

2 INM v7.0

2.1 Introducción

El programa informático INM se utiliza para calcular el impacto acústico producido por las aeronaves al realizar distintas operaciones en los aeropuertos: aterrizaje, despegue, touch and go o sobrevuelo. Es una herramienta útil ya que permite valorar, en los distintos escenarios de operación, cómo afectará a los niveles de ruido generados en el entorno del aeropuerto la modificación del tráfico aéreo por un incremento o descenso del número de vuelos, la modificación de trayectorias de entrada y salida al aeropuerto y los cambios en la flota de aeronaves.

El INM ha sido la herramienta estándar de la FAA para la evaluación de ruido de los aeropuertos desde 1978 y es en la actualidad, la principal herramienta para la generación de la huella de ruido de los grandes aeropuertos a nivel nacional y en todo el mundo, debido a que está basado en los métodos de cálculo recomendados para la mayoría de los países.

Los módulos básicos de cálculo del INM v7.0. se fundamentan en los documentos publicados por el *Aviation Noise Committe (A-21)* de la *Society of Automotive Engineers (SAE)*. Este comité, con representación internacional, está integrado por miembros de las principales instituciones, firmas de ingeniería, fabricantes de aviones y motores, agencias reguladoras del gobierno y por usuarios de herramientas de modelización de ruido. Estos módulos han sido también compatibilizados con el Documento nº29 de la *European Civil Aviation Organization (ECAC)* y la Circular 205 de la *OACI (Organización de Aviación Civil Internacional)*. Los cinco documentos más importantes recogidos en esta versión son:

SAE-AIR-1845	“Procedure for the Calculation of Airplane Noise in the Vecinity of Airports”
SAE-AIR-5662	“Method for Predicting Lateral Attenuation of Airplane Noise”
SAE_ARP-866A	“Standard Values of Atmospheric Absorption as a Function of Temperature and Humidity”
ECAC Doc 29	“Reporto n Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports”
ICAO Circular 205	“Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports”

2.2 Fundamentos de cálculo

2.2.1 Datos necesarios para el cálculo de las isófonas

Para poder ejecutar de forma satisfactoria la simulación se necesitan diferentes datos, primero para que el programa calcule las trayectorias y segundo para que éste complete el análisis y calcule la presión sonora en el entorno del estudio. Muchos de estos datos forman parte de las diferentes bases de datos que incluye el programa y bastará con seleccionarlas para que sean incluidas en el análisis. A continuación se enumeran estos datos clasificados según su naturaleza.

2.2.1.1 Información sobre el aeropuerto

- Latitud y longitud del punto de referencia del aeropuerto (ARP o “Airport Reference Point”).
- Coordenadas de las cabeceras de pista relativas al punto de referencia del aeródromo.
- Elevación del aeropuerto.
- Condiciones meteorológicas: Temperatura media anual, humedad relativa y presión atmosférica media del aeropuerto.
- Topografía del terreno circundante al aeropuerto en estudio



Ilustración 2.1 ARP del Aeropuerto de Sevilla
Fuente: Google Earth

2.2.1.2 Información sobre las aeronaves

- Tipo de operación realizada por la aeronave: aterrizaje, despegue, touch-and-go, etc.
- Número de operaciones para cada una de las franjas horarias (mañana, tarde y noche) del día tipo.
- Trayectorias tridimensionales seguidas por las aeronaves
- Datos de ruido vs. potencia vs. distancia y características espectrales de las aeronaves.

2.2.1.3 Información sobre el observador

Se trata de definir la red de puntos del terreno en los que se obtendrán los diferentes valores de ruido durante el análisis. Puede tratarse de una malla regular de puntos o por el contrario tratarse de una malla recurrentemente irregular.

En el caso de la malla regular ésta quedará definida por las coordenadas de su esquina inferior izquierda, la separación entre los nodos y su ángulo de rotación. Sin embargo, para la definición de la malla irregular, será necesario generar la misma mediante un algoritmo específico a tal efecto.

También se consideran parte de este conjunto de datos las coordenadas asociadas a los denominados puntos de población y localización. Se trata de puntos, cuyas coordenadas no tienen por qué coincidir con los nodos definidos en la malla, y de los que, por diferentes razones, puede interesar conocer su nivel de ruido de forma específica. Para ello, estos puntos son analizados de forma independiente mediante una interpolación de los puntos de la malla que los rodean.

2.2.1.4 Información sobre las medidas de ruido

Por último, es necesario especificar al programa los parámetros que se desea obtener de cada análisis, especificando tolerancias, unidades, tipo de análisis, etc.

Los resultados pueden ser presentados de forma gráfica, en isófonas, o de forma numérica.

2.2.2 Modelo de segmentación

El INM divide el área de estudio en una malla de dimensiones que se pueden definir. Para calcular el nivel de presión sonora, el programa parte de las trayectorias de vuelo dividiéndolas en varios segmentos. La ventaja que presentan los modelos de segmentación de trayectorias de vuelo, es que cada segmento se puede evaluar bajo condiciones distintas dentro de una misma trayectoria, para cambiar las condiciones de potencia de motores en función del tipo de movimiento que realice la aeronave (subir a velocidad constante, acelerar manteniendo la altura, etc.).

