

Unidad 10 – Humedad del combustible

OBJETIVOS:

Al completar esta unidad, los estudiantes serán capaces de:

1. Definir la humedad crítica del combustible vivo y los umbrales para varios tipos de combustible.
2. Identificar tres métodos para obtener la humedad del combustible vivo.
3. Describir las relaciones entre la humedad relativa, viento y contenido de humedad de los combustibles finos y gruesos.
4. Explicar cómo la cantidad y duración de la precipitación y la humedad del suelo afectan el contenido de humedad de combustibles finos y gruesos.
5. Definir el concepto tiempo de retardo de la humedad del combustible y su importancia para los combatientes de incendios y manejadores de fuego.
6. Describir cómo se determina la humedad de los combustibles muertos en cada una de las cuatro categorías de tiempo de retardo.
7. Definir la humedad de extinción, como varía en los grupos de combustibles naturales, y cómo afecta a la ignición y propagación de los incendios forestales.
8. Determinar el contenido de humedad del combustible para combustibles finos muertos de 1 hora de tiempo de retardo con las tablas de humedad del combustible en condiciones de luz diurna.

I. HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE

El contenido de humedad del combustible en combustibles naturales es un factor importante para la disponibilidad de los combustibles para la ignición del fuego y la combustión. La mayoría de los conjuntos de combustible contienen una combinación de combustibles muertos y vivos; por lo tanto, un rango amplio de contenidos de humedades está presente dentro de estos combustibles.

Dado que no todos los combustibles pueden estar implicados en el frente de llamas o ser consumidos por el fuego, nuestro análisis de conjuntos de combustible debe determinar que combustibles serán responsables de la propagación del fuego.

A. Combustibles naturales y su contenido de humedad

Los conjuntos de combustible varían mucho según las zonas o regiones con límites que van desde vegetación esparcida en desiertos, a bosques tropicales con vegetación exuberante, hasta bosques secos maderables. Si consideramos cada uno como de ellos como un ambiente potencial de fuego, nuestras evaluaciones inmediatas deben incluir análisis de combustible y contenidos de humedad de este.

Podríamos esperar que los combustibles del desierto estén secos por periodos extendidos, pero ¿hay suficiente combustible para conducir el fuego? Los bosques tropicales tienen abundantes combustibles que están generalmente demasiado húmedos o demasiado verdes para arder; pero, con poca frecuencia estas áreas tienen incendios.

Los prolongados periodos de sequía durante el verano hacen que ocasionalmente nuestros bosques sean extremadamente secos, a veces, al punto de ser “explosivos,” en caso de que ocurran incendios. Generalmente, cuándo el contenido de humedad del combustible es alto, los incendios se encienden y arden con dificultad, sí es que lo hacen; y cuando el contenido de humedad es bajo, los incendios inician fácilmente y se propagan y arden rápidamente.

Los contenidos de humedad del combustible están frecuentemente situados entre los dos extremos y fluctúan con los cambios en la meteorología y las estaciones anuales. Durante las temporadas normales de incendios forestales, los combatientes de incendios y los manejadores de fuego han experimentado momentos en los que los fuegos de rápida propagación se detienen repentinamente e incluso se extinguen, debido a cambios de combustibles y contenidos de humedad.

Estos combustibles pueden haber estado en exposiciones diferentes, haber tenido una época de deshidratación más tardía o experimentado un repentino cambio de humedad relativa.

B. Definición

El contenido de humedad del combustible es la cantidad de agua en un combustible, expresada como un porcentaje del peso del combustible después de ser secado en el horno.

Si ni hubiera nada de humedad en los combustibles, como si se secaran en un horno, el contenido de humedad del combustible sería cero por ciento.

Los combustibles deben ser pesados antes y después de ser secados en un horno, y el porcentaje puede ser determinado dividiendo la diferencia entre los pesos húmedo y seco, entre el peso seco.

C. Tipos de humedad del combustible

Hay dos tipos de humedad del combustible que son relevantes.

1. Humedad del combustible vivo es la humedad en todas las plantas vivas.

Una célula viviente puede contener hasta tres veces su peso en agua.

- El contenido de humedad en estos combustibles puede oscilar entre el 30% y el 300%.
- Estas variaciones son atribuibles a los cambios de estación, exposición y diferencias particulares de las especies.

2. El combustible muerto incluye plantas muertas como pastos anuales, así como plantas leñosas muertas, residuos que se encuentran en el bosque y desechos de aprovechamientos.

- La humedad en estos combustibles puede oscilar entre el 2% y el 30%, y puede cambiar rápidamente tanto en tiempo como en espacio.
- Serán más directamente influenciados por los cambios en la meteorología y la topografía.

D. Cómo la humedad del combustible afecta a la combustión

La humedad del combustible juega un papel fundamental en el inicio y propagación de los incendios forestales. Cuando un combustible arde, en realidad son de hecho los gases los que se están ardiendo.

En un combustible orgánico sólido, como el típico combustible forestal, la temperatura a la que se generan los gases inflamables es alrededor de 204 °C.

Pero ¿a qué temperatura el agua se convierte en gas? 100 °C.

Cuando un combustible es calentado, primero empieza a liberar vapor de agua una vez que se acerca a los 100 °C.

Este proceso consume energía de la fuente de ignición y los vapores de agua diluyen los gases inflamables.

Si la fuente de ignición tiene suficiente energía, eliminará bastante de la humedad del combustible hasta el punto donde los gases inflamables de los combustibles puedan sostener la combustión.

Antes de que un combustible pueda arder, la humedad del combustible debe ser convertida en vapor a través del proceso de calentamiento.

Entre más alto es el contenido de humedad, mayor es la temperatura requerida para secar el combustible.

La presencia de combustible húmedo puede afectar la velocidad y dirección de propagación de un incendio forestal. Un alto contenido de humedad retarda el proceso de combustión, ya que el calor del fuego debe primero eliminar la humedad.

