias detrás de ésta, en lugar de dar protección. La densidad de una cortina se calcula como el porcentaje de cobertura de ésta en relación a su área total, y está determinada por la(s) especie(s) y el distanciamiento entre los árboles y arbustos.
- **efecto de la orientación**: una cortina cortaviento será más eficaz, mientras más perpendicular a la dirección del viento se establezca. Generalmente la dirección de los vientos varía dependiendo de la época del año, sin embargo al diseñar una cortina cortavientos se debe tener en cuenta de qué dirección viene el viento más predominante y perjudicial, tanto para los animales, cultivos o edificaciones. Si en el lugar, hay más de una dirección de viento que provoca daño, es necesario diseñar cortinas en forma de “L”, “T”, o perimetrales.

*El principal objetivo del establecimiento de una cortina forestal es proteger las áreas próximas a ésta, ya sea para disminuir la velocidad del viento, entregando protección a los cultivos, ganado o construcciones, para proteger el suelo disminuyendo la erosión y, para protección de las riberas de cursos de agua. La finalidad de la cortina puede además contribuir al embellecimiento del predio, evitar la dispersión del polvo de los caminos interiores o de acceso, aislar visualmente algunos sectores del predio como casas, galpones y otro tipo de infraestructura, y generar áreas para el desarrollo de la vida silvestre y aumento de la biodiversidad.*

### Aspectos relevantes en el diseño de una cortina cortaviento

Para obtener el máximo provecho de este sistema, se debe identificar antes de establecer la cortina el sector que se desea proteger y, planificar la disposición y la longitud que tendrá la cortina cortaviento en ese lugar.

### Aspectos, entre otros, a considerar para el diseño de una cortina:

- **Distanciamiento**: usualmente el espaciamiento entre plantas en la hilera varía entre 1,5 a 2,5 metros, y entre hileras 1,5 a 3,0 metros, dependiendo de la densidad que se desee obtener para cortar el viento o, para proteger el suelo o curso de agua. Se debe considerar la velocidad del viento, la pendiente y que se desea proteger (cultivos, ganado, edificaciones, curso de aguas, otros).
- **Especies**: la elección de una especie se hace en función del tipo de suelo, los requerimientos de agua, velocidad de crecimiento, susceptibilidad a plagas y tipo de cortina a construir. Las especies forestales también se pueden combinar con arbustos, para mejorar la intercepción del viento y protección del suelo.
- **Número de hileras**: el número de hileras a establecer en una cortina dependerá de los sectores a



proteger, de la velocidad del viento, y de la topografía del lugar. Usualmente varían entre 1 a 4, siendo las cortinas más comunes de dos a tres hileras.

Clasificación de las especies para la formación de barreras rompevientos

Los árboles para las barreras rompevientos se pueden clasificar según la persistencia de sus hojas y según su porte.

Según la persistencia de las hojas:

- de hoja caduca: son los árboles que en otoño pierden sus hojas;
- de hoja perenne, son los árboles que "no voltean" las hojas en otoño. Estas especies son las más usadas en virtud de que durante todo el año brindan protección.

Según su porte o altura:

- tipo 1 - de gran porte: eucaliptos, álamos, fresno blanco, árbol del cielo;
- tipo 2 - frondosos de porte mediano: plátanos, moreras, grevillea, pinos;
- tipo 3 - arbustos o árboles pequeños: tamarisco, aguaribay, acacia saligna, olivo de Bohemia;
- tipo 4 - arbustos muy pequeños para frenar el aire que se cuela por entre los árboles de mayor porte.

Teniendo en cuenta que el objetivo es elevar el aire por encima de la masa forestal, una disposición adecuada de las especies sería, por ejemplo: árboles de tipo 3, luego los de gran porte tipo 1 y una tercera hilera de porte mediano tipo 2, pudiendo o no colocar otra cuarta hilera de arbustos tipo 4. En la tabla siguiente puede observarse que existe predominio de las especies latifoliadas (planta de hoja ancha) sobre las coníferas. Ello se debe a que el más rápido crecimiento de esas especies hace factible obtener la protección buscada en un tiempo menor.

Latifoliadas		Persistencia de las hojas	Posición en la cortina
Acacia negra	<i>Gleditsia triacanthos</i>	Caduca	Intermedia
Acacia blanca	<i>Robinia pseudo - acacia</i>	Caduca	Intermedia
Acacia visco	<i>Acacia visco</i>	Caduca	Intermedia
Olmo siberiano	<i>Ulmus pumila</i>	Caduca	Intermedia
Olmo americano	<i>Ulmus americana</i>	Caduca	Intermedia
Paraíso	<i>Melia azedarach</i>	Caduca	Intermedia
Sofora de Japón	<i>Styphnolobium japonicum</i>	Caduca	Intermedia
Eucalipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	Persistente	Central
Aguaribay	<i>Schinus molle</i>	Persistente	Central
Casuarina	<i>Casuarina sp.</i>	Persistente	Central
Maclura	<i>Maclura pomifera</i>	Caduca	Intermedia
Morera blanca	<i>Morus alba</i>	Caduca	Intermedia
Morera negra	<i>Morus nigra</i>	Caduca	Intermedia
Árbol del cielo	<i>Ailanthus altissima</i>	Caduca	Intermedia
Higuera	<i>Ficus carica</i>	Caduca	Intermedia
Membrillero	<i>Cydonia sp.</i>	Caduca	Exterior
Granada	<i>Punica granatum</i>	Caduca	Exterior
Olivo	<i>Olea europea</i>	Persistente	Exterior o Intermedia
Duraznero	<i>Pronus persica</i>	Caduca	Intermedia
Acacia australiana	<i>Acacia melanaxylon</i>	Persistente	Intermedia
Acacia hoja larga	<i>Acacia longiolia</i>	Persistente	Intermedia
Tamarisco	<i>Tamaix sp.</i>	Caduca	Exterior
Arce o acer	<i>Arce negundo</i>	Caduca	Intermedia
Olivo de Bohemia	<i>Eleagnus angustifolia</i>	Caduca	Exterior o Intermedia

Tabla 1. Especies indicadas para la formación de cortinas rompevientos

Coníferas			
Ligustro	<i>Ligustrum sp.</i>	Persistente	Intermedia
Pino de Alepo	<i>Pinus halepensis</i>	Persistente	Intermedia
Pino marítimo	<i>Pinus pinaster</i>	Persistente	Intermedia
Pino poñonero	<i>Pinus pinea</i>	Persistente	Intermedia
Ciprés horizontal	<i>Cupressus sempervirens var. horizontales</i>	Persistente	Exterior o Intermedia
Ciprés de Monterrey	<i>Cupressus macrocarpa</i>	Persistente	Exterior o Intermedia
Tuya	<i>Thuja sp.</i>	Persistente	Exterior o Intermedia
Cedro deodora	<i>Cedrus deodara</i>	Persistente	Exterior o Intermedia

Tabla 1. Especies indicadas para la formación de cortinas rompevientos

#### 4.1.5.5.- Los efectos del viento en la vegetación

Los efectos del viento sobre la vegetación constituyen un indicador indirecto del potencial eólico local. Entre los factores que afectan la respuesta de la vegetación como indicador de la potencia del viento en un lugar determinado, están el tiempo de exposición, el ángulo de inclinación de la deformación resultante, y el tipo o especie de árbol o arbusto.

##### Los distintos índices de deformación del viento

Existen cinco índices de los efectos del viento sobre los árboles. Cada índice brinda un acercamiento de las características del viento responsable del efecto sobre los árboles:

**La excentricidad (E).** Es un indicador de la desviación de la circularidad del tronco de un árbol. La excentricidad se define como E donde:

$$E = \frac{(2A - 2B)}{A} \quad \begin{array}{l} 2A = \text{eje mayor del árbol} \\ 2B = \text{eje menor del árbol} \end{array}$$

**El índice de forma (S).** Es una medida de la influencia relativa del viento sobre el radio y extensión del crecimiento del tronco. La relación es calculada al dividir la circunferencia del árbol en 1,5 m por su altura.

**Relación Grigg – Putnam del tipo de deformación (G).** Es una escala subjetiva de clasificación parecida a la que desarrolló Putnam (1948). A cada árbol se da una clasificación con base en las características de su deformación eólica.

**La relación de deformación (D).** Es un indicador del grado de viento que induce a deformar un árbol. Se calcula una relación entre el ángulo  $\alpha$  (ángulo entre la copa y el tronco del lado del sotavento del árbol) y el ángulo  $\beta$  (ángulo entre la copa y el tronco del lado de barlovento del árbol)

**La relación de compresión (C).** Es un indicador de la influencia del viento sobre la deformación de la madera de reacción. La relación es calculada al tomar el incremento anual de crecimiento del tronco sobre el lado del sotavento del árbol y dividirlo por el incremento de crecimiento del lado de barlovento del árbol.

#### Índice Grigg – Putnam

El índice Grigg – Putnam es el primer índice de los efectos del viento en la configuración de los árboles. Este índice es una escala subjetiva basada en el grado de respuesta del árbol hacia el viento.

El índice se divide en ocho clases:

- **Clase 0 – Ningún efecto:** un examen cuidadoso de agujas, ramitas y ramas indican que el viento no ha tenido ninguna influencia notable en el árbol.
- **Clase I – Efecto peinado:** las ramas pequeñas y agujas aparecen inclinadas en la dirección predominante del viento. La copa del árbol debe aparecer ligeramente asimétrica.
- **Clase II – Ligeramente abanderado:** las pequeñas ramas y extremos de las ramas más grandes se doblan por el viento, dándole a la copa del árbol una notable asimetría.
- **Clase III – Moderadamente abanderado:** se doblan las ramas grandes hacia los bordes de sotavento del árbol, lo mismo ocurre en los laterales de la copa.
- **Clase IV – Fuertemente abanderado:** todas las ramas están a sotavento y el tronco está a descubierto del lado de barlovento. El árbol parece una bandera.
- **Clase V – Parcialmente inclinado:** el tronco del árbol está parcialmente inclinado, así como las ramas se doblan al reparo del mismo. El tronco se inclina en forma cóncava o convexa, se acrecienta el grado de inclinación del árbol, acercando la copa y el tronco al suelo.
- **Clase VI – Completamente inclinado:** el árbol crece casi paralelo al suelo por el predominio de la dirección del viento. Las ramas más grandes se extienden del lado de sotavento, más allá del extremo del tronco.
- **Clase VII – Efecto alfombra:** el viento es muy fuerte y está acompañado de condiciones muy severas, por ejemplo las heladas, tomando el árbol forma de arbusto. Se pierde el desarrollo del árbol en forma simétrica; es predominante el crecimiento lateral, a ras del suelo. La copa crece sobre la tierra como un postrado arbusto.