Uno de los primeros cálculos que realiza el programa es el geométrico; el programa calcula la distancia más corta entre los distintos puntos de la malla y la trayectoria de vuelo, es decir, la longitud de la línea perpendicular que los une. En cada segmento de cálculo, la perpendicular, puede estar delante, en medio o detrás de los puntos que definen el segmento. Esta distancia calculada es importante, puesto que a partir de ella se calcula la energía de exposición sonora, de cada segmento.

$$E_{\text{seg}} = 10^{(L_{E,P,d-ADJ} + NF_{ADJ} - DUR_{ADJ} + DIR_{ADJ})/10}$$

- $L_{E,P,d-ADJ}$ es el nivel de presión sonora que resulta del proceso de interpolación de la potencia de los motores con el logaritmo de la distancia, ajustándolo con la absorción atmosférica y la impedancia acústica.
- NF_{ADJ} es el ajuste de la fracción de ruido para pasar de una trayectoria recta infinita, a la cual se han calculado las curvas NPD, a una trayectoria de segmento.
- DUR_{ADJ} es el ajuste de la duración de la velocidad de la aeronave; LA_{ADJ} es el ajuste de la atenuación lateral.
- DIR_{ADJ} es el ajuste de directividad, el cual sólo se aplica en el segmento de trayectoria que discurre por el suelo de la pista en las operaciones de despegue.

Una vez se calcula la energía de exposición sonora de cada segmento, se calcula la de vuelo, para acabar calculando la total.

$$E_{\text{vuelo}} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{seg}}} E_{\text{seg}(i)} \right)$$
$$E_{\text{total}} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{vuelo}}} E_{\text{vuelo}(i)} \right)$$

2.2.3 Atenuación lateral

El algoritmo de cálculo que mayores problemas presenta es el algoritmo de cálculo de la atenuación lateral. En esta versión del INM, dicho algoritmo se basa en la norma SAE AIR-5662 "Method for Predicting Lateral Attenuation of Airplane Noise" de 2006.

Se denomina "atenuación lateral" a la diferencia de nivel entre el sonido en la trayectoria de vuelo del avión y el sonido en una ubicación junto a ésta en el momento de máxima aproximación. Para ajustar el valor de ésta, es necesario tener en cuenta los siguientes elementos:

- Efectos asociados a la instalación de motores de la aeronave (efecto pantalla del avión , tipo de motor y ángulo de depresión ϕ)
- Atenuación suelo-suelo (efecto de reflexión, distancia lateral ℓ)
- Atenuación aire-suelo (efecto de refracción, ángulo de elevación β)

La ilustración siguiente muestra los parámetros geométricos básicos en el cálculo de la atenuación lateral. En ella se observa como si la altitud del avión es conocida, el ángulo de elevación y la distancia lateral dependen la una de la otra. Del mismo modo, cuando el ángulo de alabeo ϵ es conocido, el ángulo de depresión ϕ presenta una relación lineal con el ángulo de elevación β .

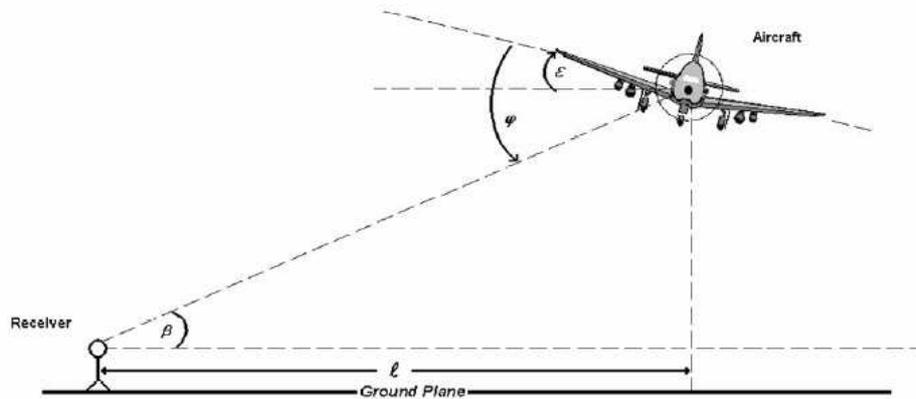


Ilustración 2.2 Parámetros geométricos para el cálculo de la atenuación lateral

Fuente: SAE-AIR-5662, Método de Predicción de la atenuación lateral de Aeronave de ruido, de 2006

La ilustración 2.3. muestra un ejemplo de la atenuación lateral en función del ángulo de elevación. Utilizando diferentes combinaciones de alturas y ángulos de alabeo se obtendrán diferentes valores para la atenuación lateral. En este caso la figura refleja el caso asociado a una altura de 1000 pies y un ángulo de alabeo de 0°.