Recuerde, el contenido de humedad del combustible es uno de los siete factores ambientales de áreas forestales que deben ser continuamente monitoreados por razones de seguridad.

II. HUMEDAD CRÍTICA DEL COMBUSTIBLE VIVO Y LOS UMBRALES PARA VARIOS TIPOS DE COMBUSTIBLE

El contenido humedad de los combustibles vivos puede tener un efecto considerable sobre el comportamiento del fuego.

Si la humedad de los combustibles vivos es alta, como durante la primavera cuándo el follaje es nuevo, entonces los combustibles vivos pueden no arder del todo.

Al final del verano o en otoño, los combustibles vivos pueden alcanzar niveles dónde pueden tener una contribución importante y explosiva en el comportamiento del fuego en general.

A. Combustibles vivos

El combustible vivo incluye plantas herbáceas y material de vegetación leñosa.

1. Las plantas herbáceas son perennes (brotan desde la base), o anuales (se desarrollan de semillas cada año).

Las plantas herbáceas son relativamente blandas o suculentas y no desarrollan tejido leñoso persistente.

El material vegetal leñoso es lo suficientemente pequeño para ser consumido en el frente de llamas de un incendio; esto incluye principalmente hojas, acículas y ramillas. Las plantas herbáceas mueren cada año, produciendo así más combustibles finos muertos.

En el caso de los pastizales, las plantas perennes suelen desecarse después que las anuales; esto es un factor importante a la hora de evaluar el potencial de fuego. Todos los combustibles vivos tendrán características diferentes, las cuales influirán en su momento en cómo se encenderán y arderán.

Por ejemplo, sus propiedades fisiológicas determinarán la forma en que absorben y almacenan la humedad del ambiente, especialmente del suelo. Su contenido químico influye en qué tan inflamable y a qué temperatura sus gases inflamables se encenderán.

2. Las plantas caducifolias producen combustibles finos y muertos; mientras que la mayoría de las plantas perennifolias, que conservan sus hojas o acículas más de una temporada pueden tener contenidos de humedad considerablemente reducidos.

La vegetación leñosa de coníferas también produce combustibles finos muertos a través de la caída de acículas.

B. Variaciones en combustibles vivos

Los niveles de humedad de los combustibles vivos cambian relativamente lento con el tiempo, pero puede variar significativamente a lo largo del territorio.

1. El contenido de humedad en el nuevo crecimiento de las plantas sigue un patrón general.
 - Cuando el crecimiento de la planta empieza en primavera, el contenido de humedad del nuevo material vegetal aumenta rápidamente hasta un valor máximo.
 - Este valor máximo es a menudo mayor que el 200% de su peso en seco.
 - El contenido de humedad en el follaje más viejo y ramillas también incrementa, pero alcanza un valor máximo más bajo que aquel encontrado en el crecimiento nuevo.
 - Los incrementos en el contenido de humedad en las raíces leñosas más grandes y los troncos son relativamente bajos.
 - El contenido de humedad en los nuevos brotes se mantendrá alto siempre que se disponga de la humedad adecuada.
 - Durante el verano y otoño, el contenido de humedad disminuye hasta que alcanza un mínimo.

2. El nivel de humedad permanece en un nivel generalmente bajo hasta que el ciclo de crecimiento comienza nuevamente en la primavera.

Este ciclo de humedad de combustible vivo puede fluctuar.

Cuando consideramos especies de plantas específicas y sitios específicos, pueden ocurrir variaciones significativas en este patrón.

Estos cambios pueden tener lugar debido a:

- Actividad fisiológica de las plantas
- Humedad del suelo (influenciado por agua subterránea, arroyos y precipitación)
- Temperatura del suelo
- Humedad y temperatura del aire

Algunos otros factores menos dinámicos que pueden afectar la humedad del combustible vivo pueden incluir la exposición, la inclinación de la pendiente y la altitud.

3. Durante el invierno y a principio de la primavera, si la precipitación es deficiente, habrá menos crecimiento nuevo y el contenido máximo de humedad será más bajo de lo habitual.

La disminución de la humedad después del valor máximo será más rápida y puede lograr un punto más bajo al final del verano o en el otoño.

Las temperaturas del suelo y del aire afectan el momento en que comienza el nuevo crecimiento y se alcanza el nivel máximo del contenido de humedad.

Cuando el tiempo atmosférico al final del invierno y la primavera es cálido, el nuevo crecimiento iniciará antes y muy a menudo obtiene un mayor contenido de humedad.

Las condiciones climáticas frías generalmente provocan que suceda lo contrario.

En ambientes continentales sub-árticos, como Alaska, este patrón general puede retrasarse a medida que el aumento de la radiación solar libera más agua del suelo congelado a medida que avanza el verano.

El nuevo crecimiento o follaje nuevo inicialmente tiene un contenido de humedad muy alto a principios del verano, pero disminuye rápidamente a medida que este avanza.

C. Vegetación herbácea perenne y anual

La vegetación herbácea perenne y anual, como los pastos, es uno de los principales causantes de los problemas de incendios en muchas zonas del país.

La cantidad de vegetación y la época de desecado normalmente varía de un año a otro. Algunos pastos perennes nunca se desecan.

1. En el grupo de combustible de pasto, la relación entre pasto vivo y muerto influye en gran medida en la propagación del fuego.
 - Normalmente, al menos $\frac{1}{3}$ de los pastos deben estar muertos antes de que el combustible pueda conducir el fuego.
 - El color del pasto puede ser utilizado, con precaución, como un indicador del desarrollo vegetativo.
2. Una de esas especies es *Bromus tectorum*, comúnmente llamada pasto espiguilla o avena anual.

Aunque es más común en áreas secas del oeste, puede ser encontrado en casi todos los estados (EUA) y está presente en la mayoría de los continentes del mundo.