### Índice de deformación

La relación de deformación (D) mide el nivel de asimetría de la corona y la desviación del tronco principal. Este índice puede calcularse mediante dos metodologías distintas. La primera se puede realizar en forma manual mediante la medición de los distintos ángulos de deformación sobre las fotografías tomadas. La segunda consiste en la digitalización de las fotografías para corroborar los posibles errores de medición mediante Autocad y Cad. Para el cálculo del Índice de Deformación (Relación Grigg - Putnam) se debe considerar que para las coníferas y las casuarinas,  $\alpha$  es el ángulo formado por el borde de la copa y el tronco del lado del sotavento,  $\beta$  es el ángulo formado por el borde de la copa y el tronco del lado de barlovento, y es el ángulo promedio de la desviación del tronco hasta el borde de la copa.

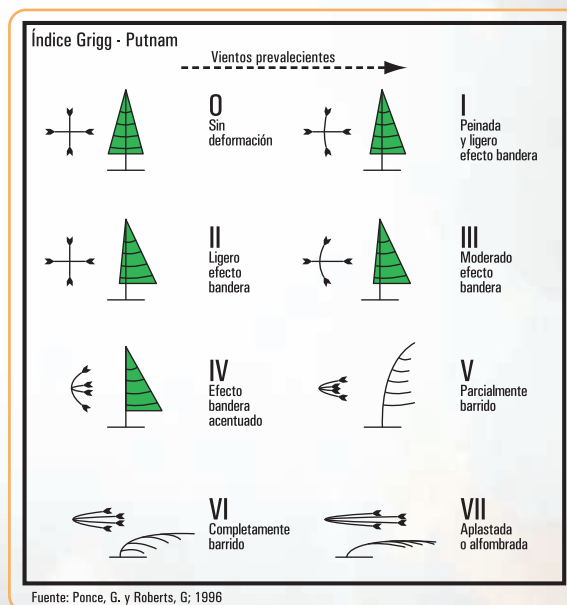


Figura 4.7. Efectos del viento en la configuración de los árboles



La ecuación para el índice de deformación es:

$$D = \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} + \frac{\hat{\gamma}}{45^\circ}$$

Para árboles de copa esférica la relación de deformación es dada por:

$$D = \frac{A}{B} + \frac{\hat{\delta}}{45^\circ}$$

donde A es la distancia media del perímetro de la copa del lado de sotavento, B es la distancia media del perímetro de la copa del lado del barlovento, y  $\hat{\delta}$  es el ángulo medio del perímetro de la copa y el tronco, a sotavento.

#### 4.1.5.6.- Los árboles en los medios urbanos

En el paisaje urbano las condiciones de desarrollo de las plantas son diferentes de las del paisaje rural. La pavimentación y los edificios caracterizan a la ciudad, en la que disminuye la velocidad del viento - con un incremento de los golpes de viento-, aumentan las temperaturas y precipitaciones, se reduce la humedad, y el sombreado es común en muchas calles estrechas y de paredes altas. Las condiciones de desarrollo pueden ser también difíciles debido a los usos recreativos. (Kjell Nilsson, Thomas B. Randrup y Tilde Tvedt, 1997).<sup>5</sup>

Los árboles en los medios urbanos, ubicados como arbolado público o conformando espacios verdes ayudan a mantener frescas las ciudades y actúan como filtros naturales y como factores de absorción del ruido; además, mejoran el microclima y sirven para proteger y elevar la calidad de los recursos naturales: suelo, agua, vegetación y fauna. Los árboles contribuyen en medida considerable al atractivo estético de las ciudades, permiten admirar su belleza a la vez que transmiten serenidad, descanso y paz. Se dice que "el tamaño, fuerza y resistencia de los árboles les da una calidad similar a la de una catedral. Debido a su potencial de vida larga, con frecuencia se plantan como monumentos vivos".<sup>6</sup>

El arbolado urbano es considerado y tratado como "arbolado funcional", cumpliendo determinadas funciones concretas: regulación ambiental, atenuación de ruidos, depuración del aire, aportación de humedad y sombra, influencia psicológica, etc.<sup>7</sup>

*Kaplan & Kaplan (1989) han formulado una teoría sobre la interacción entre la atención del hombre y el entorno circundante. Esto significa que la vida urbana, con vehículos rápidos, señales de neón destellantes y colores fuertes, ocasionan un estrés constante. La investigación indica que la vegetación y la naturaleza refuerzan en las personas la atención espontánea, permiten que el sistema sensorial se relaje e infunda nuevas energías. Las visitas a las áreas verdes relajan y aguzan la atención.*

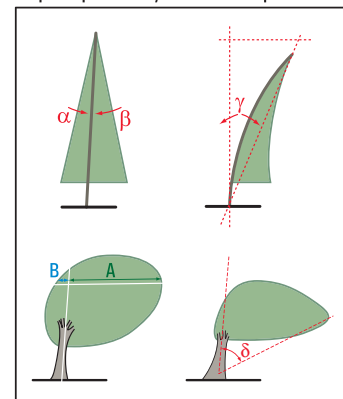
En el diseño urbano, la plantación de árboles puede ser aislada, formando pequeños grupos, grandes masas o formando alineaciones en calles. En cualquiera de los casos será importante el conocimiento de las particularidades y las limitaciones de las especies que pueden ser utilizadas, así como el entorno donde serán ubicadas. Frecuentemente, la plantación se realiza con poco aprecio y atención hacia las características y calidad de las condiciones de desarrollo bajo la superficie del suelo y sin considerar las limitaciones de espacios

<sup>5</sup> Krishnamurthy L. y J. Rente Nascimento, (Eds.). 1997. *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe*. 39 - 81 pp. - D.R. © 1997 Banco Interamericano de Desarrollo. Impreso en México. CAPÍTULO 3.

<sup>6</sup> Traducción al español: Luis A. Moreno, biólogo - arbolista de Zaragoza, España. Disponibles a través de ISA Hispana-Sociedad Internacional de Arboricultura- [www.isahispana.com/treecare/articles](http://www.isahispana.com/treecare/articles)

<sup>7</sup> Iguiñiz Agesta, G. 2002: *Apuntes de Plantación, Poda y Gestión Estructural de Arbolado Urbano*. Asociación Española de Arboricultura. Cuadernos de Arboricultura N°1. [www.arbolonline.org](http://www.arbolonline.org)

La relación de deformación para árboles de porte piramidal y árboles de copa esférica



Fuente: Ponco, G., Roberts, G.; 1996

Figura 4.8

impuestas, sobre todo a lo que se refiere a la anchura de la acera disponible. Lo deseable sería seleccionar especies cuyo porte y desarrollo natural, con las intervenciones mínimas, no entre en conflicto con las edificaciones.

Cuando se indica el tamaño de un árbol generalmente se hace referencia a su altura, quedando incompleta la información sobre el diámetro de su copa. Ambos parámetros son importantes para establecer el tamaño de un ejemplar. Es importante diferenciar el tamaño del árbol en un momento concreto de su vida y el tamaño que adquirirá en estado adulto. Estos datos permiten orientar la plantación de las especies más apropiadas en función de las construcciones, el ancho de la vereda y de la calle.

*En la siguiente tabla se sintetiza las características de tamaño y crecimiento de especies arbóreas empleadas en veredas de calles urbanas.*

Nombre	Género y especie	Medidas al momento de la plantación		Medidas 10-15 años después de la plantación		Medidas con más de 20 años después de la plantación	
		Altura en m	Diámetro en m	Altura en m	Diámetro en m	Altura en m	Diámetro en m
Acacia bola	<i>Robinia pseudoacacia</i>	1,5-2	1	3 a 4	2-3	5 a 7	4 a 6
Aguaribay	<i>Schinus molle</i>	1,5-2	1	5	2-3	6 a 10	8 a 10
Álamo plateado piramidal	<i>Populus alba</i>	2-3	1	7-8	4-5	20 a 30	3 a 5
Braquiquito	<i>Brachychiton populneum</i>	2-3	1	5	5	8 a 12	8 a 10
Catalpa	<i>Catalpa bignonioides</i>	2,5	2	5-6	4-5	8 a 15	8 a 10
Fresno americano	<i>Fraxinus americana</i>	2,5	1,5	4	3	20 a 25	10 a 20
Jacarandá	<i>Jacarandá mimosifolia</i>	2	1,5-2	5-6	4	8 a 12	5 a 10
Lapacho	<i>Tabebuia avellanedae</i>	2	1,5	4-4,5	3,5	8 a 10	8 a 10
Liquidámbar	<i>Liquidambar styraciflua</i>	2	1	3-4	2-3	5 a 20	8 a 10
Plátano	<i>Platanus hybrida</i>	2,5-4	1	6-8	5-6	25 a 30	10 a 20
Roble sedoso	<i>Grevillea robusta</i>	2,5	1,5	5	3-4	25 a 30	8 a 10
Tilo	<i>Tilia moltkei</i>	2,5	1	7	6	10 a 20	10 a 20

Tabla 2. Dimensiones de tamaño y crecimiento de especies arbóreas



...y, ¿qué es la estética de los árboles? veamos...

## 4.2.- Estática de árboles

### 4.2.1.- Una aproximación a la estética de árboles

Hemos visto que los principios de la Estática se aplican ampliamente a todos los aspectos de la vida del ser humano, a lo que podemos agregar que una aplicación de la estética es la **Estática de árboles**.

*El término Estática de los Árboles se introdujo a comienzos de los años 80, cuando L. Wessolly, ingeniero que llevaba adelante el proyecto “Construcciones ligeras en la Naturaleza” y G. Sinn, arquitecto paisajista, trabajaron en un método que permitiese determinar la seguridad de los árboles causando el menor daño posible.*

La **estática de los árboles** trata del riesgo de caída o rotura del tronco, lo que indica el potencial de anclaje del sistema radicular.

Del equilibrio entre las fuerzas externas e internas, resulta la estabilidad del árbol en relación con la caída o la rotura.

### Riesgo de caída o rotura del tronco

Los árboles soportan las cargas de los vientos, de la nieve, del hielo, de los frutos, así como su propio peso permanente.

Los árboles ramificados desde la base, tienen una estructura que durante un vendaval soportan mejor las oscilaciones, mientras que los árboles con tallos delgados y copas pequeñas están más expuestos a los balanceos, por lo que aumenta el riesgo de caída. Por su parte, las hojas y las ramas amortiguan la amplitud de balanceo de los árboles.

Recordamos que aquellos árboles ramificados desde la base, ante una fuerza externa, el peso de la fuerza cae dentro de la base de sustentación (equilibrio estático estable). En cambio en los ejemplares que poseen un tronco delgado la fuerza peso, ante una fuerza externa como la del viento, cae fuera de la base de sustentación (equilibrio inestable).

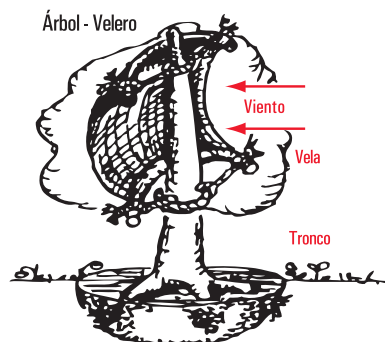
Pire (2007)<sup>8</sup>, consigna que la parte aérea de los árboles trabajan como grandes velas al embate de los vientos, y en las ciudades, carreteras y bordes de alineaciones o bosques, este problema se ve agravado por los efectos asociados a los vórtices creados por los otros árboles, edificios y/o construcciones, que modifican el clima de los vientos de una manera más rápida que la capacidad de los ejemplares para adaptarse.

