

Se

SEGURIDAD

ANÁLISIS LOPA EN INSTALACIONES DE PROCESO

El análisis LOPA (Layer of Protection Analysis o Análisis de las Capas de Protección) es una novedosa metodología de análisis de riesgos de carácter semicuantitativo que permite determinar y valorar el riesgo de forma intuitiva y reproducible, desvelando qué capas de protección son susceptibles de ser mejoradas y en qué grado.



**E. Muñoz Fernández,
y G. Reyes Dolgado**
División de Seguridad
Industrial, Inercó, S.A.

LAS INSTALACIONES industriales de proceso que almacenan, procesan y generan sustancias peligrosas tienen asociado un determinado nivel de riesgo sobre las personas, sobre los bienes materiales y sobre el medio ambiente (Figuras 1 y 2).

Dichos riesgos potenciales exigen que estas plantas adopten estrictos criterios tanto en el diseño de las instalaciones y equipos, como en la adopción de medidas de seguridad. Estas últimas se traducen en las múltiples capas de protección existentes en las instalaciones.

1. Las capas de protección

Cada capa de protección está compuesta de equipos y/o procedimientos de control que actúan conjuntamente con otras capas de protección para controlar y/o mitigar los riesgos de los procesos.

Las capas de protección se pueden dividir en:

- **Capas de prevención:** son aquellas que tienen el propósito de detectar y evitar los sucesos que dan lugar al accidente o, lo que es lo mismo, son las que han de actuar antes de la pérdida de contención de materia o energía (reducen el riesgo disminuyendo la frecuencia del accidente). Las más comunes son:

- El sistema básico de control de procesos (*Basic Process Control System - BPCS*).

- Las alarmas críticas e intervención humana.

- Los sistemas instrumentados de seguridad (SIS).

- La protección física ante sobrepresiones o vacío: válvulas de seguridad (*Pressure Safety Valves - PSV*), discos de ruptura (*Rupture Disk - RD*) y válvulas rompedoras de vacío.

- **Capas de mitigación:** son aquellas diseñadas para minimizar la severidad de las consecuencias del accidente, es decir, han de actuar después de la pérdida de contención de materia o energía (reducen el riesgo disminuyendo las consecuencias del accidente). Dentro de éstas se incluyen entre otras:

- Protección física (pasiva): cubeto, aislamiento ignífugo, paredes anti-explosiones/bunker.

- Sistemas instrumentados de mitigación: *fire & gas*, sistemas de

paro de emergencia, válvulas de aislamiento de accionamiento remoto manual, sistemas de aislamientos de deflagraciones, etc.).

- Respuesta de la planta ante emergencia.
- Respuesta de la comunidad ante emergencia (Figura 3).

En la actualidad existen numerosas metodologías de análisis de riesgos, que, de forma general, se pueden clasificar según sean cualitativas, semicuantitativas o cuantitativas. El análisis LOPA es una novedosa metodología de análisis de riesgos de carácter semicuantitativo, que permite determinar y valorar el riesgo de una forma intuitiva y perfectamente reproducible. Esta metodología presenta como característica diferenciadora del resto de análisis de riesgos su focalización en el análisis de las capas de protección.

De esta forma, los resultados del análisis LOPA permiten una aplicación muy directa en la reducción del riesgo de la instalación, ya que desvelarán qué capas de protección son susceptibles de ser mejoradas y en qué grado han de serlo.

2. Qué es, qué hace y cuándo se aplica LOPA

LOPA tiene su origen en el deseo de responder a las preguntas claves en relación a las capas de protección, usando para ello un enfoque racional y objetivo. Permite adoptar de este modo decisiones perfectamente justificadas y documentadas acerca del riesgo de la instalación.

Estas preguntas claves acerca del número y la eficacia de las capas de protección son las siguientes:

- ¿Cuánta seguridad es suficiente?
- ¿Cuántas capas de protección son necesarias?
- ¿Qué reducción del riesgo debería proporcionar cada capa?

LOPA debe responderlas cumpliendo las siguientes premisas:

- Proporcionar respuestas racionales y semicuantitativas.
- Reducir la subjetividad
- Proporcionar claridad y consistencia.
- Documentar las bases de la decisión.

Figura 1 Accidente en refinería



Figura 2 Definición de riesgo y ejemplos de unidades de riesgo



- Facilitar el entendimiento entre el personal de la planta.