El pasto espiguilla es uno de los principales factores que normalmente determina la severidad de las temporadas de incendios en la Gran Cuenca de los Estados Unidos.

Los rodales de pasto espiguilla normalmente se desecan a principios del verano para producir abundantes, finos y vistosos combustibles, que a menudo se describen como "explosivos" cuando la humedad del combustible es muy baja.

En algunos tipos de combustible, la coloración de la planta es un excelente indicador de su etapa de desarrollo y de su variación probable de contenido de humedad.

A medida que el pasto espiguilla entra a su etapa de desecación, cambia de verde a púrpura; después, finalmente adquiere un color amarillento a medida que se deshidrata y su contenido de humedad disminuye y varía con los factores climáticos cambiantes.

Tenga en cuenta que la humedad del combustible en la etapa viva está por arriba del 100%; en la etapa de deshidratación o de transición, entre el 30 y el 100 %; y la fase final (muerto) por debajo del 30 %.

Normalmente el fuego no se propaga a través del pasto espiguilla hasta que alcanza su estado final (muerto) y el contenido de humedad cae por debajo del 30%.

El contenido de humedad en las tres etapas para pasto espiguilla parecería ser algo más bajo que los indicados en las estimaciones de combustible vivos. Esto debe usarse sólo como guía general, ya que habrá alguna variación según la especie.

D. Modelos de combustible con combustibles vivos

Una de las herramientas para ayudar a entender y pronosticar el papel de los combustibles vivos en el comportamiento del fuego puede ser encontrada en los modelos de combustible.

Cinco de los 13 modelos de combustible contienen combustibles vivos que pueden contribuir significativamente al comportamiento del fuego.

- Hay un modelo herbáceo (pasto), el modelo de combustible 2, el cual es bosque con sotobosque de pastos.

- Hay tres modelos de combustible para arbustos con un componente de combustible vivo:
 - Modelo de combustible 4, que es chaparral de 1.8 metros
 - Modelo de combustible 5, que son arbustos generalmente de 0.6 metros de altura
 - Modelo de combustible 7, que incluye la vegetación enmarañada del sur de Estados Unidos.
- Hay un modelo de residuos de bosque, el modelo 10 tiene un componente significativo de combustible vivo en su sotobosque.

E. Fuegos de copa

Una de las formas más significativas en la que los combustibles vivos impactan en el ambiente del fuego es a través de los fuegos de copa.

Los fuegos de copa son aquellos que involucran a las copas o doseles vivos de árboles y matorrales.

Generalmente, para que los fuegos de copa ocurran es necesario tener suficiente fuego superficial en los combustibles muertos y una humedad del combustible vivo suficientemente baja en la copa.

La humedad de los combustibles vivos generalmente cambia lentamente con el tiempo en respuesta a los cambios estacionales y a las condiciones meteorológicas a gran escala.

Hay una excepción a esto durante un incendio: el precalentamiento por el mismo fuego.

Es importante tener en cuenta que la capacidad de los combustibles vivos para encenderse y arder agresivamente puede cambiar a lo largo del periodo de combustión a medida que el fuego superficial incrementa en intensidad y proporciona un adecuado calentamiento por convección y radiación de los combustibles vivos.

Los investigadores han analizado varios combustibles y han determinado algunas humedades críticas de los combustibles vivos. Las humedades críticas del combustible vivo pueden ser definidas como *el contenido de humedad en el que ocurren incendios forestales sostenidos, de rápida propagación y alta intensidad.*

Estas generalidades deben servir como puntos de advertencia de cuándo los combustibles vivos empiezan a acercarse a los porcentajes indicados. El ambiente del fuego en su totalidad debe ser considerado porque otros factores como la velocidad del viento, pendiente y humedad de combustible muerto pueden tener efectos que aporten o supriman la actividad del fuego.

III. TRES MÉTODOS PARA OBTENER HUMEDADES DEL COMBUSTIBLE VIVO

A. Estimación basada en la época del año

Puesto que los combustibles vivos generalmente responden a cambios estacionales, puede ser útil estimar la humedad del combustible vivo en función de la época del año.

El apéndice B del manual de la línea de fuego tiene una tabla que correlaciona las etapas de crecimiento, la época del año y la humedad promedio del combustible vivo (estos datos son aproximados para un año promedio).

Deberá estar al tanto de sus condiciones locales para saber cómo la humedad real de los combustibles vivos en su área puede ser diferente de lo que se sugiere en la tabla.

Esas etapas y sus contenidos de humedad promedio son un factor que contribuyen a determinar el potencial de fuego.

Los siguientes factores pueden contribuir a una temporada de incendios o condiciones de combustión anormales al disminuir el contenido de humedad en los combustibles vivos y/o generar combustibles muertos adicionales en un conjunto de combustibles.

- Periodos de sequía larga
- Insectos y enfermedades
- Secado de plantas anuales a principios de la temporada.
- Aprovechamientos de madera y otra vegetación
- Vegetación derribada por viento o por tormentas de nieve

B. Colección de muestras

El método más preciso para la determinación de humedad del combustible vivo es recolectar y analizar muestras de nuestra área de interés.

Asegúrese de tomar muestras del crecimiento actual (del año), así como el crecimiento perenne más viejo.

Durante la selección de muestras, también se debe tener en cuenta la elevación, la exposición y las diferencias entre las especies.

Una vez colectadas, péseles, séquelas y péseles de nuevo.

Usar la fórmula estándar para calcular la humedad del combustible:

$(\text{Peso húmedo} - \text{peso seco}) / \text{peso seco}$

C. Fuentes de datos en línea

El sistema de evaluación de incendios forestales (WFAS por sus siglas en inglés) proporciona diversos datos sobre temas como:

- Humedad del combustible vivo
- Índices de sequedad
- Verdor relativo

Puede ser muy útil para conocer la humedad del combustible vivo en su área de interés en un momento específico.

