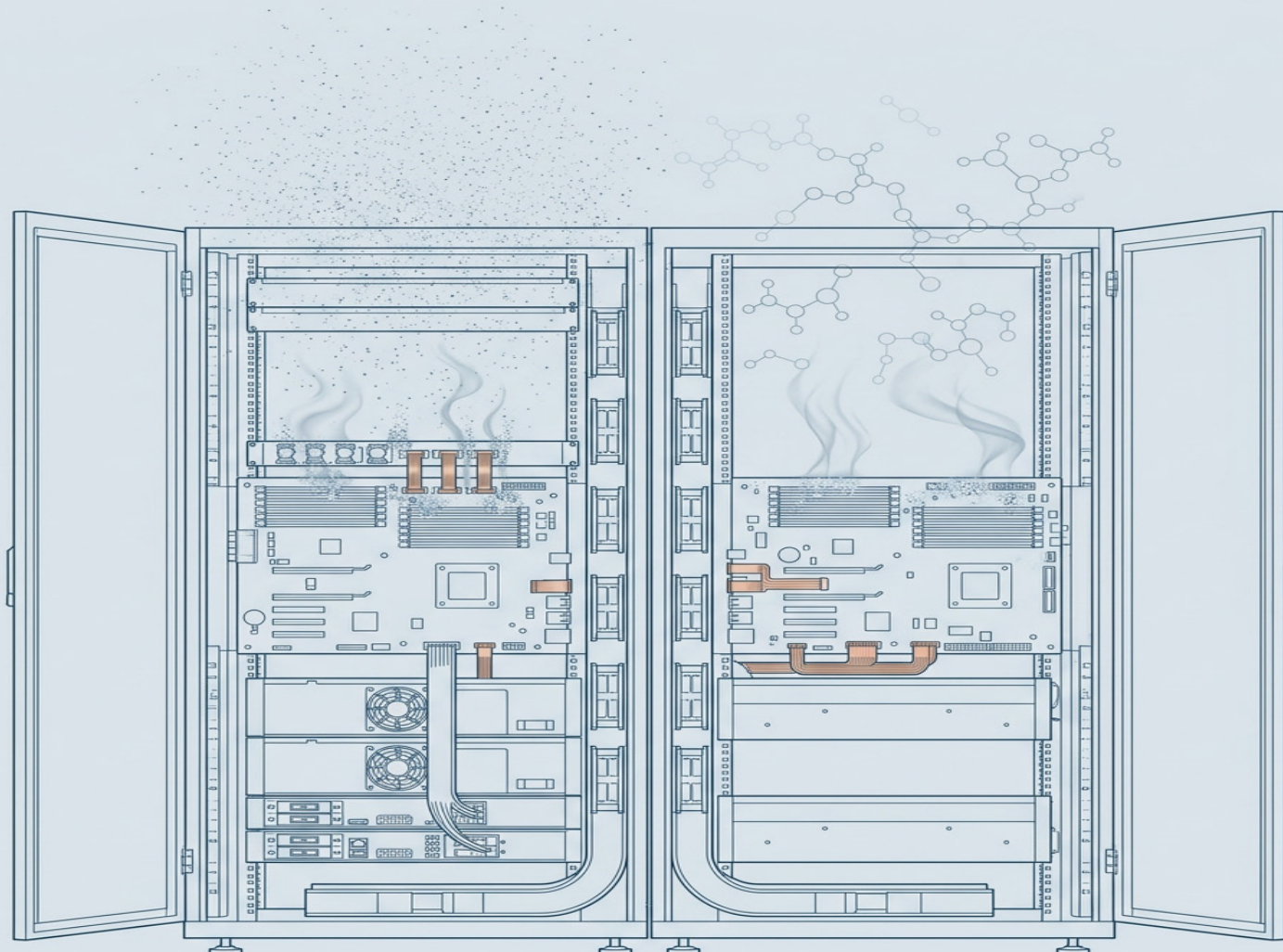


# El enemigo invisible del Data Center

Humedad, polvo y gases corrosivos, estás son las amenazas silenciosas que los responsables de infraestructura no pueden ignorar.



# Introducción

En el mundo de los data centers, la energía y la refrigeración son los protagonistas habituales de las conversaciones sobre fiabilidad. Son sistemas visibles, medibles y, en su mayor parte, bien entendidos por los equipos de operaciones.