Por tratarse de un método semicuantitativo, LOPA utiliza órdenes de magnitud para la frecuencia de sucesos iniciadores, la severidad de las consecuencias y la probabilidad de fallo de las capas de protección independientes (*Independent Protection Layers, IPL*), con el fin de estimar el riesgo del escenario. No obstante, la obtención del orden de magnitud correspondiente puede estar basada en cálculos que utilicen como entradas valores numéricos de mayor precisión, como los que provienen de bases de datos de fallos de componentes de reconocido prestigio o análisis de consecuencias más exhaustivos.

LOPA se aplica en general una vez identificados todos los peligros asociados a una instalación. Por esta razón, se basará en la mayoría de las ocasiones en la información generada durante una evaluación cualitativa del riesgo (por ejemplo, HAZOP). La equivalencia entre la información proporcionada por ambos estudios se muestra en la Tabla 1.

En general, LOPA se aplica cuando un equipo de evaluación de riesgo:

Figura 3 Capas de protección en instalaciones de proceso, "figura de la cebolla"



TABLA 1

RELACIÓN ENTRE DATOS DE HAZOP Y LOPA

Información requerida por LOPA	Información desarrollada por HAZOP
Escenario	Par "causa-consecuencia"
Nivel severidad	Severidad de las consecuencias
Evento iniciador	Causa
Frecuencia evento iniciador	Frecuencia de la causa
Capas de protección	Salvaguardas existentes
Mitigación adicional recomendada	Nuevas salvaguardas recomendadas

- Cree que un escenario de accidente es demasiado complejo para hacer un juicio de riesgo razonable usando sólo técnicas puramente cualitativas.

- Cree que las consecuencias son demasiado severas para confiar exclusivamente en un análisis cualitativo de riesgos.

De esta forma, cuando ya se han identificado todos los escenarios mediante el estudio HAZOP, los más complejos pasan a ser evaluados por una técnica semicuantitativa como

es LOPA, siendo sólo unos pocos escenarios los que normalmente requieren de una evaluación aún más exhaustiva como la proporcionada por el análisis cuantitativo de riesgos (ACR) (Figura 4).

Por otra parte, LOPA puede ser aplicado dentro del análisis SIL, como herramienta para el cálculo del índice SIL (*Safety Integrity Level*), o bien como un método para analizar más detenidamente aquellos escenarios en los que se requieren funciones instrumentadas de seguridad (SIF) con índices SIL altos (SIL

2 ó 3). En esta última aplicación, el objetivo del análisis LOPA es la determinación de la probabilidad de fallo en demanda (PFD) asociada a la/s SIF que interviene/n en la reducción del riesgo del escenario estudiado.

En resumen, LOPA proporciona una base consistente para juzgar si hay suficientes capas de protección independientes (IPL) en el control del riesgo de los posibles escenarios de accidentes dentro de las instalaciones de proceso y se cumple de esta forma con los criterios de riesgo establecidos por la organización. Para ello, realiza un análisis detallado de dichos escenarios (escenarios LOPA) siguiendo el esquema mostrado en la Figura 5.