IV. RELACIONES ENTRE HUMEDAD RELATIVA, VIENTO Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE COMBUSTIBLES FINOS Y GRUESOS

A. Intercambio de humedad del combustible con la atmósfera

El agua siempre se mueve de concentraciones altas a concentraciones bajas, en un esfuerzo constante por establecer un equilibrio. Esto se llama Ósmosis.

1. Los combustibles están constantemente intercambiando humedad con el aire circundante.
 - Durante periodos de alta humedad y precipitación hay una ganancia neta en la humedad del combustible.
 - Cuando el aire es seco, con baja humedad, los combustibles ceden más humedad al aire que la que reciben.
2. Varios factores influyen en la tasa de intercambio de humedad entre los combustibles y el aire:
 - Diferencia de presión de vapor de agua entre los combustibles y el aire
 - Presencia o ausencia de viento
 - Tamaño de los combustibles
 - Compactación de los combustibles
 - Proximidad de los combustibles al suelo húmedo

B. Contenido de humedad de equilibrio

Si el contenido de humedad en la atmósfera permanece constante por un periodo de tiempo, los combustibles y el aire eventualmente alcanzarían presiones de vapor iguales.

Esto se denomina contenido de humedad de equilibrio, esto ocurre cuando no hay pérdida ni ganancia neta de humedad entre los combustibles y el aire circundante. Esto puede ocurrir en combustibles pequeños y finos; pero raramente ocurre en combustibles más grandes, ya que el tiempo requerido para lograr el equilibrio es mucho más largo.

C. Los factores ambientales que influyen en la humedad del combustible

La humedad del combustible está directamente influenciada por la temperatura, la humedad relativa y la precipitación. El viento altera el intercambio de humedad entre los combustibles y el aire.

Otros factores locales del tiempo atmosférico y la topografía influyen en la temperatura atmosférica y la humedad relativa. Cada uno de estos factores locales afectan indirectamente la humedad del combustible y deben ser considerados al hacer las estimaciones del contenido de humedad del combustible.

1. Los efectos de sombreado versus los efectos del no sombreado en la temperatura de los combustibles

Durante las horas soleadas del día, la temperatura en la superficie terrestre puede alcanzar 71°C en áreas sin protección al sol, pero puede ser considerablemente menor en áreas con sombra.

Esa temperatura disminuye muy rápidamente a pocos metros por encima de la superficie donde el aire se mezcla. A 1.5 m por encima de la superficie, la temperatura del aire puede alcanzar los 30 °C, tal como se observa en la caseta de una estación meteorológica.

La humedad relativa es mucho más baja donde las temperaturas alcanzan los 71 °C; por lo tanto, en este ejemplo, la humedad del combustible fino muerto en la superficie será considerablemente más baja (3%) en áreas descubiertas y sin sombra que en áreas sombreadas (8%).

2. Exposición

Las laderas sur evidentemente reciben más calentamiento durante el día que las laderas norte, entonces:

- Las temperaturas son más altas
- La humedad relativa es más baja
- La humedad del combustible normalmente es más baja en las laderas sur

Durante el verano, los terrenos planos reciben aproximadamente el mismo calentamiento intenso que las exposiciones sur. Cuando oscurece, las diferencias de temperatura entre las diferentes exposiciones disminuyen.

A primera hora de la mañana, los valores de temperatura, humedad relativa y humedad de los combustibles finos se han estabilizado en su mayoría.

Por la noche, las temperaturas en las laderas sur y en los fondos de los valles pueden ser muy diferentes debido a las inversiones superficiales y a los efectos de los cinturones térmicos.

Las laderas este alcanzan el menor contenido de humedad del combustible al inicio de la tarde; mientras que las exposiciones suroeste tienen los contenidos de humedad del combustible más bajo de la tarde.

Normalmente, las exposiciones sur y suroeste tienen el promedio más bajo de contenido de humedad del combustible.

3. Elevación

El gradiente térmico “normal” aceptado es una disminución aproximada de 0.6 °C por cada 100 metros de incremento en la elevación.

A medida que la temperatura disminuye con la elevación, la humedad relativa aumenta. Junto con las fechas tardías de derretimiento de la nieve, las fechas tardías de deshidratación y la relación más alta de combustible verde a muerto en altas elevaciones, las diferencias generales de humedad del combustible pueden ser muy importante para la ignición del fuego y las velocidades de propagación.

D. Pendiente

La inclinación de la ladera es un factor en la cantidad de radiación solar recibida en distintas exposiciones. Esto afecta el contenido de humedad del combustible en distintas laderas.

Las superficies perpendiculares a la radiación entrante reciben considerablemente un mayor calentamiento que las laderas casi paralelas a estos rayos del sol.

El ángulo con el que la radiación solar incide en distintas superficies cambia a lo largo del día y con la época del año.

La inclinación o porcentaje de pendiente en exposiciones norte es particularmente importante, ya que puede haber épocas del año en que estas pendientes no reciben ningún calentamiento solar directo.

E. Viento

El viento es un factor que influye en la humedad del combustible, ayudando a los combustibles a alcanzar el contenido de humedad de equilibrio con la atmósfera a un ritmo más rápido.

¿Cómo los vientos aceleran el proceso de secado o evaporación?

Durante condiciones de aire en calma, el aire cerca a los combustibles tiende a saturarse de vapor de agua, lo que disminuye el índice de evaporación de la humedad del combustible.

El viento remueve este aire saturado, reemplazándolo continuamente por aire más seco y acelerando así, el proceso de evaporación. Pero los vientos moderados o fuertes pueden afectar las temperaturas superficiales de los combustibles a la intemperie y, por lo tanto, influir en la humedad superficial del combustible.