Sin embargo, existe una categoría de amenazas que opera en silencio, de forma acumulativa y a menudo sin generar alarmas hasta que el daño ya está hecho: el acondicionamiento ambiental. La humedad relativa, las partículas de polvo y los gases corrosivos son responsables de un porcentaje significativo de los fallos de hardware en instalaciones de todo el mundo.

Este e-book está dirigido a profesionales con experiencia en infraestructura crítica. No es una introducción al tema: es un análisis profundo de los mecanismos de degradación ambiental, sus consecuencias operativas y las mejores prácticas para controlarlos. Si gestionas o diseñas data centers, esta lectura puede ahorrarte el próximo incidente inexplicable.

## Lo que encontrarás en este e-book

Los tres vectores de amenaza ambiental · Por qué la HR alta es más peligrosa que las altas temperaturas · El fenómeno Whiskers y cómo mitigarlo · Gases corrosivos: niveles, fuentes y soluciones · Protocolo de acción para entornos contaminados · Tabla de referencia de límites normativos

# El acondicionamiento ambiental como sistema crítico

La sala de ordenadores de un data center tiene como función primaria alojar equipos de TI en un entorno que garantice su operación continua y su integridad a largo plazo. Para ello, las normas TIA-942 e ISO-14644 establecen que los centros de datos deben tratarse como salas limpias de Clase ISO 8.

El acondicionamiento ambiental no es un complemento estético ni un requisito burocrático: es una condición operativa sin la cual los equipos electrónicos se degradan de forma acelerada. Tres son los agentes que deben controlarse:

**Humedad relativa** → Corrosión acelerada, fallos de disco, cortocircuitos por condensación y activación de polvo higroscópico.

**Partículas / Polvo** → Obstrucción térmica, conducción eléctrica (polvo húmedo), depósito de agentes corrosivos y generación de Whiskers metálicos.

**Gases corrosivos** → Corrosión de cobre y plata en circuitos y conectores, degradación progresiva sin síntomas visibles hasta el fallo.

Los tres agentes pueden actuar de forma independiente, pero su efecto combinado es sinérgico y exponencialmente más dañino. Un entorno con HR elevada, polvo fino y trazas de  $H_2R$  es una combinación que puede destruir hardware de forma sistemática en cuestión de meses.

# Humedad relativa, el riesgo más subestimado

La mayoría de los equipos de TI admiten rangos de HR de hasta el 80% según sus especificaciones de fabricante. Esto lleva a muchos operadores a relajar el control de humedad, asumiendo que están dentro de los márgenes seguros. Es un error de concepto.

El límite del fabricante contempla el comportamiento eléctrico del equipo aislado. Lo que no contempla es la interacción entre la humedad y los contaminantes presentes en el entorno de la sala. Ese es el factor crítico que cambia todo el análisis.

## El rango óptimo y sus umbrales críticos

Las mejores prácticas del sector, respaldadas por ASHRAE TC 9.9, establecen un rango ideal de operación entre el 45% y el 50% de HR. Los umbrales que marcan zonas de riesgo son:

| Nivel de HR | Estado              | Riesgo asociado                                        |
|-------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
| < 30%       | Zona de riesgo ESD  | Descarga electrostática sobre hardware sensible        |
| 30% – 44%   | Zona de precaución  | Mayor probabilidad de acumulación de carga estática    |
| 45% – 50%   | Rango ideal         | Control óptimo: mínimo riesgo ESD y corrosión          |
| 51% – 59%   | Zona de precaución  | Inicio de riesgo corrosivo si hay contaminantes        |
| >= 60%      | Zona de alto riesgo | Corrosión acelerada y activación de polvo higroscópico |

## La evidencia científica: HR alta vs. temperatura

Un estudio publicado en Usenix FAST’16, realizado conjuntamente por Microsoft Research y la Universidad de Rutgers, analizó miles de fallos de disco en entornos de producción. La conclusión fue contundente: la correlación entre HR alta y fallos de hardware es significativamente mayor que la correlación con temperaturas elevadas.

### Principio operativo fundamental

Una humedad relativa alta es MUCHO más peligrosa para el data center que una humedad relativa baja. El foco del control ambiental debe estar en el límite superior, no en el inferior.