A más altura del árbol, mayor es el efecto vela, más carga se desarrollarán durante una tormenta y se transmitirán al tronco. A medida que el tronco se balancea, sus fibras periféricas extienden el lado de tracción y acortan el de compresión.

### Silueta de los árboles



Figura 4.9



Fuente: C. Mattheck  
2º Encuentro Internacional de Arboricultura Urbana.  
Bogotá D.C. Colombia

Figura 4.10

### Para conocer más

*Podemos comprender las condiciones mecánicas que debe reunir un vegetal, si se considera, por ejemplo, que el tallo hueco de un centeno de 1,5 m de altura, que lleva además en su extremo la pesada carga de la espiga, apenas alcanza 3 mm de diámetro en su base, y que en el esbelto tronco de las palmeras se insertan no sólo los frutos, de gran peso, sino sobre todo las hojas, que actúan a manera de velas en los días de viento y que en algunas especies de *Raphia* alcanzan 15 m de longitud, con la anchura correspondiente.*

*El cuerpo de la planta no sólo goza de tal solidez, sino que posee, además, una notable elasticidad; la larga caña del centeno cuando hace viento inclina, transitoriamente, su extremo, con la espiga hasta el suelo, sin romperse, para volverse a elevar elásticamente acto seguido.*<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Pire, E. F. (2007) Publicación cuatrimestral de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario – ISSN 16698584 – N 22 – 8/2007 y N 23 – 12/2007.

<sup>9</sup> E. Strasburger, F. Noll, H. Schenck y A. F. W. Schimper. 1974. *Tratado de botánica*. Editorial Marín. Barcelona. España



## 4.2.2.- Estabilidad del arbolado

En la valoración de riesgo de rotura de los árboles, los principios generales de sustentación indican que:

1. un árbol en condiciones sanas resiste la fuerza del viento;
2. un árbol con la presencia de defectos y lesiones estructurales, disminuye esa resistencia.

### El triángulo de la estática

En las situaciones que se necesita calcular la resistencia de un árbol para soportar las cargas —de los vientos, la nieve, el hielo, los frutos, así como su propio peso—, se tienen en cuenta:

- la geometría de la estructura que lleva la carga (forma del tronco que aguanta la carga);
- las propiedades de los materiales (propiedades de la madera verde);
- las fuerzas que se aplican (carga o fuerza efectiva del viento).

En el **triángulo de la estática** se observa la interacción entre los componentes mencionados<sup>10 11</sup>.

Para una aplicación específica en árboles se estudian cada uno de los componentes:

- a. **La geometría básica de la estructura del árbol.** Las estructuras huecas no son necesariamente inseguras. Para tener una estructura estable ha de encontrarse un punto óptimo entre la capacidad de carga y el grosor de la pared del material.

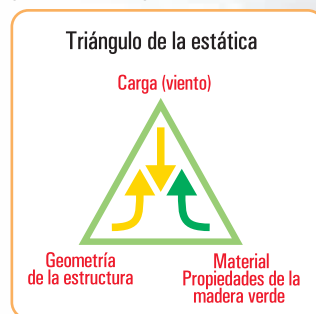


Figura 4.11. Triángulo de la estática

*La resistencia de árboles ha sido tratada en Mattheck & Breloer, (2003), para prevenir el colapso manguera y el pandeo de la corteza. Consideran que el espesor de la pared residual no puede ser inferior a un tercio del radio del tronco ( $t \geq 1/3 R$ ).*

*Por otro lado Wessolly & Erb (1998) proponen y aceptan espesores infinitamente mínimos de pared residual. Para ello emplean la teoría de la flexión de un tubo hueco.*

Los árboles en su estructura soportan su propio peso y el empuje del viento. Su anatomía interna está relacionada con su capacidad para soportar cargas mecánicas, su solidez y elasticidad está referida a la posesión de tejidos mecánicos especiales, formados por células dispuestas en masa compacta, con una membrana engrosada en parte (colénquima) o en su totalidad (esclerénquima)<sup>12</sup>.

La pérdida de capacidad mecánica que implican los huecos en los troncos, la presencia de defectos estructurales, sumado a condiciones meteorológicas adversas, suelen ser determinantes para que se produzca la rotura del tronco. El tipo, el tamaño y la localización de estos defectos, son críticos en la evaluación de la peligrosidad de caída o rotura, para ello se estudia la sección de la estructura del árbol a diferentes alturas.

### Para conocer más

*Se han desarrollado diversos métodos para la inspección de los árboles con el objeto de minimizar el peligro de caídas.*

*El modelo CODIT (A. L. Shigo, 1985) explica uno de los mecanismos de defensa del árbol. Con este modelo la arboricultura tomo un nuevo punto de partida que consistía en la mejora de las condiciones de crecimiento y evitar de esta manera que el árbol se debilite e infecte por agentes patógenos.*

*El método V.T.A. (Mattheck & Breloer, 1995) presenta las reacciones y defectos que conducen a la caída de un árbol.*

*El método inclino-Elasto (Wessolly & Erb, 1998) propone que se someta el árbol a una simulación de la*

<sup>10</sup> E. Brudi, 2001. Conferencia sobre biomecánica de la ISA, 2001. Savannah.

<sup>11</sup> Sterken, P. 2005. *Una Hipótesis sobre el Diagnóstico de Estabilidad de Arbolado*. International Society of Arboriculture, [www.isahispana.com](http://www.isahispana.com)

<sup>12</sup> E. Strasburger, F. Noll, H. Schenck y A. F. W. Schimper. 1974. *Tratado de botánica*. Editorial Marín. Barcelona. España.

carga del viento, ofreciendo una visión de la estabilidad del árbol.

El método I.B.A. (Reinartz & Schlag, 1997), describe la interacción de micología, vitalidad y estabilidad del árbol.

El método SIA (Wessolly & Erb, 1998) estima la resistencia a la fractura de un árbol hueco.

P. Sterken, (2005) combina componentes de los distintos métodos sobre la estabilidad del arbolado, para llegar al diagnóstico de los problemas<sup>13</sup>.

**b. Las propiedades estructurales del material.** Los datos de muchos estudios que tratan la resistencia material de diferentes maderas que se utilizan en estructuras de diferentes elementos, están referenciados a maderas secas.

En lo que hace al comportamiento de las maderas verdes se realizaron estudios cuyos resultados se conocen como el Catálogo de Stuttgart, donde se determina las compresiones y las resistencias al corte o cizallamiento, en diferentes secciones anatómicas.

Especies	E-módulo de elast. en kN/cm <sup>2</sup>	Fuerza de compresión en kN/cm <sup>2</sup>	Límite de elasticidad en %	Coefficiente aerodinámico propuesto
<i>Abies alba</i>	950	1,5	0,16	0,20
<i>Acer pseudoplatanus</i>	850	2,5	0,29	0,25
<i>Acer negundo</i>	560	2	0,36	0,25
<i>Acer campestre</i>	600	2,55	0,43	0,25
<i>Acer saccharinum</i>	600	2	0,33	0,25
<i>Acer sacharum</i>	545	2	0,37	0,25
<i>Aesculus hippocast.</i>	525	1,4	0,27	0,35
<i>Ailanthus altissima</i>	640	1,6	0,25	0,15
<i>Betula pendula</i>	705	2,2	0,31	0,12
<i>Chamaecyparis law.</i>	735	2	0,27	0,20
<i>Cedrus deodara</i>	765	1,5	0,20	0,20
<i>Fagus sylvatica</i>	850	2,25	0,26	0,25 - 0,30
<i>Alnus glutinosa</i>	800	2	0,25	0,25
<i>Fraxinus excelsior</i>	625	2,6	0,42	0,20
<i>Picea abies</i>	900	2,1	0,23	0,20
<i>Picea omorika</i>	900	1,6	0,18	0,20
<i>Carpinus betulus</i>	880	1,6	0,18	0,25
<i>Castanea sativa</i>	600	2,5	0,42	0,25
<i>Cercis siliquastrum</i>		1,5		0,20
<i>Larix decidua</i>	535	1,7	0,32	0,15
<i>Liriodendron tulipifera</i>	500	1,7	0,34	0,25
<i>Pinus pinaster</i>	850	1,8	0,21	0,20
<i>Pinus sylvestris</i>	580	1,7	0,29	0,15
<i>Platanus x hybr.</i>	625	2,7	0,43	0,25
<i>Populus x canescens</i>	605	2	0,33	0,2 - 0,25
<i>Populus nigra "Italica"</i>	680	1,6	0,24	0,30
<i>Populus nigra</i>	652	2	0,31	0,2
<i>Populus alba</i>	640	2	0,31	0,2
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1000	2	0,20	0,20
<i>Pyrus communis</i>	580	1,7	0,29	0,30
<i>Quercus robur</i>	690	2,8	0,41	0,25
<i>Quercus rubra</i>	720	2	0,28	0,25
<i>Robinia pseudoacacia</i>	705	2	0,28	0,15
<i>Robinia monophy</i>	520	2	0,38	0,15 - 0,20

Tabla 3. Catálogo Stuttgart. Propiedades materiales de la madera verde

<sup>13</sup> Sterken, P. 2005. Una Hipótesis sobre el Diagnóstico de Estabilidad de Arbolado y Protocolo para el análisis de estabilidad de arbolado mediterráneo. International Society of Arboriculture, [www.isahispana.com](http://www.isahispana.com)

Especies	Módulo de elasticidad en $\text{kN/cm}^2$	Fuerza de compresión en $\text{kN/cm}^2$	Límite de elasticidad en %	Coefficiente aerodinámico propuesto
<i>Salix alba</i>	700	1,6	0,21	0,20
<i>Salix alba Tristis</i>	455	1,8	0,23	0,20
<i>Sequoiadendron gig.</i>	645	2	0,40	0,15
<i>Sophora japónica</i>	600	1,6	0,31	0,25
<i>Sorbus aria</i>	450	1,7	0,27	0,25
<i>Tilia x hollandica</i>	700	1,75	0,38	0,25
<i>Tilia euchlora</i>	835	2	0,25	0,25 - 0,30
<i>Tilia tomentosa</i>	800	2	0,24	0,25
<i>Tilia platiphylllos</i>	830	2	0,25	0,25
<i>Tilia cordata</i>	570	2	0,24	0,25
<i>Ulmus glabra</i>	775	1,6	0,35	0,20

Tabla 3. Catálogo Stuttgart. Propiedades materiales de la madera verde

En la tabla 3 se puede observar que:

- la variación de las propiedades de madera verde varían desde  $1,4 \text{ kN/cm}^2$  (Castaño de Indias, *Aesculus hippocastanum*) a  $2,8 \text{ kN/cm}^2$  (Roble, *Quercus robur*);
- muchas especies de árboles cuentan con fuerzas de compresión de  $2,0 \text{ kN/cm}^2$ .

El **límite de elasticidad** en la madera lo encontramos definido como fuerza de compresión / módulos de elasticidad.

El valor elástico es muy constante en cada árbol, cuando se supera ese límite las fibras permanecen deformadas, este punto se denomina “rotura primaria”.