Durante el calentamiento diurno, el viento puede reemplazar las capas de aire cálido directamente adyacentes a la superficie de los combustibles por aire más frío. Esto incrementa la humedad relativa en esa zona y reduce la temperatura superficial del combustible. Por lo tanto, el secado del combustible se reduce.

Por la noche, la mezcla turbulenta puede impedir que las temperaturas del aire superficial alcancen el punto de rocío, restringiendo así el aumento de humedad superficial del combustible.

Los vientos Foehn son frecuentemente referidos como vientos desecantes porque a menudo van acompañados de un secado rápido de los combustibles. En el caso del viento Foehn, este es aire cálido y extremadamente seco que es responsable de la desecación.

La función importante del viento Foehn es mantener ese aire caliente y seco fluyendo a gran velocidad para que no se humedezca por contacto con la superficie ni de día ni de noche.

Cuando los vientos húmedos soplan sobre los combustibles secos, traen un aporte continuo de humedad para mantener un gradiente de presión favorable al incremento de la humedad del combustible. Recuerde, el viento tiene efectos muy variados y complejos sobre la humedad del combustible.

V. CÓMO LA CANTIDAD Y DURACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y LA HUMEDAD DEL SUELO AFECTAN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS COMBUSTIBLES FINOS Y GRUESOS

La precipitación puede incrementar la humedad del combustible fino muerto más rápidamente que cualquier otro factor. La cantidad y duración de la precipitación son consideraciones al pronosticar los incrementos de humedad del combustible en diferentes tamaños de combustibles.

A. Combustibles finos muertos

Los combustibles finos muertos reaccionan muy rápido a la precipitación y alcanzan su punto de saturación rápidamente.

- Una precipitación adicional tiene poco efecto en los combustibles.
- Mayor cantidad de precipitación puede ser responsable de humedecer los suelos en contacto con los combustibles, manteniéndolos así, más húmedos por un período más largo y prolongando los efectos de la precipitación.

B. Combustibles gruesos muertos

Los combustibles gruesos muertos reaccionan más lentamente a las precipitaciones ya que gran parte de la lluvia puede escurrirse del combustible.

- Los combustibles continúan absorbiendo humedad durante la duración de la precipitación.
- La duración es más importante que la cantidad.

C. Comparación de los efectos de la duración de la precipitación

El eje horizontal representa las horas de precipitación continua, mientras que el eje vertical es el contenido de humedad del combustible en porcentaje.

La línea discontinua que representa los combustibles (finos) de 1 h de tiempo de retardo, comienza con un 5 %, aumenta rápidamente, y alcanza un contenido de humedad de 30% en la primera hora.

La línea discontinua que representa los combustibles de 10 h de tiempo de retardo inicia en 8% y aumenta a un ritmo más lento, pero alcanza un contenido de humedad de 30% después de 6 horas.

La línea continua, que representa los combustibles (gruesos) de 100 h de tiempo de retardo, comienza en 12% y sólo alcanza el 20% después de 16 horas de precipitación continua.

Los datos utilizados para elaborar este gráfico representan situaciones promedio de los combustibles del oeste de Estados Unidos con combustibles muertos en pie y caídos.

Aunque las lluvias fuertes penetran mejor en la copa de los árboles para llegar a los combustibles del sotobosque, el rango de absorción de la humedad de los combustibles es en su mayoría constante.

En consecuencia, las cantidades excesivas de lluvia escurren por los combustibles. Una llovizna penetrará mejor en los combustibles que una humedad relativa alta en el aire. Tener agua disponible en la superficie de los combustibles induce un mayor rango de absorción que las altas humedades en el aire.

VI. EL CONCEPTO DE TIEMPO DE RETARDO DE LA HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE Y SU VALOR PARA LOS COMBATIENTES DE INCENDIOS Y LOS MANEJADORES DEL FUEGO

A. Definición

El tiempo necesario bajo condiciones específicas para que una partícula de combustible pierda aproximadamente 63 % de la diferencia entre su contenido de humedad inicial y su contenido de humedad de equilibrio.

Cuando se toma la temperatura corporal por vía oral, el termómetro debe dejarse bajo la lengua durante aproximadamente tres minutos para que el instrumento pueda adaptarse al nuevo ambiente.

Tres minutos es el tiempo de retardo de un termómetro oral.

1. El tiempo de retardo es un hecho común en la naturaleza.
 - Los combustibles requieren un período de tiempo para estabilizarse.
 - La ganancia o pérdida de humedad no ocurren a un ritmo constante.
 - Cuando las condiciones cambian, los combustibles responden rápidamente al principio.
2. El cambio en el contenido de humedad se vuelve más lento a medida que la humedad del combustible se acerca a al contenido de humedad de equilibrio.
 - En la naturaleza, el combustible necesita cinco periodos de tiempo de retardo para que se produzca el 95% del cambio, pero la mayor parte del cambio se produce en el primer periodo de tiempo de retardo.
 - Con una mayor relación área superficial - volumen, el tiempo de retardo de los combustibles finos es corto y alcanzan su humedad de equilibrio rápidamente.

3. Los combustibles gruesos tienen un tiempo de retardo más largo.
 - No alcanzarán un contenido de humedad de equilibrio si las condiciones ambientales no permanecen constantes.
 - Aun así, vale la pena clasificar los combustibles según su tiempo de retardo.

B. Relación entre el tiempo de retardo y el tamaño del combustible

1. El tiempo de retardo está relacionado con el tamaño del combustible

En el eje horizontal, tenemos el diámetro de las ramas en centímetros.

El eje vertical nos da el tiempo de retardo en días.

- Combustibles de 3.5 cm de diámetro tienen un tiempo de retardo de 48 horas o dos días.
- Combustibles de 5 cm de diámetro tienen un tiempo de retardo de 4 días y así sucesivamente.