El mecanismo de daño no es la humedad en sí, sino su interacción con el polvo presente en la sala. Cuando la HR supera el 60%, las partículas de polvo fino con baja humedad relativa delicuescente absorben agua, se humedecen y se convierten en conductores eléctricos. El polvo húmedo actúa como puente conductor entre pistas de circuito, generando cortocircuitos y acelerando la migración iónica.

# Polvo y partículas, la amenaza anticipa

El control de partículas en un data center opera en dos dimensiones independientes que deben gestionarse por separado: la cantidad de partículas y su corrosividad. Un entorno puede tener baja concentración de partículas pero altamente corrosivas, o alta concentración de polvo benigno. Ambos escenarios requieren intervención, pero de naturaleza diferente.

## Clasificación y origen de las partículas

| Tipo               | Tamaño       | Origen                                      | Permanencia en aire |
|--------------------|--------------|---------------------------------------------|---------------------|
| Polvo grueso       | 2,5 – 15 µm  | Abrasión eólica, origen mineral y biológico | Días                |
| Polvo fino (PM2.5) | 0,1 – 2,5 µm | Combustión de fósiles, actividad volcánica  | Años                |

El polvo fino (PM2.5) es el más peligroso por dos razones: su permanencia en el aire es prácticamente indefinida en entornos sin filtración adecuada, y su tamaño le permite penetrar en los circuitos más densos y en los mecanismos de lectura/escritura de los discos.

## Humedad delicuescente, el factor multiplicador

La humedad relativa delicuescente es el valor de HR a partir del cual una partícula de polvo absorbe agua del ambiente. Este valor varía según la composición química del polvo. Las partículas con baja humedad delicuescente son las más peligrosas: se activan antes y permanecen húmedas durante más tiempo.

Cuando el polvo se humedece ocurren dos procesos simultáneos:

- El polvo se vuelve conductor eléctrico, creando caminos de fuga entre pistas de circuito.
- Se acelera la migración iónica, que deposita iones metálicos en puntos de mayor tensión eléctrica.

### Nivel de limpieza requerido

Según ISO-14644, los data centers deben mantener el nivel de limpieza ISO Clase 8. Esto implica monitorización continua de partículas por metro cúbico y sistemas de filtración MERV 8 para aire ambiente y MERV 11 a MERV 13 para la entrada de aire exterior.

## Medición y control

El control de la corrosividad del polvo se mide en angstroms por mes (Å/mes) sobre cupones de cobre y plata expuestos en la sala. Los límites normativos son:

- Cobre: máximo 300 Å/mes.
- Plata: máximo 200 Å/mes.



La concentración de partículas se mide en partículas/m<sup>3</sup> con contadores de partículas en tiempo real. El control operativo se realiza mediante:

- Filtración MERV 8 en el retorno del aire interior.
- Filtración MERV 11-13 en la entrada de aire exterior.
- Mantenimiento del nivel de HR por debajo del 60%.
- Programa de limpieza técnica documentado y certificado.

# Whiskers metálicos, la amenaza que nadie ve venir

De todos los fenómenos de degradación ambiental en los data centers, los Whiskers metálicos son probablemente los menos conocidos y los más difíciles de gestionar una vez que se han establecido en una instalación. Su mecanismo es contraintuitivo y sus consecuencias pueden ser catastróficas.

## Qué son y cómo se forman

Los Whiskers son estructuras cristalinas microscópicas, similares a filamentos o pelos, que crecen espontáneamente sobre superficies metálicas galvanizadas. Los metales que los generan con mayor frecuencia en entornos de data center son el zinc (Zn), el estaño (Sn) y el cadmio (Cd). Todos ellos están presentes en los suelos elevados galvanizados, conductos, bandejas de cableado y gabinetes estándar.

El proceso de crecimiento tiene tres fases:

| Fase               | Duración      | Características                                                                |
|--------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Incubación         | Días a años   | No hay crecimiento visible. El material está acumulando tensiones internas     |
| Crecimiento activo | Meses a años  | Los filamentos crecen desde la superficie. Longitud típica < 1 mm, hasta 10 mm |
| Cese               | Indeterminada | El crecimiento puede detenerse, pero el material ya presente no desaparece     |

Los Whiskers tienen un diámetro de pocos micrómetros, lo que los hace invisibles a simple vista. Sin embargo, son suficientemente largos para crear puentes conductores entre pistas de circuito en los equipos electrónicos actuales, donde la separación entre pistas se mide también en micrómetros.