Si a la estructura deformada se le aplica una tracción mayor las fibras se romperán. Este punto se denomina “rotura secundaria”.

El objetivo, para el cuidado del arbolado, es evitar el punto donde el material se dobla y comienza a romperse. Este principio se tiene en cuenta cuando se aplican los distintos métodos de diagnóstico, por ejemplo durante las pruebas de carga con el Elasto – inclinómetro, se tracciona el árbol dentro de estos límites.

$$\begin{aligned} &\text{Newton (N)} \\ &1 \text{ N} = 1 \text{ kg m / s}^2 \end{aligned}$$

“El límite de elasticidad es la máxima tensión que un material puede soportar para después volver a su forma original. Según la ley de Hooke, la tensión creada en un material elástico es proporcional al esfuerzo, dentro del límite de elasticidad”<sup>14</sup>

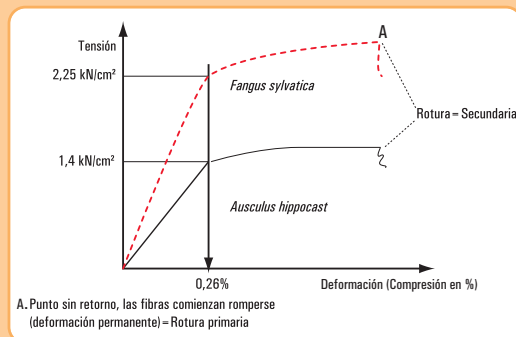


Figura 4.12. Diagrama Tensión - Deformación: límite de elasticidad de la madera.



Imagen 4.1. Ejemplo del límite de elasticidad de la madera.\*

<sup>14</sup> B.L.Worsnop y H.T.Flint (1994). *Curso superior de física práctica*. Eudeba. Buenos Aires.

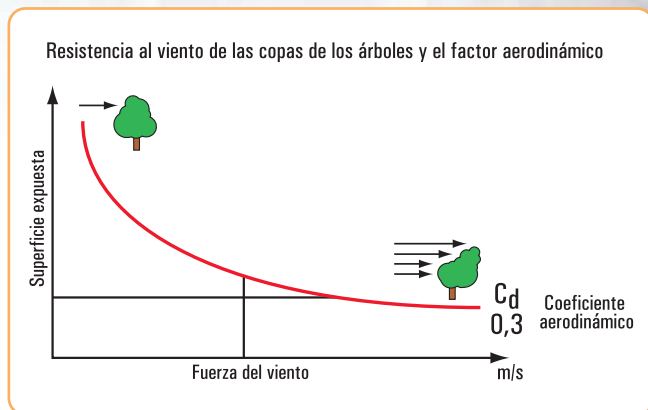
\* Fotografía: Luciana Parano / Ramiro G. Naya



c. **La carga que actúa sobre la estructura.** El empuje o carga que ejerce el viento sobre el árbol es complejo.

Por ejemplo, en el caso de la copa del árbol, podemos observar que no se trata de una estructura plana y rígida, y que durante las tormentas las hojas y las ramas se doblan hacia atrás, y la superficie expuesta al viento se reduce disminuyendo la entrada de energía al tronco y al sistema radicular, entonces se hace necesario utilizar principios y conceptos aerodinámicos.

La presión que el viento hace sobre la superficie del árbol (la superficie variable en función del viento, factor aerodinámico), depende de la forma de la copa, de la aspereza de la superficie, de la cantidad de hojas y de lo unidas que se encuentran entre ellas.



**Figura 4.13.** Resistencia al viento de las copas de los árboles y el factor aerodinámico. Fuente: *Handbuch der Baumastatik*, Wessolly 1998.

En la figura 4.13 se representa el factor aerodinámico (valor  $C_d$ ) de una especie de árboles (robles) que afectados por numerosas tormentas descendió hasta 0,3.

Los árboles, a una velocidad del viento de 64 km/h, habían alcanzado su máximo punto de elasticidad y la superficie de exposición no se reduce más.

### 4.2.3.- Una aproximación matemática de la estabilidad del arbolado forestal

Las ecuaciones matemáticas que se presentan permiten orientar en la evaluación de la estabilidad de un árbol que presenta daños producidos por las acciones eólicas. Desde el modelo se simula el comportamiento mecánico de arbolado forestal y permite predecir la velocidad crítica del viento, a la que los árboles pueden derribarse o fracturarse.

#### La carga crítica del viento

- a) La carga crítica del viento en la copa causando el abatimiento mecánico,  $F_{crit}$ , se obtiene dividiendo el momento crítico  $M_{crit}$  por la distancia  $e$  o brazo de palanca, siendo el momento mecánico el producto de la carga del viento en el árbol y la palanca:

$$M_{crit} = F_{crit} \cdot e$$

Donde:

$M$  = el momento de flexión (kN m)

$e$  = distancia (m) o brazo de palanca

$F$  = la fuerza del viento en la copa (kN)

Para los momentos de flexión,  $e$  es la distancia entre la sección transversal estudiada y el centro de la carga en el árbol. De acuerdo con AENOR<sup>15</sup> (1998) se asume que el centro de la carga está a 0,55 veces la altura de la copa simétrica.

<sup>15</sup> AENOR 1998. Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4 Acciones en estructuras. Acciones del viento. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid. España.

- b) La carga crítica que causaría fractura por torsión  $F_{\text{crit torsión}}$  se obtiene dividiendo el momento crítico de torsión  $M_{\text{crit torsión}}$  por la distancia o brazo de palanca de torsión  $e_{\text{torsión}}$ .

Ésta se calcula asumiendo que una ráfaga de viento puede impactar en el árbol no de manera uniforme y centrada, incluso cuando éste presente una simetría aparente,  $e_{\text{torsión}}$  se expresa de la siguiente manera (AENOR, 1998).

$$e_{\text{torsión}} = \frac{d_{\text{copa}}}{4}$$

Donde

$e_{\text{torsión}}$  = la distancia o brazo de palanca de torsión (m)

$d_{\text{copa}}$  = el diámetro de la copa (m)

### Momentos críticos de fractura

La resistencia a la fractura se expresa en función del módulo resistente y la resistencia a la compresión de la madera. El momento que iguala o excede esta resistencia se considera como el momento crítico. Asimismo, el primer paso es calcular el momento crítico para la sección transversal estudiada, descontando el espesor de la corteza.

### Momento de flexión crítico para el tronco libre de defectos estructurales

El momento de flexión crítico  $M_{\text{crit}}$  que causaría que la tensión de compresión excediera la resistencia de la madera, para un tronco libre de defectos estructurales, se representa en la siguiente fórmula (Tyler & Hicks, 2005)

Por la ecuación fundamental de la flexión:

$$\sigma = \frac{M_{\text{crítico}}}{w}$$

siendo  $w$  el módulo resistente que para el caso del tronco cilíndrico es

$$w = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$M_{\text{crit}} = \frac{\pi \cdot d^3 \sigma_{\text{compresión}}}{32}$$

Donde:

$M_{\text{crit}}$  = el momento de flexión crítico que causaría que la tensión en compresión exceda la resistencia de la madera (kN m)

$d$  = diámetro de la sección (cm)

$\sigma_{\text{compresión}}$  = la resistencia a la compresión de la madera verde (kN cm<sup>-2</sup>)<sup>16</sup>

### Momento de flexión crítico para el tronco hueco

El momento de flexión crítico  $M_{\text{crit}}$

Para la pared residual se representa por la siguiente ecuación<sup>17</sup>

$$M_{\text{crit hueco}} = - \frac{[\pi [d^3 - (d - 2t)^3] \sigma_{\text{compresión}}}{32}$$

Donde:

$M_{\text{crit hueco}}$  = el momento de flexión crítico que causaría, en la pared residual, que la tensión en compresión exceda la resistencia de la madera (kN m)

$t$  = el grosor de la pared residual (cm)

<sup>16</sup> Lavers, 1983; Wessolly & Erb, 1998.

<sup>17</sup> La ecuación concuerda con la de Wessolly & Erb, (1998) para el espesor requerido de pared residual.

#### 4.2.4.- Algunas relaciones entre factores ambientales y la caída de los árboles

**El suelo.** El sistema radicular de un árbol tiene por función elemental su anclaje o sujeción, la nutrición, provisión de agua y almacenamiento de reservas. Un sistema radicular sano y vigoroso es importante porque incide directamente en la capacidad de nutrir al árbol y, en consecuencia, de brindarle la máxima estabilidad.

En los suelos donde existen horizontes densos y, en algunos casos, limitaciones por napas y/o compacidad de los mismos, la falta de oxígeno hace que el desarrollo de la mayor parte de las raíces está fuertemente condicionado a explorar los primeros horizontes o solamente el superficial, esto reduce considerablemente la capacidad de anclaje que poseen los ejemplares.

El conjunto de raíces y su cohesión con el suelo, en el que se encuentran, dan por resultado su resistencia al vuelco. Las raíces superficiales actúan como tensores. Las raíces profundas refuerzan el anclaje. (Lell, 2006).<sup>18</sup>

En este sentido, Pire (2007), señala que se debe tener en cuenta que las raíces no solo son el sistema de obtención de nutrientes del suelo, sino que constituyen la estructura natural de sostén. La parte aérea de los ejemplares trabajan como grandes velas al embate de los vientos, y por ello no se deben cortar las raíces periféricas que como riendas trabajan a la tracción y le sirven de anclaje, y cuando esto es ineludible por daños severos superficiales debe reestructurarse el ejemplar colocando las riendas o tensores correspondientes (del mismo lado en que se cortaron las raíces) para evitar riesgos.

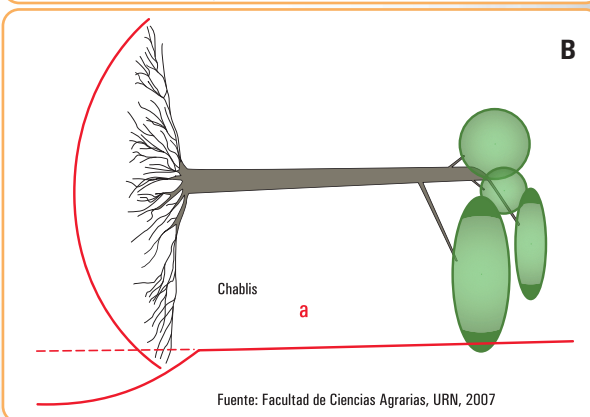
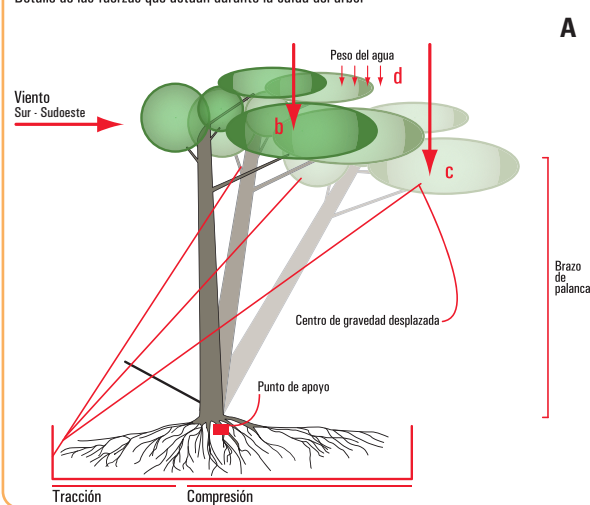
La estructura radicular depende de las especies; en líneas generales las especies se pueden clasificar en dos grupos, uno con raíces superficiales (radiales o en cabellera), y otro con raíz principal profunda (pivotante).