Esto significa que si el aire se mantuviera en un punto constante más seco que los combustibles, se tardaría cuatro días para que ramas de 5 cm pierda $\frac{2}{3}$ de la diferencia, entre su contenido de humedad inicial y el contenido de humedad de equilibrio.

¿Cuál es el tiempo de retardo adecuado para una rama de 20 cm de diámetro?

2. Tiempo de reacción de dos distintos tamaños de combustible

El concepto de tiempo de retardo puede observarse comparando los tiempos de reacción al humedecimiento y al secado de los combustibles de dos distintos tamaños.

Los combustibles son ramillas de 1.27 cm y un tronco de 30 cm de diámetro.

Durante una temporada de incendios típica con una semana de tiempo seco, la humedad del combustible en combustibles muertos de 1.27 cm será considerablemente menor que el contenido de humedad de un tronco de 30 cm.

Esto es porque el tiempo de retardo es mucho más corto en las ramillas de 1.27 cm.

Si los combustibles experimentan un día de precipitación, el contenido de humedad de ambos aumentará, pero hay que tener en cuenta la velocidad a la que absorben la humedad.

El tronco de 30 cm sigue ganando humedad después de que ha dejado de llover, tal vez debido a la presencia de agua disponible y a los suelos húmedos resultantes de la precipitación.

Las ramillas de 1.27 cm ganan humedad rápidamente, pero también la pierden rápidamente cuando las temperaturas y la humedad relativa vuelven a la normalidad.

Los combustibles forestales tienen muchas formas y tamaños, y nunca veremos un conjunto de combustible homogéneo.

Un pastizal puro es lo más cercano a ser un combustible homogéneo.

La gran variedad de componentes del combustible y los cambios en el tiempo atmosférico hacen que sea prácticamente imposible que un conjunto de combustibles completo esté en el contenido de humedad de equilibrio al mismo tiempo.

C. Categorías de tiempo de retardo de los combustibles muertos

LOS ESTUDIANTES FUERON INFORMADOS SOBRE LAS CATEGORÍAS DE TIEMPO DE RETARDO EN LA UNIDAD 3.

Con el propósito de pronosticar el comportamiento de fuego, es aceptable utilizar estimaciones del contenido de humedad de los tamaños de combustible que contribuyen mayormente a la propagación del fuego.

Los combustibles muertos están agrupados en cuatro clases de tamaño basadas en el tiempo de retardo:

- Combustibles de 1 hora de tiempo de retardo: 0 a 0.6 cm de diámetro
- Combustible de 10 horas de tiempo de retardo: 0.6 a 2.5 cm de diámetro
- Combustibles de 100 horas de tiempo de retardo: 2.5 a 7.5 cm de diámetro
- Combustibles de 1000 horas de tiempo de retardo: 7.5 cm a 20 cm

El sitio web del sistema de evaluación de incendios forestales (WFAS, por sus siglas en inglés) tiene mapas nacionales (EUA) que describen los contenidos de humedad calculados y/o calculados para tres de las cuatro categorías de tiempo de retardo: 10 horas, 100 horas y 1000 horas (la categoría de 1 hora no es mostrados debido a que cambia cada hora).

Los combustibles de 1000 horas son usados en el sistema nacional de clasificación de peligro de fuego (NFDRS, por sus siglas en inglés), pero no se utilizan para hacer pronósticos de comportamiento del fuego. Estos combustibles son un indicador de sequía.

D. Humedad del combustible fino muerto (HCFM)

Aunque es útil disponer estimaciones actualizadas de humedad del combustible en cada una de las cuatro categorías, estamos más preocupados con el grupo de 1 hora, el cual incluye todo los combustibles finos o c pequeños de hasta 0.6 cm de diámetro.

Este es el grupo que:

- Determina mayormente si un fuego iniciará y continuará propagándose.
- Cambia constantemente con los cambios de humedad relativa.

Es posible pronosticar estos cambios, y por lo tanto el comportamiento del fuego, para diferentes períodos del día y la noche.

Sin grandes cambios en la masa de aire, la humedad relativa suele aumentar por la noche con el descenso de las temperaturas hasta alcanzar la mayor humedad justo al amanecer.

A menudo, la humedad relativa comienza a descender con el incremento de las temperaturas hasta que se alcanza la menor humedad a media tarde.

La curva de la humedad del combustible fino muerto sigue la curva de humedad relativa con un corto tiempo de retardo de aproximadamente 1 hora.

La hojarasca superficial, así como otros combustibles finos muertos situados directamente en el suelo, puede presentar una tasa de intercambio de humedad más lenta debido a la reducción de la circulación de aire en los combustibles compactos y al intercambio de humedad del suelo con los combustibles.

VII. CÓMO SE DETERMINA LA HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE PARA COMBUSTIBLES MUERTOS EN CADA UNA DE LAS CUATRO CATEGORÍAS DE TIEMPO DE RETARDO

A continuación, se indican las formas en que se puede determinar el contenido de humedad del combustible para cada una de las categorías de tiempo de retardo:

- Combustibles de 1 hora de tiempo de retardo
 - Tablas de humedad del combustible
 - Estimación aproximada de la humedad relativa dividida entre 5
 - Valores del sistema nacional de clasificación de peligro de fuego (NFDRS, por sus siglas en inglés).
 - Horno de secado y balanzas
- Combustibles de 10 horas de tiempo de retardo
 - Varetas de humedad del combustible
 - Medidor de humedad calibrado
 - Valores del NFDRS
 - Horno de secado y balanzas

- Combustibles de 100 horas de tiempo de retardo
 - Medidor de humedad calibrado
 - Valores del NFDRS
 - Horno de secado y balanzas

- Combustibles de 1000 horas de tiempo de retardo
 - Medidor de humedad calibrado
 - Valores del NFDRS
 - Secado al horno y pesado en balanzas

La determinación de los porcentajes de humedad del combustible de los combustibles de 100 y 1000 horas de tiempo de retardo da a los gestores un indicador de las condiciones de sequía y de la intensidad general de una temporada de incendios.