## Consecuencias operativas

Los fallos causados por Whiskers tienen una característica que los hace especialmente perniciosos desde el punto de vista operativo: son intermitentes. El filamento puede crear un cortocircuito transitorio, generar un reinicio del sistema o una variación de voltaje, y luego desaparecer al fundirse por la corriente. El evento queda registrado como un fallo sin causa aparente.

### Patrón de alerta

Si tu data center presenta reinicios inexplicables, variaciones de voltaje no correlacionadas con eventos eléctricos o fallos de hardware sin causa identificable, los Whiskers metálicos deben incluirse en el protocolo de diagnóstico.

## Protocolo de actuación

La única eliminación completa y aceptada de los Whiskers es la retirada y sustitución del material fuente. No existe un tratamiento que elimine los filamentos ya formados sin reemplazar el sustrato. El protocolo de actuación cuando se detectan Whiskers en sala es:

- Etiquetar e identificar cada fuente de contaminación (paneles de suelo, conductos, gabinetes, bandejas).
- Formar a todo el personal sobre identificación visual y procedimientos de seguridad.
- Establecer un plan priorizado de sustitución del material fuente.
- Implementar un programa de monitorización de fallos de hardware correlacionado con la ubicación en sala.
- Instalar sitios de prueba con muestreo periódico (cupones metálicos) para seguimiento de la evolución.
- Reforzar el programa de limpieza técnica para minimizar la dispersión de filamentos.

## Contaminación gaseosa, el veneno silencioso

Los gases corrosivos son la amenaza ambiental más difícil de detectar sin instrumentación específica. No generan alarmas visibles, no producen síntomas inmediatos y su acción sobre los circuitos electrónicos es progresiva y acumulativa. Cuando el daño se hace visible, generalmente ya ha afectado a múltiples equipos.

### Los principales agentes corrosivos

Los gases que contienen azufre son los causantes más comunes de corrosión en equipos electrónicos. El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) reaccionan con las superficies de cobre y plata presentes en los circuitos, formando compuestos no conductores que degradan las conexiones eléctricas. Su efecto se potencia significativamente en presencia de otros gases:

#### Sinergia de gases corrosivos

La combinación de  $\text{SO}_2$  o  $\text{H}_2\text{S}$  con dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) u ozono ( $\text{O}_3$ ) produce una mezcla significativamente más corrosiva que cualquiera de los gases por separado. En entornos urbanos con tráfico intenso o instalaciones industriales próximas, la monitorización de esta combinación es obligatoria.

Límites de concentración máxima

| Gas                          | Fórmula                          | Concentración máxima | Fuente típica                               |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------------------------------|
| Sulfuro de hidrógeno         | H <sub>2</sub> S                 | < 3 ppb              | Aguas residuales, industria química         |
| Dióxido / trióxido de azufre | SO <sub>2</sub> /SO <sub>3</sub> | < 10 ppb             | Combustión, industria, volcanes             |
| Cloro                        | Cl <sub>2</sub>                  | < 1 ppb              | Tratamiento de agua, productos de limpieza  |
| Óxidos de nitrógeno          | NO <sub>x</sub>                  | < 50 ppb             | Tráfico, combustión                         |
| Fluoruro de hidrógeno        | HF                               | < 1 ppb              | Industria del aluminio, electrónica         |
| Amoniaco                     | NH <sub>3</sub>                  | < 500 ppb            | Refrigeración, limpieza                     |
| Ozono                        | O <sub>3</sub>                   | < 2 ppb              | Equipos eléctricos, fotocopadoras, exterior |

Estos valores están basados en las guías de ASHRAE TC 9.9 para contaminación gaseosa y particulada en centros de datos (revisión 2011). Los límites son muy bajos, en el rango de partes por billón, lo que hace imprescindible el uso de monitores de gas de precisión para su control.