En los árboles arraigados, superficialmente, cuando por la humedad el sustrato pierde cohesión, permite que las raíces escurran por el mismo y surgen así problemas de estabilidad o puede suceder que el pan de tierra se despegue e invierte en un chablis, o puede acontecer ambos procesos combinados (Pire, 2007).<sup>19</sup> (Figura 4.14 B - a).

**Gaps o chablis,** se refiere a una serie de hechos que son desencadenados por la caída de un árbol: la caída misma del árbol, la apertura del dosel que permite la entrada de luz directa hasta el suelo, la exposición del suelo mineral provocada por el levantamiento de raíces, la acumulación de materia orgánica en el lugar donde cae la copa y la presencia de diferentes intensidades de luz, dentro del área de influencia del impacto.

**Cohesión:** se define como la propiedad física de atracción entre partículas lo que da tenacidad y dureza a un suelo, haciéndolo resistente a la separación de sus elementos o a la penetración de las herramientas de corte.

Detalle de las fuerzas que actúan durante la caída del árbol



Fuente: Facultad de Ciencias Agrarias, URN, 2007

Figura 4.14. Detalle de las fuerzas que actúan durante la caída del árbol

<sup>18</sup> Lell, J. (2006) *Arbolado urbano. Implantación y cuidados de árboles para veredas*. Orientación Gráfica Editora SRL. Buenos Aires

<sup>19</sup> Pire, E. F. (2007) Publicación cuatrimestral de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario – ISSN 16698584 – N 22 – 8/2007 y N 23 – 12/2007



*Chablis: término acuñado por Oldeman (1978) que comprende tanto la caída del árbol y el claro resultante en la bóveda del bosque, el debris (detritos o detritus) acumulado y los disturbios en el suelo.*

**La luz.** En cuanto a los factores lumínicos el desarrollo de la copa de los árboles es desparejo y está directamente relacionado con la provisión de luz, en condiciones normales la radiación varía con la latitud, en la llanura pampeana (hemisferio sur) la mayor radiación la reciben las ramas ubicadas al Norte lo que hace que la mayoría de los ejemplares tengan su centro de gravedad desplazado levemente en esa dirección (Pire, 2007). (Figura 4.14 A - b)

*La luz puede tener intensidad, composición y distribución –diaria y anual– muy diversa, según la parte que corresponde a la radiación directa y a la difusa, según la altitud sobre el nivel mar y la latitud, según la absorción selectiva en el aire y en el agua, etc.*

*En las ciudades el factor lumínico natural es alterado por las construcciones, los colores reflectantes o las zonas que sombrean en las distintas épocas del año.*

*Lugares muy sombreados pueden forzar desarrollos desbalanceados que terminan afectando la estabilidad final de los ejemplares.*

**Los vientos y las tormentas.** Los vientos dominantes de la región son de los cuadrantes norte y sur, siendo estos últimos los que provocan mayores daños en el arbolado ya que los primeros son cálidos y tienden a secar la fronda.

Los vientos del sur, que se producen con lluvias, fluidifican el sustrato haciéndolo menos tenaz e incrementan notablemente el peso de la biomasa aérea por la provisión de agua.

El viento norte corre el centro de gravedad que fue desplazado por el crecimiento diferencial por la luz, ubicándolo en su lugar. Mientras que el viento sur agudiza el problema generado por ese crecimiento diferencial.

La mayoría de los ejemplares suelen flexionarse lateralmente y retomar su postura original luego de una fuerte ráfaga, pero en algunos casos cuando el peso de ese centro desplazado, multiplicado por el brazo de palanca del largo del tronco, ejerce mucha presión sobre la zona de anclaje se puede inclinar el fuste. Por este motivo se puede observar en parques y jardines que hay muchos ejemplares con una leve inclinación del fuste hacia el norte.



Imagen 4.2. Fotos mostrando árboles caídos con las raíces que han arrancado el pan de tierra

Se puede entender al árbol como a una estructura cuyas ramas y hojas actúan frenando la acción de los vientos, estas grandes velas tienen un mástil que está implantado en el suelo (el tronco), y su brazo de palanca depende de la altura del mismo.

La estructura de las hojas, ramas y el tronco tienen una elasticidad que les permite resolver los problemas instantáneos que le producen las ráfagas de viento, pero esta misma elasticidad influye en el corrimiento del centro de gravedad del ejemplar. (Figura 4.14 A - c)

A este hecho hay que sumarle los componentes del desplazamiento natural del centro de gravedad

debidas a la latitud y el efecto del peso de las ramas y el follaje mojado, brazo de palanca que pivotando en las raíces a sotavento arrancan las raíces tractoras de barlovento.

A veces cuando la fuerza es muy grande y no logran desprenderse las raíces, arrancan el pan de tierra completo y en casos extremos, cuando la base resiste, el tronco o sus partes se rompen.

*Follaje mojado: las distintas especies tienen distinto peso y diferente nivel de mojado de acuerdo al tipo y madurez de las hojas ramas, etc.*

## 4.2.5. Diagnóstico de riesgos

### 4.2.5.1. Métodos para la identificación de riesgos en árboles urbanos

Los árboles en el medio urbano están expuestos a distintas tensiones (vibración, reverberación solar del asfalto o de los edificios, compactación del suelo). El sistema radicular tiene serias limitaciones tanto por la falta de espacio, como por la poca profundidad y por las excavaciones que se realizan a su alrededor. La estabilidad del árbol no depende, solamente, del desarrollo de su sistema radicular. Es importante la densidad de colonización y la cohesión entre el suelo y las raíces, además incide la superficie expuesta (parte aérea), tamaño, estructura, elasticidad, densidad, simetría, etc. También, la dinámica de esfuerzos a que es sometido y la resistencia de los elementos que lo componen.

Considerando las particulares situaciones en que se encuentran los árboles en un medio urbano, resulta relevante la evaluación preventiva de riesgos para reconocer los árboles que implican peligrosidad, esto mediante el diagnóstico y la determinación de las medidas correctivas.

Dentro de los procedimientos desarrollados en los últimos años se pueden mencionar los siguientes métodos de diagnóstico<sup>20</sup> para determinar la estabilidad del arbolado urbano<sup>21</sup>:

1. Método Inclino - Elastómetro.
2. Método IBA (Integrierte Baum Analyse) (Reinartz & Schiag).
3. Método SIA (Statisch Integrierte Abschätzung der Baumsicherheit) (L. Wessolly).
4. Método VTA (Visual Tree Assessment).

#### 1. Método Inclino - Elastómetro o Elasto Inclinómetro

Una vez que un árbol es considerado peligroso, en una evaluación visual, puede probarse su estabilidad con una prueba de tensión estática también conocida como prueba de tracción.

El proceso se enfoca en dos importantes tipos de fallo:

- a. la seguridad de fractura en el tronco, se obtiene registrando la tensión ejercida en sus fibras (Elastómetro),
- b. la seguridad contra el vuelco, puede ser determinada analizando la inclinación de las raíces con la aplicación de una carga (Inclinómetro).

El Inclino-Elastómetro, permite determinar la seguridad en la fractura y la caída de un árbol al estirarlo mediante un cable de acero y una polea, registrando su reacción bajo una carga mensurable. (Brudi E. 2001)

*Las pruebas de carga estática son un proceso común en ingeniería, cuando la estabilidad de una estructura que tiene que soportar una carga no puede ser determinada solo con el diseño de la construcción. Esto también se aplica en los prototipos de aeroplanos que tiene que sufrir pruebas de carga. La carga es aplicada a sus alas y la deformación del material es medido con un calibre de alta sensibilidad a la tracción.*

<sup>20</sup> Sterken, P. 2005. *Una Hipótesis sobre el Diagnóstico de Estabilidad de Arbolado y Protocolo para el análisis de estabilidad de arbolado mediterráneo*. International Society of Arboriculture, [www.isahispana.com](http://www.isahispana.com)

<sup>21</sup> Villagrán, J. 2000. *Avances científicos y tecnológicos para evaluar la mecánica del árbol*. Conferencia Congreso Nacional de Arbolado Público. San Salvador de Jujuy. En [www.arboladopublico.com.ar/Articulos](http://www.arboladopublico.com.ar/Articulos)



En la prueba de tracción, Iguíñiz Agesta (1992) describe este método como Pulling Test – test de tracción, el árbol es sometido a una carga sustitutiva y su reacción es medida con sensores de alta resolución para la tensión en las fibras marginales del tronco (elastómetro) y la inclinación de las raíces (inclinómetro).

Para analizar la estática de un árbol concreto, el “Pulling – Test” recoge primeramente una serie de datos del árbol, y de su entorno: especie, dimensiones, forma y densidad de la copa, exposición al viento, puntos potencialmente débiles, etc. Con esto se hará un cálculo, lo más exacto posible, de la carga o empuje real del viento sobre la copa del árbol<sup>22</sup>.

A continuación se buscan los puntos débiles, y los puntos donde se aplicarán los elastómetros. Seguidamente, se sujeta en la parte alta del tronco un cable de acero. Este cable se tracciona desde el suelo mediante un “tractel” al que se incorpora un dinamómetro.

Se sujetan al tronco del árbol dos tipos de aparatos:

- varios elastómetros, que van a medir el estiramiento y la compresión de las fibras exteriores de la madera del tronco. Los elastómetros se colocan a las alturas del tronco donde se evidencien o se sospechen debilidades estructurales,
- uno o varios inclinómetros, que se colocan en la parte más baja del tronco, tocando casi el suelo, y van a medir el ángulo de vuelco del sistema de anclaje (base y raíces de anclaje).

Las lecturas de estos aparatos se realizan en sendos lectores digitales.

Finalmente, el tractel empieza a traccionar, y se van anotando a intervalos cortos la fuerza de tracción y la lectura de los inclinómetros y de los elastómetros. Se termina el test antes de que las lecturas alcancen valores cercanos a los límites de rotura.

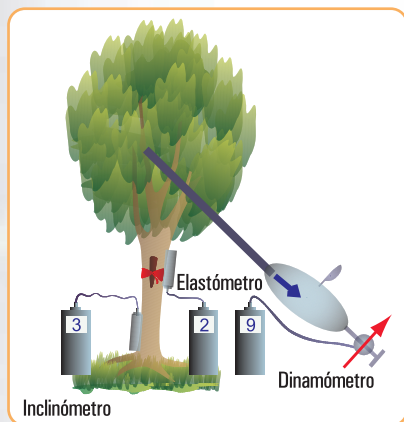


Figura 4.15. Método Inclino – Elastómetro



Imagen 4.3. Elastómetro



## 2. Método IBA (Integrierte Baum Analyse)

Una pared residual muy fina, o una cavidad extensa en el tronco de un árbol, no siempre significan que éste se encuentra en riesgo de estabilidad, depende mucho de las reservas estáticas de las que dispone el árbol.