3. Fundamentos de la metodología LOPA.

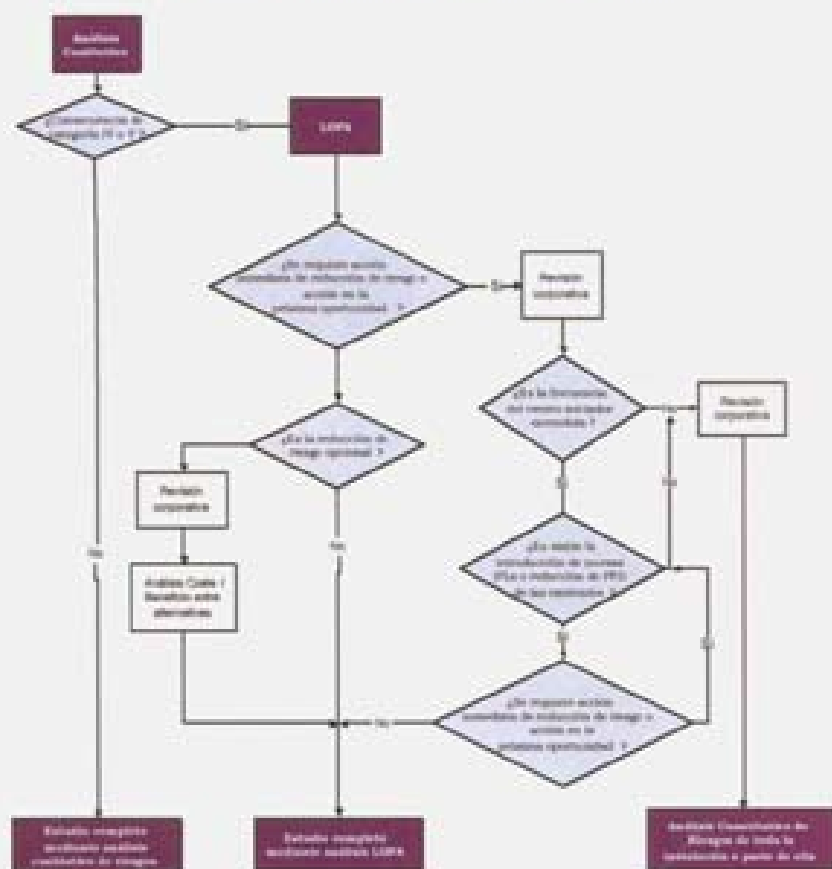
Como ya se ha mencionado anteriormente, un escenario LOPA consiste en un único par "causa-consecuencia". Dicho escenario se desencadena con el evento iniciador (por ejemplo, fallo de un lazo de control de temperatura), y para evitar que evolucione hasta la consecuencia indeseada (por ejemplo, runaway en un reactor con riesgo de explosión del mismo y muerte de varios operarios), se requiere al menos de la actuación correcta de una IPL (por ejemplo, enclavamiento por muy alta temperatura en el reactor). De esta forma, para que se dé la consecuencia indeseada, todas las IPL deben fallar.

Otros elementos que pueden intervenir en el escenario son:

- Los eventos permisivos ó condiciones. Consisten en operaciones o condiciones que no causan directamente el escenario, pero que deben estar presentes o activas para que el escenario pueda desarrollarse hasta sus consecuencias finales (por ejemplo, el lazo de control de temperatura sólo puede llegar a provocar un runaway en el reactor si coincide con la llegada al mismo de una carga más reactiva de lo habitual). Numéricamente afectan a la frecuencia del escenario, reduciéndola en todos los casos en los que intervienen.

- Los modificadores condicionales. Permiten ajustar la frecuencia del escenario a través de la probabilidad de que se den unas u otras consecuencias. Ejemplos de éstos son la probabilidad de ignición, la

Figura 4 Esquema de decisión de aplicación de LOPA



probabilidad de presencia de personal en área afectada, la probabilidad de lesiones fatales, etc. (Figura 6).

La metodología general para el desarrollo del análisis LOPA se detalla a continuación, dándose una breve descripción de las seis etapas de las que se compone:

ETAPA 1: identificación de consecuencias y estimación de su severidad.

Esta primera etapa tiene dos objetivos fundamentales:

- Identificación de todos los posibles pares causa-consecuencia. Como se ha sido mencionado anteriormente, normalmente este objetivo se desarrolla a través de un estudio HAZOP.

- Categorización de las consecuencias de cada par causa-consecuencia para la posterior selección de escenarios LOPA (Etapa 3) y evaluación del riesgo del mismo (Etapa 6).

ETAPA 2: seleccionar el escenario objeto de estudio.

Como ya se ha mencionado anteriormente, no todas las parejas causa-consecuencia identificadas en el estudio HAZOP son objeto del análisis LOPA, dada la complejidad de este último. LOPA sólo será aplicado a aquellos escenarios clasificados como los de consecuencias más graves en la Etapa 1.

En otras ocasiones, será el análisis SIL el que determine qué par causa-consecuencia será escenario LOPA, en función del índice SIL que se obtenga para la función instrumentada de seguridad analizada en el escenario.

ETAPA 3: identificar el suceso iniciador del escenario y determinar su frecuencia (en año⁻¹).

La frecuencia del evento iniciador se calcula en eventos por año (año⁻¹), para lo cual se dispondrá de bases de datos que recojan las tasas de fallo de los componentes del proceso. A veces, en las bases de datos no se encuentra la frecuencia del evento iniciador en cuestión. En tales casos, se acude a un árbol de fallos para calcular la frecuencia del evento iniciador combinando mediante puertas lógicas varios sucesos de los cuales sí se tengan datos de frecuencias de fallos disponibles.