Control y filtración

El control de la contaminación gaseosa se realiza mediante filtración en fase gaseosa, que emplea materiales adsorbentes como carbón activado impregnado o zeolitas que capturan los gases corrosivos antes de que lleguen a la sala. Los puntos críticos de filtración son:

- Entrada de aire exterior: primera barrera de filtración gaseosa.
- Retorno de aire en las unidades CRAC/CRAH: segunda barrera para gases generados internamente.
- Salas adyacentes con fuentes potenciales (baterías de plomo-ácido, que emiten H<sub>2</sub>S durante la carga).

Atención especial a las baterías

Las salas de baterías de plomo-ácido son fuentes internas de H<sub>2</sub>S durante los ciclos de carga. La separación física y la ventilación dedicada de las salas de baterías no son opcionales: son requisitos básicos de diseño que protegen la sala de servidores de contaminación gaseosa interna.

# Protocolo de gestión ambiental

El control ambiental efectivo no es un evento puntual: es un programa continuo que combina monitorización en tiempo real, mantenimiento preventivo y protocolos de respuesta ante desviaciones. A continuación se describe el marco de actuación recomendado.

## Monitorización continua

El primer requisito es tener visibilidad en tiempo real de los tres agentes ambientales. Los sistemas de monitorización deben cubrir:

- Sensores de HR y temperatura distribuidos en múltiples puntos de la sala (entrada y salida de aire de cada pasillo).
- Contadores de partículas en tiempo real con alarmas configuradas para ISO Clase 8.
- Monitores de gas para H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> como mínimo, con registro histórico.
- Cupones de corrosividad (cobre y plata) con lectura mensual o trimestral.

## Programa de limpieza técnica

La limpieza técnica de un data center es una actividad especializada que requiere personal formado, equipamiento específico y procedimientos documentados. Los elementos clave son:

- Frecuencia: limpieza general de sala semestral como mínimo; revisión de suelo elevado anual.
- Equipamiento: aspiradores con filtros HEPA, paños antiestáticos, aspiradores de vacío seco.

- Ámbito: suelo elevado y plenum, interior de racks (con equipos en producción), bandejas de cableado, unidades CRAC/CRAH, filtros de aire.
- Documentación: registro de cada limpieza con mediciones de partículas antes y después.
- Revisión completa del sistema de suelo cada cinco años según especificaciones del fabricante.

## Checklist de control ambiental

| Acción de control                        | Frecuencia             | Herramienta               |
|------------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Lectura y registro de HR y temperatura   | Continuo (tiempo real) | BMS / DCIM                |
| Revisión de alarmas de HR fuera de rango | Diario                 | BMS / DCIM                |
| Conteo de partículas en sala             | Semanal                | Contador de partículas    |
| Revisión de filtros CRAC/CRAH            | Mensual                | Inspección visual         |
| Lectura de cupones de corrosividad       | Trimestral             | Laboratorio acreditado    |
| Monitorización de gases corrosivos       | Continuo o mensual     | Monitor de gas / muestras |
| Limpieza técnica de sala                 | Semestral              | Empresa especializada     |
| Revisión de plenum bajo suelo            | Anual                  | Inspección + limpieza     |
| Revisión completa de suelo elevado       | Quinquenal             | Empresa especializada     |



## Conclusión: Lo que no se mide, no se gestiona

El acondicionamiento ambiental es la disciplina de los data centers que más se beneficia del principio de Peter Drucker: lo que no se mide, no se puede gestionar. La humedad relativa, el polvo y los gases corrosivos no avisan antes de causar daño. Operan de forma silenciosa, acumulativa e invisible hasta que el hardware falla.

Los profesionales que entienden estos mecanismos tienen una ventaja operativa real: pueden anticipar fallos, explicar incidentes que de otro modo quedarían sin causa identificada, y diseñar programas de mantenimiento que protejan la inversión en infraestructura a largo plazo.

### Los tres principios del control ambiental efectivo

1. Mantener la HR entre el 45% y el 50%, el límite crítico es el superior, no el inferior. 2. Tratar el polvo como un riesgo químico, no solo mecánico, su interacción con la HR lo convierte en conductor eléctrico. 3. Monitorizar los gases corrosivos de forma continua, el daño es invisible pero medible antes de que sea irreversible.

La buena noticia es que todos estos riesgos son gestionables con las herramientas y los procedimientos adecuados. El primer paso es reconocerlos como lo que son: amenazas críticas que merecen la misma atención que la energía o la refrigeración.