Es decir, depende mucho del equilibrio entre carga (por viento o peso propio), material (propiedades de la madera verde) y geometría (forma de la estructura que transfiere la carga), como hemos visto en el triángulo de la estática.

El Análisis Integrado de Arbolado parte del hecho de que un árbol vigoroso es capaz, en la mayoría

<sup>22</sup> Iguíñiz Agesta, G. 1992: *Valoración de la Estática Arbórea*; Pulling Test y SIA. Cuadernos de Arboricultura (25.10.2002). [www.arbolonline.org](http://www.arbolonline.org)



de los casos, de establecer un equilibrio entre formación de madera de compensación y destrucción de material por parte de hongos xilófagos.

Este es un método visual y combina tres bases de diagnóstico: la biología, la micología y la estática. Este método se complementa con el análisis de carga.

El diagnóstico se acompaña con instrumentos de alta tecnología, tales como el *Picus* que es un *Tomógrafo Sónico*.

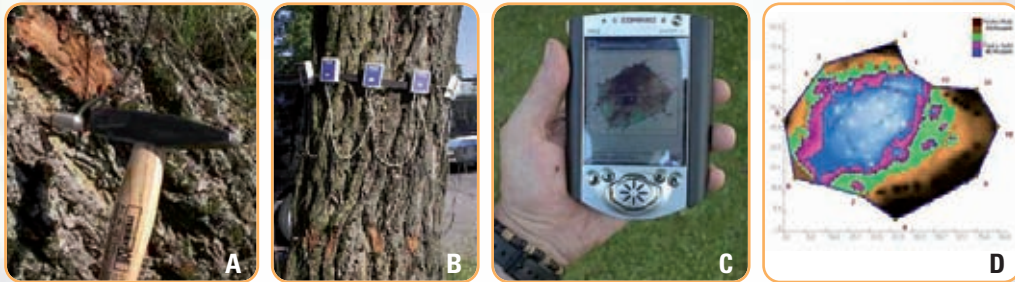


Imagen 4.4. Tomógrafo Sónico

El **Tomógrafo Sónico** es un aparato de testaje de estructura de árboles. Se opera determinando el punto o la altura del árbol donde va a realizarse la lectura y allí se clavan, atravesando un poco la corteza, unas pequeñas puntas metálicas, normalmente entre 10 a 12 (**Figura 4.4 A**).

Cada punta va unida, mediante una cabeza magnética y un cable, a un sensor (**Figura 4.4 B**).

Todos los sensores están unidos entre sí, y están conectados a una unidad central, que a su vez se conecta a un ordenador portátil (**Figura 4.4 C**).

Cuando todo el sistema está conectado aparece en la pantalla del ordenador la gráfica de la sección, con la forma general y la ubicación de cada una de las puntas.

A continuación comienza la emisión y recepción de ondas sónicas. Para ello, se da un ligero golpe en la primera cabeza magnética. El resto de cabezas recibe la señal, y el aparato registra los diferentes tiempos empleados.

La unidad central procesa la información, y asigna a cada punto de la sección del árbol un color en función de la velocidad de transmisión de los “rayos” que pasan por ese punto o por sus cercanías.

Se obtiene una sección coloreada, donde los colores significan el buen o mal estado de la madera (**Figura 4.4 D**).

- marrón oscuro: madera en perfecto estado,
- marrón claro: madera ligeramente alterada,
- verde: estado intermedio,
- rojo: madera muy alterada,
- azul: cavidad.

### 3. Método SIA

Este sistema relaciona la estructura y la capacidad de resistencia a la carga como base para establecer un *Factor de Seguridad*.

*Este sistema fue desarrollado por L. Wesolly y su equipo, y basaron sus cálculos en la ingeniería aplicada para valorar la estabilidad de estructuras diseñadas para soportar cargas.*

La estática del árbol considera tres principales componentes: carga, forma y material.

Los árboles están sometidos a cargas, ante todo por el viento y este es una de las causas más comunes de sus fallos.

La forma y el diámetro de tronco junto con el grado de pudrición identifican la forma en que la carga actúa sobre la estructura.

El diseño de evaluación, se basa en si la carga del viento causa o no, deformaciones críticas en las fibras exteriores de los troncos o en el sistema de anclaje de las raíces.

### **Factor de Seguridad**

*El Coeficiente de Seguridad se calcula en base a dos factores:*

1. *la resistencia del tronco para no fracturar bajo una cierta carga,*
2. *la presión del viento ejercida en la copa durante ráfagas mayores a 100 km/h.*

**1. La resistencia a la flexión de un tronco se calcula considerando:**

- *la geometría que transfiere la carga (diámetro de tronco y grado de daños o cavidades),*
- *propiedades de la madera verde (resistencia a la compresión y módulo de elasticidad).*

**2. La presión ejercida por el viento en la copa se calcula considerando:**

- *la velocidad del viento,*
- *densidad del aire,*
- *temperatura,*
- *coeficiente aerodinámico de la copa,*
- *irregularidad del terreno.*

Una vez determinado el *coeficiente de seguridad* con este valor se califica la resistencia a la fractura del tronco. En general se encuentra que:

- un árbol se considera seguro ante fractura cuando la resistencia que opone es mayor que la carga del viento,
- los troncos esbeltos de árboles altos son más propensos a fracturarse,
- un árbol con un grueso tronco en comparación con la copa, tiene un Factor de Seguridad elevado y, puede estar hueco hasta un cierto punto, sin influir en su seguridad.

*La relación entre el valor correspondiente del diámetro mínimo del tronco requerido para soportar la estructura de la copa y el del diámetro real, permiten calcular el coeficiente de seguridad y eventualmente la necesidad de reducción de algunas partes de la copa.*

### **4. Método VTA (Visual Tree Assessment)**

En este método encontramos dos fases:

#### **1. FASE VISUAL, conocida como EVA (Evaluación Visual del Árbol).**

Se realiza sin instrumental, y consiste en una primera selección visual de ejemplares problemáticos. Se observa principalmente los síntomas exteriores que presenta un árbol que pueden responder a la presencia de anomalías en la madera interior.

#### **2. FASE INSTRUMENTAL, conocida como FRC (Clasificación de Riesgo de Fallo).**

Se desarrolla con instrumental y se clasifican ejemplares problemáticos, por categorías, desde nulo hasta alto riesgo.



## 1. FASE VISUAL – Evaluación Visual del Árbol (EVA)

### 1 > Etapa

En esta etapa se estudia en forma visual el ejemplar a partir de:

- **biología:** salud del árbol,
- **mecánica:** estabilidad (detección de primeros riesgos),
- **estructura:** disposición y proporción entre cuello, tronco y ramas, inspección del estado de las raíces, base, cuello, tronco y copa,
- **estudio de la relación árbol – entorno:** natural o urbano.

### 2 > Etapa

Luego del estudio visual se agregan los siguientes estudios:

- **estado biológico temporal:** fase, ciclo anual, vitalidad, edad ontogénea, otros,
- **estado fitopatológico:** plagas y enfermedades, hongos xilófagos, otros,
- **entorno, aspectos condicionantes:** alteraciones, circulación, pavimentación, edificaciones. Clima. Suelo.

### 3 > Etapa

- **Registro de los datos:** el registro de todos los datos de campo se realiza mediante: anotaciones, grabaciones, filmaciones, fotografías, base de datos, hoja de cálculo, soporte georeferencial, software de gestión.

## 1. FASE VISUAL – Evaluación Visual del Árbol (EVA)

### Detección de defectos y anomalías

Las particulares situaciones en que se encuentran los árboles en general y en particular en los ámbitos urbanos, determinan que es relevante el diagnóstico, la evaluación preventiva y la determinación de las medidas correctivas, de los árboles que implican peligrosidad de caídas o roturas.

Para detectar eventuales casos de riesgo es recomendable la evaluación periódica y sistemática. Debe considerarse además que las situaciones son dinámicas, por ello la evaluación debe hacerse como mínimo dos veces al año.

Podemos realizar algunas descripciones sintéticas de las principales características de defectos y anomalías que se pueden detectar en la evaluación visual:

- troncos con pudrición por el ataque de hongos. Algunas pudriciones avanzan desde el centro a la periferia y se hacen evidentes recién en estados avanzados. En estos casos debilitan la resistencia mecánica de la madera y la pérdida de resistencia mecánica estará en proporción a la madera sana;
- troncos con desarrollo hiperplásico como consecuencia de podas que dejaron muñones y dieron lugar al desarrollo de yemas gemíferas;
- árboles estructurados sobre dos o más ramas sobre las que se han desarrollado varios tallos. En estos casos resultan nocivos los esfuerzos de tracción y de torsión;
- la base del cuello con formación de túmulos de tierra en el área de las raíces, aparición de fructificaciones de hongos, orienta a que la raíz del árbol esté dañada;
- debilitamiento de la copa, inclinación del tallo, tiene importancia en el esfuerzo que debe soportar el tronco y la raíz;
- árboles con estructura compuesta por bifurcaciones o de tallos múltiples, si bien integran una unidad, generalmente tienen un ciclo de oscilación propia no necesariamente coincidente con el del conjunto.

Estos ejemplares presentan en la unión de las bifurcaciones puntos de resistencia más débiles y allí pueden presentar fracturas y roturas.



La debilidad en el área de las bifurcaciones y la diferencia en las oscilaciones explican por qué los árboles bifurcados o los de hábito de crecimiento simpodial sufren roturas con más frecuencia que los que poseen la ramificación sobre un solo tallo.



Imagen 4.5. Tronco. Pudriciones, grietas y fisuras, deformaciones



Imagen 4.6. Base del tronco. Cavidades, aberturas, condominancia, verticalidad, madera de reacción, deformaciones



Imagen 4.7. Base del cuello. Cortes y heridas, cavidades y aberturas, pudriciones, alteración del nivel original





Imagen 4.8. Raíces. Superficialidad, pavimentación, cortes y heridas



Imagen 4.9. Relación raíces y entorno. Deformaciones debidas al contenedor, poco espacio para su desarrollo, defectuosa plantación



Imagen 4.10. Copa. Deformaciones, asimetría, ramas muertas



## 2. FASE INSTRUMENTAL – Clasificación de Riesgo de Fallo (FRC)

### Instrumental derivado para el VTA

#### Martillo de impulsos sonoros

El martillo de impulsos sonoros, es el primer instrumento que se utiliza para determinar la medida de la velocidad de propagación del sonido en el interior de una sección del árbol.

Cuando la madera está libre de defectos, la trayectoria seguida por la señal emitida es recta, mientras que si la madera presenta defectos, la trayectoria de la señal se aparta de la línea recta, ya que debe rodear el hueco o la madera en pudrición, que transmite por el sonido.

Al existir defectos la señal tarda más tiempo en cubrir la distancia que separa el transmisor del receptor, obteniéndose valores más altos en el instrumental de testificación. Estos valores son proporcionales a la extensión del defecto: a mayor pudrición o cavidad, mayor es el tiempo de paso de la señal.