Los combustibles de 10 horas de tiempo de retardo son mucho más importantes para hacer los pronósticos de comportamiento del fuego que los combustibles de 100 horas de tiempo de retardo, pero no tan importantes como los combustibles de 1 hora de tiempo de retardo.

Los combustibles de 1 hora son los principales conductores del fuego.

VIII. CÓMO LA HUMEDAD DE EXTINCIÓN VARÍA EN LOS CONJUNTOS DE COMBUSTIBLES NATURALES Y CÓMO AFECTA LA IGNICIÓN Y PROPAGACIÓN DE LOS INCENDIOS FORESTALES

El fuego se propaga como un resultado del precalentamiento, de los combustibles en el frente del fuego, hasta su punto de ignición.

El calor es necesario para eliminar la humedad de los combustibles antes de que puedan mantener la combustión.

En algún momento, el contenido de humedad del combustible puede retardar la combustión y el precalentamiento de los nuevos combustibles; por lo que, no se alcanza la temperatura de ignición en los nuevos combustibles.

A. Definición

¿Cuál es el punto en el que la humedad del combustible fino muerto se opone a la combustión y propagación del fuego?

Este fenómeno es conocido como humedad de extinción. Se define como el contenido de humedad del combustible a la cual el fuego no se propagará o se propagará sólo esporádicamente.

1. La humedad de extinción varía según la situación del combustible y esto depende de diferentes características de los combustibles, tal como:

- Carga del combustible
- Tamaño del combustible
- Arreglo del combustible
- Contenido químico

2. Humedad de extinción:

- Es la más baja (alrededor del 12 %) para los pastos ligeros como el pasto espiguilla.
- Tiende a ser mayor (alrededor 30 %) para combustibles más compactados, como las acículas de pino.
- Alrededor de alrededor de 40 % para combustibles de vegetación enmarañada.

¿Esto significa que un fuego activo dejará de propagarse cuándo la humedad de extinción sea alcanzada?

No necesariamente.

Un fuego que ya se está propagando en un frente extendido y produciendo intensidades significativas pueden no responder cuando la humedad de extinción sea alcanzada, como lo haría un fuego iniciando.

Por lo tanto, un brote de fuego puede no propagarse mientras que el fuego principal continúa avanzando.

B. Humedad de extinción para los modelos de combustible de comportamiento del fuego

Los valores de humedad de extinción para los modelos de combustible son:

Modelo de combustible 1 - Pasto corto.....	12%
Modelo de combustible 2 – Desechos.....	15%
Modelo de combustible 3 - Pasto alto.....	25%
Modelo de combustible 4 Chaparral.....	20%
Modelo de combustible 5 - Matorral bajo.....	20%
Modelo de combustible 6 - Matorral intermedio.....	25%
Modelo de combustible 7 - Vegetación enmarañada del sur.....	40%
Modelo de combustible 8 - Desechos de bosque cerrado.....	30%
Modelo de combustible 9 - Desechos de latifoliadas.....	25%
Modelo de combustible 10 - Madera (desechos y sotobosque)...	25%
Modelo de combustible 11 - Desechos ligeros de aprovechamiento.....	15%
Modelo de combustible 12 - Desechos moderados de aprovechamiento.....	20%
Modelo de combustible 13 - Desechos pesados de aprovechamiento.....	25%

Los combustibles como los matorrales con alto contenido químico pueden arder con humedades del combustible mucho más alta.

IX. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE PARA COMBUSTIBLES FINOS MUERTOS DE 1 HORA DE TIEMPO DE RETARDO, DE LAS TABLAS DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE DURANTE CONDICIONES DE LUZ DIURNA

A. Tablas de humedad del combustible fino muerto

Se necesitan 8 datos para calcular la humedad del combustible fino muerto:

- Temperatura de bulbo seco
- Humedad relativa
- Mes
- Sombreado o Expuesto
- Hora del día
- Pendiente
- Exposición
- Ubicación del sitio

Todos los datos se pueden ingresar en la hoja de trabajo de la humedad del combustible fino muerto. La temperatura y la humedad relativa son necesarias para determinar la **humedad de referencia del combustible**.

Los otros datos son necesarios para determinar la **corrección de humedad del combustible**.

1. Tabla de la humedad de referencia del Combustible (Tabla 2)

Determine la humedad de referencia del combustible (HRC) seleccionando la temperatura de bulbo seco adecuada y la humedad relativa de la Tabla 2.

La Tabla 2 es para la HRC durante horas del día. Debe conocer tanto la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa de su ubicación.

Observe los rangos de temperaturas en el lado izquierdo y los rangos de humedades en la parte superior.

Con el rango adecuado de temperatura, muévase horizontalmente hasta que se cruce con la columna de los rangos adecuados de humedad en la parte superior.

En esa intersección se obtiene un porcentaje del contenido de HRC. Este valor es introducido en la línea 6 de la hoja de trabajo de la humedad del combustible fino muerto.

2. Humedad del combustible fino muerto Correcciones para el día

Determine un valor de corrección de la humedad del combustible (CHC) a partir de las tablas considerando:

- Mes
- Sombreado por nubes o dosel
- Hora del día
- Diferencia de elevación de la ubicación del sitio
- Exposición
- Porcentaje de pendiente

El valor de corrección se suma al HRC para obtener la humedad del combustible fino muerto ajustada (HCFM).

En la Tabla 3 se indican los valores de corrección para los meses de mayo, junio y julio; esta tabla sólo es válida para esos tres meses.

Observe que hay dos secciones en la tabla. La parte superior es para los combustibles superficiales expuestos, mientras que la parte inferior es para combustibles superficiales sombreados.