En esta etapa, además de la frecuencia del evento iniciador, habrá

que determinar, en el caso de que existan, la frecuencia/probabilidad de los eventos permisivos y los modificadores condicionales (Figura 7).

ETAPA 4: identificar las IPL que intervienen en el escenario y determinar la probabilidad de fallo en demanda (PFD) de las mismas.

Una capa de protección inde-

pendiente o IPL es un mecanismo, sistema o acción que es capaz de prevenir o evitar el desarrollo de un escenario hasta llegar a la consecuencia indeseable. Para que una capa de protección o salvaguardia pueda ser considerada IPL ha de cumplir los requisitos presentados en la Figura 8.

Una vez se han identificado las

Figura 5 Etapas de la metodología LOPA

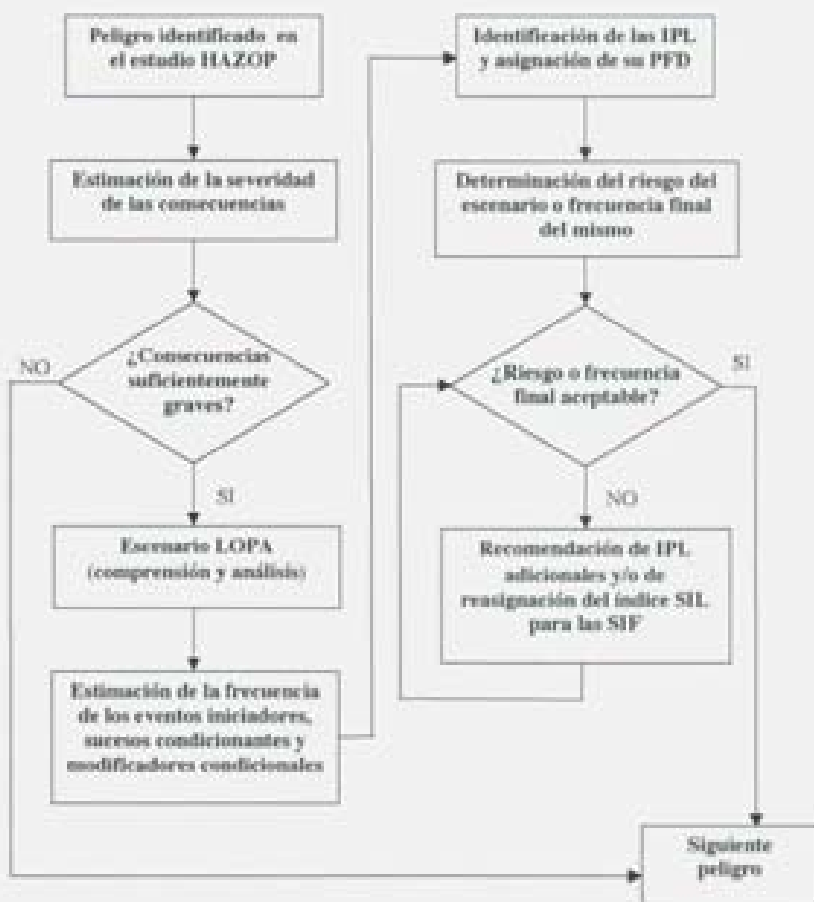


Figura 6 Etapas de la metodología LOPA

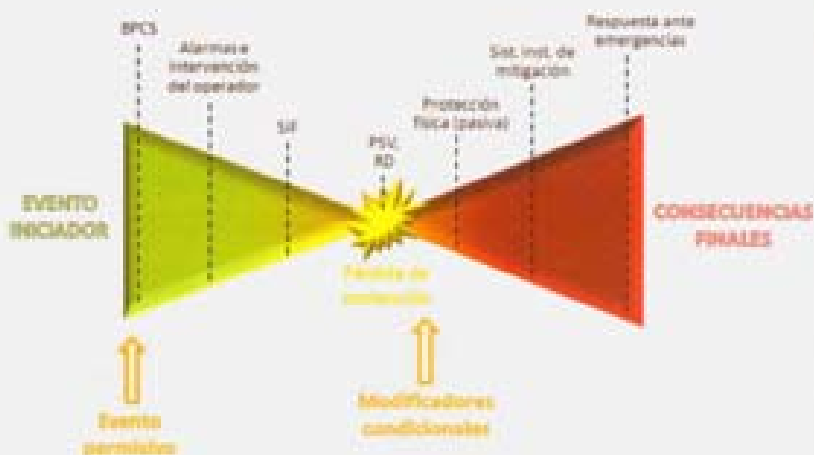
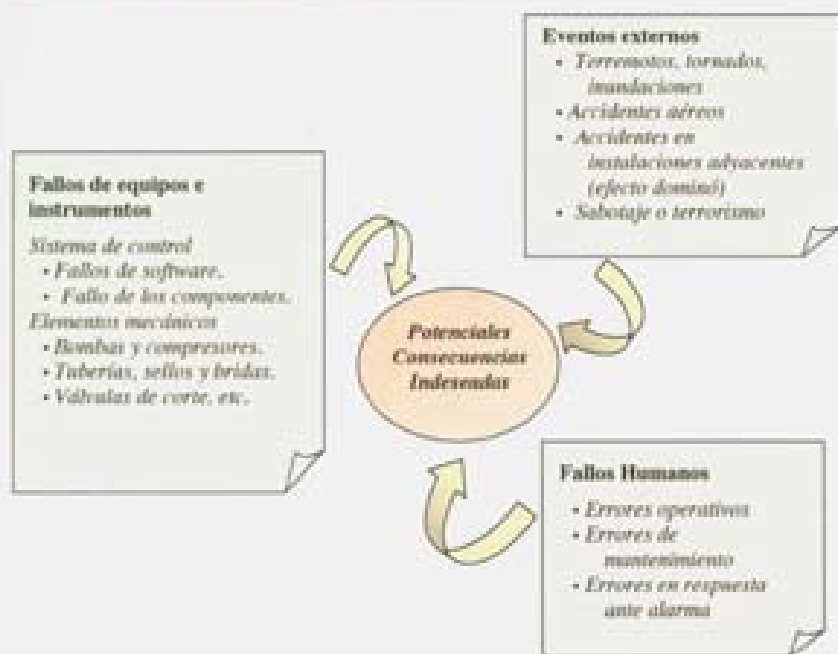


Figura 7 Tipos de sucesos iniciadores



IPL existentes para cada escenario, se debe determinar su probabilidad de fallo (típicamente, probabilidad de fallo en demanda, PFD). Por ejemplo, una función instrumentada de seguridad con un índice SIL 2 tendrá una PFD comprendida entre 10^{-2} y 10^{-3} , es decir, fallará entre 1 y 10 veces por cada 1.000 que se demande su actuación.

ETAPA 5: determinación de la frecuencia de las consecuencias mitigadas o frecuencia final de los escenarios.

Una vez se han definido todos los parámetros, se calcula la frecuencia final del escenario mediante la siguiente fórmula:

$$f_i = f_e \cdot P_{con} \cdot \prod_j PFD_j$$

donde:

- f_i : frecuencia del escenario
- f_e : frecuencia del suceso iniciador
- P_{con} : probabilidad de los eventos permisivos o condiciones
- PFD_j : probabilidad de fallo en demanda de la IPL j (Figura 9)

ETAPA 6: evaluar si el riesgo obtenido en la etapa anterior es tolerable según los criterios adoptados.

El riesgo final del escenario se obtiene por combinación de la frecuencia de las consecuencias mitigadas

(calculada en la etapa anterior) y la severidad de dichas consecuencias.

La evaluación del riesgo se puede realizar de distintos modos:

- Comparando la frecuencia final del escenario con la establecida por la organización como máxima admisible para accidentes que resulten en esas mismas consecuencias. Por ejemplo: frecuencia de muertes $< 10^{-6}$ año $^{-1}$.

- Teniendo en cuenta, a la vez, la frecuencia final del escenario y la categorización de las consecuencias, por medio de matrices de riesgo de doble entrada o gráficas calibradas por la organización.

Si después de analizar las capas de protección se concluye que los

niveles de riesgo considerados admisibles son vulnerados, se debe decidir qué capa de protección adicional se debe implementar o bien qué mejora de las capas existentes se ha de realizar para eliminar esa diferencia.

4. Conclusiones

El desarrollo del Análisis LOPA permitirá a las instalaciones de proceso y al industrial obtener los siguientes beneficios:

- Identificar los escenarios de mayor riesgo de la instalación de entre todos los examinados en el análisis cualitativo de riesgos (estudio HAZOP, generalmente).