Sin embargo no se puede medir el daño interior o el espesor de la porción sana residual del tronco, que resulta determinante para la estabilidad.

Para esta determinación se utiliza el resistógrafo.



Figura 4.16 a  
*Martillo de impulsos sonoros*

#### Resistógrafo

Mediante el resistógrafo se inserta una aguja en la madera y mide la resistencia a la perforación cuando gira de forma continuada a la velocidad de 1500 r.p.m. La madera descompuesta o en vía de descomposición, se evidencia por medio de los perfiles de densidad. Los decaimientos de densidad causan una reducción de la resistencia mecánica a la perforación.

En el perfil del resistógrafo se puede leer: en las abscisas los milímetros de perforación y en las ordenadas la resistencia a la perforación expresada como densidad.

Estas mediciones tienen la función principal de cuantificar y posicionar eventuales áreas dañadas: en el tronco, en zonas por debajo del cuello y en ramas principales.



Figura 4.16 b  
*Resistógrafo*

#### Fractómetro

El aparato se divide en una parte fija superior y una parte móvil inferior. Entre estas dos partes se encuentra un muelle mecánico de espiral, que mediante unos movimientos giratorios, se carga hasta la rotura.

Las mediciones realizadas permiten averiguar:

- la resistencia a la flexión y a la presión de la madera,
- la evaluación de la madera podrida con la determinación de la rigidez y la resistencia a la rotura.

Los valores obtenidos permiten efectuar la evaluación de las propiedades mecánicas de las fibras de los árboles.

Los valores del fractómetro son característicos para las diferentes especies.



Figura 4.16 c  
*Fractómetro*





¡Qué interesante! Veamos algunos casos que tienen historia.

## 4.3.- Casos con historia

### 4.3.1.- El Ceibo jujeño de Alvear *Erythrina falcata* Benth

La Plaza General Lavalle<sup>23</sup> se destaca por su historia y sus magníficos y notables árboles. Caminando por Tucumán hacia Talcahuano, casi sobre el cordón de la vereda, llama la atención un árbol torcido y ahuecado, se trata del *Erythrina falcata* Benth<sup>24</sup> (Ceibo jujeño), o más comúnmente llamado *árbol jujeño*. Es un "árbol histórico" plantado en 1878 por Torcuato de Alvear.

La especie tiene una altura de 12 m y 4 m de circunferencia de tronco.

Está inclinado, posee tutores y es sometido a tratamientos especiales de mantenimiento, por su edad; es corpulento y florece antes de echar las hojas, con racimos de hermosas flores rojas. Para preservarlo, está sostenido por postes.

La planta ha sido atacada por hongos, formándose en su tronco una gran cavidad<sup>25</sup>, presentando el tronco un hueco donde se puede entrar, se procedió a rellenar la cavidad con revestimientos de hormigón, acoplado a la forma del tronco.



Figura 4.17. Ceibo jujeño de Alvear, *Erythrina falcata* Benth



Imagen 4.11. Árbol histórico de Plaza Lavalle - Ceibo jujeño de Alvear - *Erythrina falcata* Benth

En las imágenes podemos observar la estructura compacta del árbol y el peso de las ramas con sostén que, actúan en gran medida contra la fuerza del viento que lo haría caer, sin embargo, puede suceder que en la época de floración o de fructificación la parte final de algunas ramas bajo la acción del viento o por la disminución de la presión celular debido al peso adicional del fruto, tenga una carga excesiva y se parta. Para evitar esto sería propicio activar y favorecer los mecanismos de autoayuda propios del árbol.

Es importante también, configurar las condiciones del entorno y el emplazamiento del árbol de tal modo que no se le perjudique, sino al contrario que mejore su actual vitalidad. Sobre todo, se deberían evitar intervenciones en los alrededores del árbol.

Se debería dedicar un especial cuidado a las partes dañadas del tronco. Aunque la solución del empaste no es de ningún modo ideal para el crecimiento de la planta, los revestimientos de hormigón, que están estropeados en algunas partes, deberían taparse. Además habría que comprobar *in situ* en qué medida se puede rellenar desde el hueco del tronco, la parte de las raíces de la pared del tronco, con tierra que esté bien aireada. Mediante los controles y las pruebas fitopatológicas, se debe evitar que el resto de la pared primaria del tronco se pudra, realizando posteriormente las medidas correctivas adecuadas.

<sup>23</sup> La Plaza General Lavalle se encuentra emplazada en la zona oeste de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, en el barrio de San Nicolás de Bari, y posee un área de tres manzanas de largo.

<sup>24</sup> *Erythrina falcata* Benth, es una especie propia de la argentina subtropical. Es originario de Tucumán y Salta, en el Noroeste del país.

<sup>25</sup> En la cavidad del tronco pernoctaba un liniero que llegó a prender fuego con graves consecuencias para el árbol.

\* Fotografía: Luciana Parano / Ramiro G. Naya





Una estampilla argentina recuerda al histórico “Ceibo jujeño de Alvear”, centenario ejemplar de la especie *Erythrina falcata* Benth, que fuera plantado por Torcuato de Alvear en 1878, en la Plaza General Lavalle (Buenos Aires), casi sobre el cordón de la vereda por Tucumán hacia Talcahuano.

### 4.3.2.- El drago

El **drago** (*Dracaena draco*) es una especie vegetal típica de la islas aledañas a las Islas Canarias, así como del oeste de Marruecos. Existen especies muy cercanas en el este de África y en algunas islas del Océano Índico.

El ejemplar de drago canario más famoso es el llamado drago milenario de Icod de los Vinos en Tenerife. Actualmente se estima que su edad real oscila entre los 500 y los 600 años.

Otros ejemplares muy conocidos son el drago de Pino Santo en el municipio de Santa Brígida (Gran Canaria), el de Siete-fuentes en Tenerife.

En la isla de Garfia (La Palma) se encuentra la mayor concentración de dragos del archipiélago.

Para los antiguos aborígenes este árbol tenía propiedades mágicas. En la antigua Roma y en la Edad Media era considerado un árbol mágico. Su savia, que se transforma en roja en contacto con el aire (“sangre de drago”), se comercializaba debido a sus propiedades medicinales y a su uso en tintes y barnices.



Figura 4.18. *Dracaena draco*. Familia: Ruscaceae (Dracaenaceae). Género: *Dracaena* - Especie: *Dracaena draco* L

El **drago**: es una planta de lento crecimiento (puede tardar una década en crecer 1 m). Se caracteriza por su tallo único, liso en la juventud y que se torna rugoso con la edad.

El tallo no presenta anillos de crecimiento, por lo que su edad solamente se puede estimar por el número de hileras de ramas, ya que se va ramificando después de la primera floración, aproximadamente cada 15 años.

El árbol está coronado por una densa copa en forma de paraguas con gruesas hojas coriáceas de color entre verde grisáceo y glauco, de 50 a 60 cm de longitud y unos 3 ó 4 de anchura. Puede alcanzar más de 12 m de altura.

Las flores, que surgen en racimos terminales, son de color blanco. Los frutos carnosos, de entre 1 a 1,5 cm, son redondos y anaranjados.

#### Riesgo de caída del drago de Icod de los Vinos

Un antiguo ejemplar del Drago de Icod de los Vinos estaba en peligro de caer y presentaba serio deterioro en la parte inferior de su tronco por hongos y muchos tipos de infecciones. Fueron realizados varios estudios y se hicieron pruebas de carga, de material, y de estructura.

Según los mapas geodésicos, el árbol mide unos 17 m de altura. El diámetro de la copa fungiforme alcanza aproximadamente 20 m. El



Figura 4.19. Drago milenario de Icod de los Vinos



hendido tronco principal, termina a una altura aproximada de 8 m y se divide en este punto, como un candelabro, en siete troncos secundarios que se bifurcan en unas 288 ramas fuertemente articuladas. La parte más joven lleva un copete de hojas lanceoladas y, en algunas partes, flores y frutos en baya.

Una característica peculiar son las raíces aéreas que brotan de la parte baja de las ramas. Varias de estas raíces sirven de soporte para algunas ramas, el resto crece hacia abajo en forma de cuerda o cordón, pegadas al tronco y reforzándolo de este modo. En la cavidad del interior del tronco también se encuentran raíces aéreas de diferente longitud. Algunos cordones se han enclavado en el suelo, realizando así funciones estáticas.

En 1984 el árbol mostraba una enorme cavidad en el tronco y existía peligro de que se quiebre. Luego de un detallado estudio, el especialista en plantas estadounidense Kenneth Allen propuso construir un soporte de acero en el interior del tronco.

En 1994 en la Universidad de Stuttgart, se realizaron distintos estudios para la conservación del histórico ejemplar del drago.



Imagen 4.12. Ramas laterales del drago con raíces aéreas en la parte inferior de la copa



Figura 4.20. Corte longitudinal del drago con el soporte de acero que planeó Allen

*El Prof. Günter SINN con la colaboración del ingeniero H.P. STO-EHREL y el estudiante R. CANTERS, realizaron distintos análisis y estudios en el Instituto de Estática de Modelos de la Universidad de Stuttgart (Institut für Modellstatik der Universität Stuttgart).*

#### **En investigaciones in situ:**

- se descubrió parte de las raíces, se tomaron pruebas de raíces en varios lugares cerca del tronco, se inspeccionó la cavidad del interior del tronco,
- se tomaron pruebas superficiales de la madera (hasta aproximadamente 1 cm de profundidad), esto permite tener alguna indicación sobre la vitalidad del árbol,
- se examinó visualmente el ramaje de la copa del árbol,
- se contaron las ramas para calcular su peso,
- se realizaron pruebas de tracción para determinar la estabilidad de los dragos en otros ejemplares,
- se efectuaron pruebas de resistencia a la rotura en ramas partidas de otro drago, de más de 100 años,
- se realizaron estudios en cortes transversales y se tomaron pruebas de madera para exámenes biológicos y físicos,
- se hicieron pruebas de carga hasta quebrar una rama baja,
- se realizaron mediciones y pesajes de cada parte de dicha rama,
- se tomaron pruebas de la madera para determinar valores típicos del material y características anatómicas.

#### **En investigaciones posteriores:**

- se midió la chimenea (un tubo en el interior del tronco) y la cabeza del tronco (silla de montar) para determinar el grosor de la cabeza del tronco,
- se comprobó la posible invasión de plagas en la chimenea,
- se examinó los empastes de hormigón al pie del tronco en relación a su estado y a su capacidad de carga,
- se comparó las medidas reales del tronco con los dibujos de las secciones que se realizaron con los cálculos de tensión.



**En investigaciones en el laboratorio:**

- se examinaron en el laboratorio las partes de la rama quebrada en la prueba de carga.
- se realizaron los cálculos de tensión producida por el propio peso y por el viento.
- se evaluó la resistencia a la rotura.

Para comprobar la firmeza de los materiales, sobre todo la resistencia a la tracción y a la presión de la madera, así como la densidad de ésta, se examinaron en el laboratorio las partes de la rama quebrada en la prueba de carga.