Después de hacer las selecciones adecuadas de exposición y pendiente en el lado izquierdo, y la hora del día en la parte superior, encontrará el valor de la CHC en el punto de intersección.

Este valor se introduce en la línea 13 de la hoja de trabajo de la humedad del combustible fino muerto.

La tabla 4 de la corrección de humedad del combustible fino muerto es usada para los meses de febrero, marzo, abril/agosto, septiembre, octubre; y la tabla 5 de la corrección de humedad del combustible fino muerto es usada para los meses de noviembre, diciembre y enero.

Asegúrese de que está utilizando la tabla mensual correcta.

B. Ubicación del sitio

Hay otro dato que requiere una explicación adicional – la **ubicación del sitio** o el cambio de elevación en la hoja de trabajo.

1. Esto se basa en el gradiente adiabático, que es de aproximadamente 1°C por cada 100 metros bajo condiciones secas promedio.

Si la atmósfera es muy inestable, aprendimos que el gradiente, o cambio en temperatura por elevación, podría ser de hasta 0.6°C por cada 100 m o incluso más.

2. Esto entra en juego cuando consideramos la ubicación de donde estamos tomando nuestras lecturas meteorológicas en relación con el lugar donde está el fuego.
 - Si el fuego está a 300 metros por encima o por debajo del lugar donde se toma las lecturas meteorológicas, no es necesario hacer ningún ajuste; se asume que la temperatura dentro de esos 600 metros estará dentro de una variación aceptable.
 - Si el fuego está a más de 300 metros y menos de 600 metros por encima o por debajo de nosotros, podemos y debemos hacer un ajuste.
3. Las elevaciones superiores a 600 metros por encima o por debajo del sitio del pronóstico requerirá una nueva lectura de temperatura y humedad relativa.
 - Si el fuego está a 300 metros o menos por encima o por debajo de la **ubicación** donde la lectura es tomada, entonces usamos la columna **U** de la tabla.
 - Si el fuego está a más de 300 metros y menos de 600 metros por **arriba** de nosotros, usamos los valores de la columna **S** de la tabla.
 - Si el fuego está a más de 300 metros y menos de 600 metros **debajo** de nosotros, usamos los valores en la columna **D** de la tabla.

C. Interpretaciones del comportamiento del fuego

La tabla “comportamiento extremo del fuego relacionado con la humedad y humedad del combustible” describe algunas características generales del comportamiento del fuego que podrían ocurrir con varios niveles de humedad del combustible en combustibles de 1 h y 10 h. Recuerde que esta tabla es sólo para el oeste de los EE. UU..

Hoja de trabajo para la humedad del combustible fino muerto

INSUMOS

0	Punto de proyección			
1	Calculo para la hora del día	<u>D</u>	<u>D</u>	<u>D</u>
2	Temperatura del bulbo seco, °C	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
3	Temperatura del bulbo húmedo, °C	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
4	Punto de rocío, °C	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
5	Humedad relativa, %	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
6	Humedad de referencia del combustible (HRC), % (Tabla 1)	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
7	Mes	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
8	Sombreado (S) o Expuesto (E) (encerrar con círculo)	<u>S/E</u>	<u>S/E</u>	<u>S/E</u>
9	Hora	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
10	Diferencia de elevación (encerrar con círculo) D = 300 a 600 m debajo del sitio U = ± 300 m del sitio A = 300 a 600 m arriba del sitio	<u>D/U/A</u>	<u>D/U/A</u>	<u>D/U/A</u>
11	Exposición (N, E, S, O)	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
12	Pendiente, %	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
13	Corrección de humedad del combustible (CHC), % (Tabla 2, 3, o 4)	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>

RESULTADO

1	Humedad el combustible fino muerto (HCFM), % (Linea 6 + Linea 13)	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
---	--	-------------------	-------------------	-------------------

EJERCICIO
Cálculo de la humedad del combustible fino muerto de 1 hora.

Utilice las tablas de cálculo de la humedad del combustible fino muerto y la hoja de trabajo para contestar a las preguntas.

1. ¿Cuál es la humedad de referencia del combustible (HRC) para las siguientes situaciones diurnas?
 - a. Temperatura 29.4 °C, humedad relativa de 22%
HRC _____
 - b. Temperatura 15.5 °C, humedad relativa de 62%
HRC _____

2. ¿Cuáles son los valores de corrección de la humedad del combustible (CHC) para las siguientes situaciones?
 - a. 20 de agosto, a las 1200, ubicación a media ladera, exposición este, cielo nublado (combustibles sombreados)
CHC _____
 - b. 10 de mayo, a las 1400, exposición sur, 20% de pendiente, cielo despejado con combustibles expuestos.
CHC _____

3. ¿Cuál es el contenido de humedad del combustible fino muerto (1-hora) (HCFM) en las siguientes ubicaciones del fuego? Registre su respuesta en la hoja de trabajo de la humedad del combustible fino muerto. ¡Lea cuidadosamente las siguientes dos situaciones!

- a. Es 19 de noviembre, a las 1500 horas. Los combustibles están expuestos al sol en una exposición oeste. Las lecturas con un estuche meteorológico portátil, a 457 metros debajo de la ubicación del fuego, dan una temperatura de bulbo seco de 33.3 °C, y una humedad relativa de 16 %. La pendiente es de 40%.

$$\text{HRC} \text{ ______ } + \text{CHC} \text{ ______ } = \text{HCFM} \text{ ______ }$$

- b. Es 12 de octubre, a las 1700 horas. Los combustibles están sombreados en una exposición norte, pero con cielo despejado. La lectura con un estuche meteorológico portátil, tomada 426 metros arriba del fuego, dan una temperatura de bulbo seco de 23.8 °C, y una humedad relativa de 28%. La pendiente es de 20%.

$$\text{HRC} \text{ ______ } + \text{CHC} \text{ ______ } = \text{HCFM} \text{ ______ }$$