- Conocer la contribución en la reducción del riesgo de cada una de las capas de protección identificadas en el estudio HAZOP, lo cual a su vez permite:

- Priorizar las capas de protección a instalar en posteriores oportunidades.

- Decidir qué capas de protección deben ser objeto de mayor atención en cuanto a mantenimiento y pruebas específicas; constituyendo LOPA, por tanto, una herramienta muy útil en la configuración del sistema de mantenimiento así como en la determinación de tareas que pueden considerarse críticas en cuanto a seguridad.

- Revalidar las capas de protección o salvaguardias listadas en el estudio HAZOP e identificar cuáles de ellas son capas de protección independientes (IPL).

- Determinar si en una instala-

Figura 8 Requisitos IPL

Se consideran IPLs todas las capas de protección que cumplan los siguientes requisitos fundamentales:

1. Independiente de otras capas de protección y de los eventos que causan el accidente

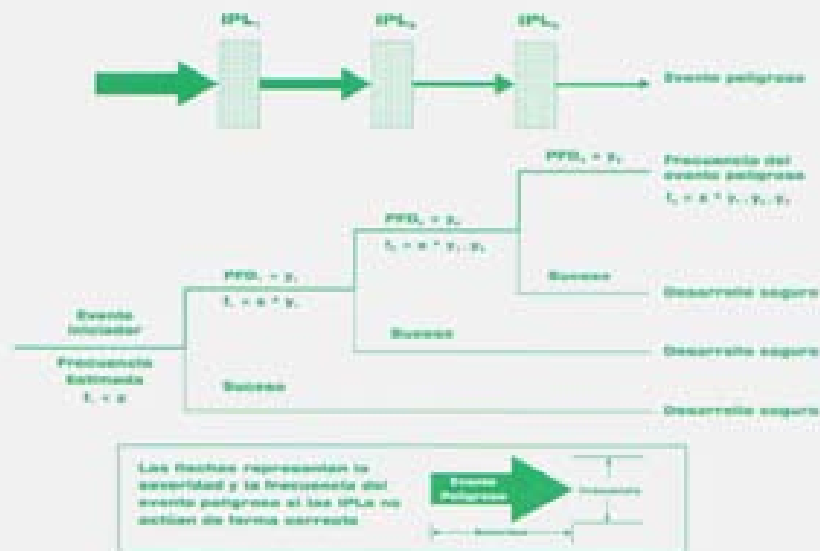
2. Efectiva

- Específica
- Rápida
- Robusta
- $PFD < 10^{-4}$

3. Auditable

"Todas las IPLs son salvaguardias pero sólo algunas salvaguardias son IPLs"

Figura 9 Determinación de la frecuencia del escenario LOPA



ción son requeridos SIS y establecer sus índices SIL asociados, de acuerdo a los requerimientos establecidos en la normativa sobre seguridad funcional (ISA 884.01 (ISA, 1996), IEC 61508 e IEC 61511 (IEC, 1998; 2001)).

- Entender en qué consiste cada escenario de accidente. Es decir, te-

ner conocimiento de la cadena de sucesos o fallos que han producirse para que se produzca el accidente. La mayoría de análisis de riesgos se centran en las causas del accidente y en las consecuencias de éste, sin detenerse en la evaluación de los eventos permisivos o condiciones y eventos intermedios.

- Obtener un orden de magnitud del riesgo asociado a un determinado escenario de accidente o instalación (agrupación de frecuencias de escenarios) de un modo sencillo e intuitivo.

- Justificar el cumplimiento con los criterios de riesgos establecidos sin necesidad de recurrir a un análisis cuantitativo de riesgos (ACR). Es necesario tener en cuenta el mayor requerimiento en tiempo de este último, lo cual se traduce en un coste por escenario analizado mucho más elevado.

- Reducir la subjetividad. LOPA proporciona claridad y consistencia, ya que los datos que en él se emplean proceden de bases de datos de reconocido prestigio.

- Facilitar la toma de decisiones en relación a la adopción de medidas adicionales de reducción del riesgo. LOPA proporciona el nivel de reducción mínimo exigido para el cumplimiento del criterio del riesgo.

- Cumplir recomendaciones de las compañías de seguros, obteniendo de esta forma disminuciones en las primas de contratación de las pólizas de seguros.