Estas investigaciones sirvieron de base para los cálculos de tensión producida por el propio peso y por el viento, teniendo en cuenta el momento de resistencia de cada corte vertical.

Los cálculos de tensión permiten, a su vez, sacar conclusiones sobre la resistencia a la rotura.

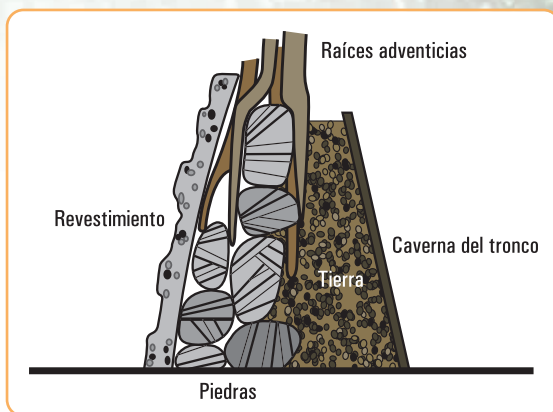


Figura 4.21. Corte longitudinal de una parte dañada del tronco

**Algunas verificaciones *in situ* y primeros resultados**

Una característica peculiar estudiada son las raíces aéreas que brotan de la parte baja de las ramas. Varias de estas raíces sirven de soporte para algunas ramas, el resto crece hacia abajo en forma de cuerda o cordón, pegadas al tronco y reforzándolo de este modo.

En la cavidad del interior del tronco también se encuentran raíces aéreas de diferente longitud. Algunos cordones se hallan enclavados en el suelo, realizando así funciones estáticas entre otras.

En el interior, el tronco está parcialmente hueco y abierto hacia el este, de tal modo que se puede entrar. La parte oeste también tiene una gran superficie abierta, provista de un empaste de hormigón. La cavidad está formada irregularmente y termina hacia arriba en forma de chimenea, es decir, en un tubo natural con un diámetro interior de entre 30 y 40 cm.

**El comportamiento de crecimiento del drago**

Se verificó que, el almacén sustentante del árbol por sí mismo hace que la estática sea óptima.

La madera sometida a torsión falla en primer lugar en el terreno de la presión, puesto que la resistencia a la presión es considerablemente menor que la resistencia a la tracción. La resistencia a la presión del drago supone solamente un tercio de la resistencia a la tracción.

Los troncos secundarios y las ramas del drago muestran, en la parte expuesta a la presión, hinchazones voluminosas que se han formado con capas de pulpa de madera y constituyen un sostén natural.

La rigidez es ideal. Debido a esto, no es necesario, por ejemplo, construir sistemas de seguridad en la copa del árbol. Se puede observar la estructura exterior e interior del árbol y cómo consiguen las ramas, a través de un crecimiento adaptativo, optimizar la estática.

*Las características de crecimiento y de los materiales son decisivas a la hora de estudiar la capacidad de carga de las construcciones naturales.*

*La adaptación es un proceso por el cual los seres vivos logran adecuarse a las condiciones que les impone un ambiente determinado.*

## La estática del drago de Icod de los Vinos

Características de la estructura del árbol: la forma del árbol es similar a la de un hongo. La copa con forma de sombrero es muy espesa y extensa. El ancho de la copa (unos 20 m) supera la altura del árbol (unos 17 m).

El tronco principal tiene forma de cáliz, está hendido varias veces y en gran parte es hueco, se divide a unos 8 m de altura en siete troncos secundarios que se separan formando un ángulo de unos  $30^\circ$  hacia afuera. De los troncos secundarios crecen numerosas ramas laterales que alcanzan una longitud de 6 a 8 m. Las ramas están inclinadas de diferente forma. Al este se nota una interrupción en la línea superior de la copa. Al oeste y al norte la base de la copa es casi horizontal y ligeramente colgante.

Los cortes transversales de las ramas laterales y de los troncos secundarios han crecido con forma de sustentación para soportar la fuerza. La ancha parte inferior y la relativamente delgada parte superior reparten las fuerzas de presión y de tensión de una forma ideal.

La cabeza del tronco tiene forma de una silla de montar arqueada que absorbe las fuerzas de tensión de los troncos secundarios y, de este modo, del total de la copa del árbol.

En lo que a la estática se refiere, la cabeza del tronco y los grandes orificios en la corteza son el punto débil. En la zona de la cabeza del tronco aparecen las mayores tensiones. Por esto, se debe evitar por todos los medios que la parte final de la chimenea del interior del tronco se pudra.

La estructura compacta del árbol, el peso enormemente elevado a consecuencia de la acumulación de agua y las fuerzas de arraigo de las raíces, actúan en gran medida contra la fuerza del viento que lo haría caer.

La seguridad de que el tronco no se parta, es calculada a partir de los dibujos de los cortes transversales del tronco y resulta, suficiente.

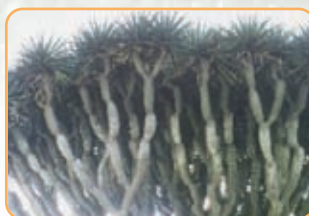


Imagen 4.13. Parte final del drago con forma de botella



Imagen 4.14. Ramas que se elevan en el interior de la copa

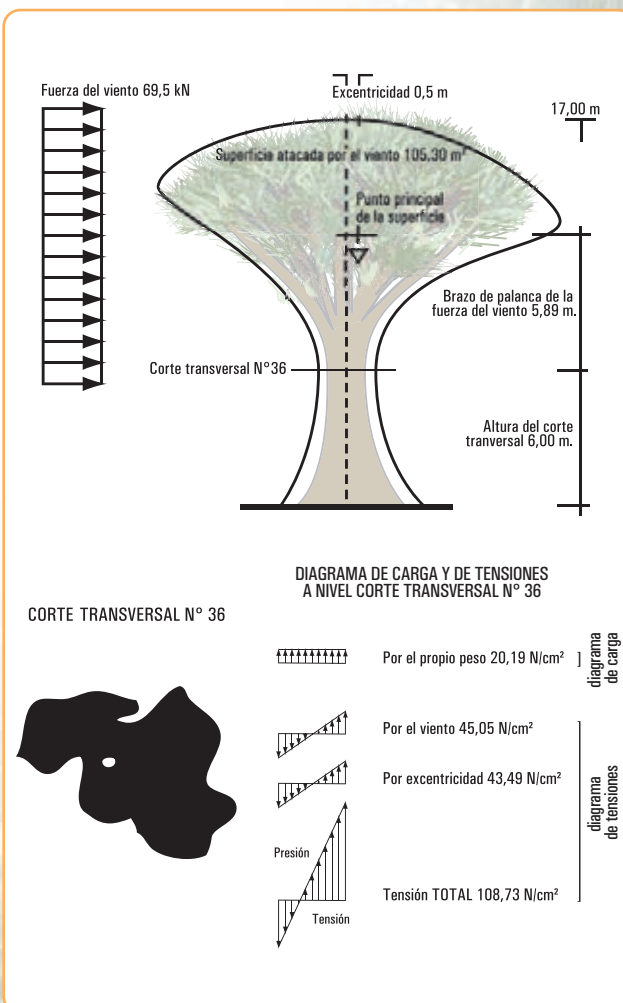


Figura 4.22. Diagrama del cálculo de la resistencia a la rotura del drago, ejemplo del corte transversal nº 36



### La fuerza del viento en el drago

La fuerza del viento que actúa sobre los árboles es un factor muy importante, que influye en la estabilidad y en la resistencia a la rotura. La fuerza que ejerce el viento sobre un cuerpo se averigua mediante la siguiente ecuación:

$$F = cw \cdot q \cdot A$$

$cw$  es el coeficiente de resistencia al aire.

En los árboles depende de la forma de la copa, de la aspereza de la superficie, de la cantidad de hojas y de lo unidas que se encuentran entre ellas.

Para el drago se trabajó con 0,7 para el tronco y 0,6 para la copa. De este modo, se eligió la posibilidad más desfavorable.

$q$  es la presión dinámica.

La presión dinámica es una función compuesta por la densidad atmosférica y por la velocidad del viento. La presión dinámica puede disminuir o aumentar debido a la situación geográfica, a la topografía del terreno, a los alrededores del árbol y a las ráfagas de viento.

Esto se tuvo en cuenta en los cálculos de la fuerza del viento, haciendo los planteamientos apropiados. También se tuvo en cuenta la altura del lugar.

$A$  es la superficie soplada por el viento, el tronco y la copa.

En los cálculos de la fuerza del viento que actúa sobre los árboles también hay que tener en cuenta las características de las oscilaciones.

Para el drago un corte seccional, sirvió de base para calcular la superficie del tronco y de la copa soplada por el viento.

Los resultados de estos cálculos fueron 32,82 m<sup>2</sup> para la superficie del tronco y 93,40 m<sup>2</sup> para la de la copa.

Con estos valores, y teniendo en cuenta la topografía y los alrededores del árbol, es decir, la distancia de avance del viento, se obtiene un momento de carga por el viento, para la altura del drago, de 575,25 kNm.

Jose Antonio

## Epílogo

En este capítulo desarrollamos el concepto de estática aplicado, específicamente, a los árboles.

Para este estudio se tomaron en cuenta los factores que afectan la estabilidad de los mismos y hasta qué límites llega su resistencia.

En busca de poder dar al lector la posibilidad de una mirada comprensiva se explicitaron características de las plantas en general. Vimos que la anatomía interna de los vegetales está relacionada con su capacidad para soportar cargas mecánicas.

Recorrimos, brevemente, algunos usos y características de los árboles, tal como los observamos en la vida cotidiana. En la ciudad, los árboles integran el paisaje cotidiano en calles y plazas. En el campo se distinguen como importantes barreras forestales, como refugio o en el uso de la madera con fines industriales.

Esta presencia cotidiana nos recuerda que además de sus procesos dinámicos, los árboles sufren la acción de elementos que condicionan su vitalidad y su estabilidad.

El núcleo del capítulo fue, justamente, el análisis de estabilidad del arbolado forestal, los momentos críticos, las posibilidades de fractura. Para ello se consideraron, además, algunas relaciones con factores ambientales que los afectan y pueden provocar su caída.

Se realizó, en base a las consideraciones efectuadas, un breve diagnóstico de riesgo y se describieron métodos sencillos para identificar el riesgo en el arbolado urbano. Vimos también cómo algunos de estos procedimientos requieren del uso de instrumental de testificación para detectar deficiencias internas.

El habitante de la ciudad puede apreciar cuando transita cotidianamente, por las calles y plazas, árboles nuevos y pujantes, y también añosos ejemplares, algunos sólidos, otros en decadencia, maltratados por el ambiente y por el hombre.

Para una mejor comprensión se agregaron algunas historias de arbolado urbano; pudimos observar en esta breve, e incompleta cita, ejemplares centenarios en riesgo, pero aún arrogantes. De su estudio y del deseo de preservarlos surgieron importantes aportes para el estudio y análisis de las fuerzas estáticas en este aspecto de la vida cotidiana.

*... y llegamos a nuestro hábitat  
¡sigamos!*