Un valor negativo significa que la atenuación lateral se restará de la ecuación de ruido del sistema.

En esta figura además, puede observarse la diferencia entre los resultados obtenidos con la versión 7.0 del INM y los obtenidos con su versión anterior basada en el SAE-AIR-1751 “Prediction Method for Lateral Attenuation of Airplane Noise during Takeoff and Landing” de 1981.

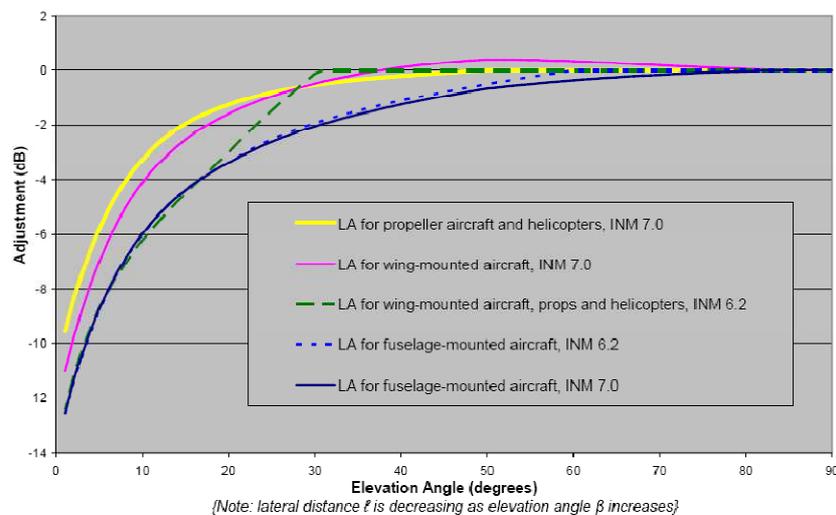


Ilustración 2.3 Ajuste de atenuación lateral

Fuente: SAE-AIR-5662, Método de Predicción de la atenuación lateral de Aeronave de ruido, de 2006

2.3 Base de datos del INM

El INM contiene una base de datos de ruido vs. potencia vs. distancia (Noise vs. Power vs. Distance, NPD), aumentada por una base de datos de características espectrales (utilizados sólo para el cálculo de la absorción atmosférica), de los principales modelos de aeronave. De estas aeronaves el programa incluye también sus características físicas y los procedimientos estándar para las diferentes operaciones.

Los datos NPD de una aeronave, que pueden obtenerse de la propia base de datos o pueden ser definidos por el usuario, consisten en varios niveles de decibelios en función del estado de potencia de los motores de la aeronave y distancia del observador a la aeronave.

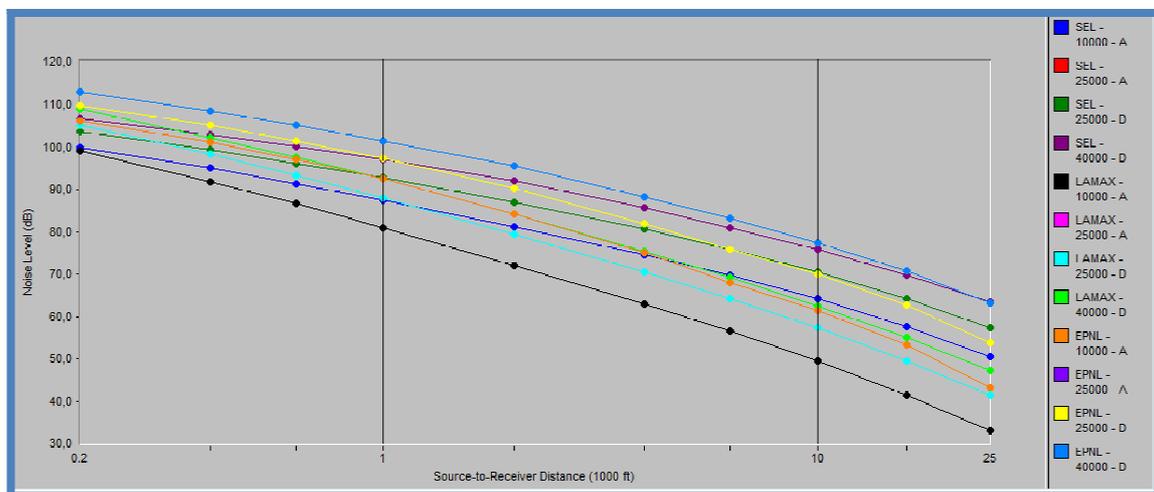


Ilustración 2.4 Ejemplo de curva NPD
Fuente: Base de datos del INM v7.0.

Los datos espectrales consisten en un conjunto de valores medidos de presión sonora vs. Frecuencia (entre 50Hz y 10 KHZ) y corregidos para una distancia de 1000 pies usando los coeficientes de absorción atmosférica definido en el SAE AIR-1845.

2.4 Pasos a seguir para la obtención de las líneas isófonas

A continuación se desarrollan de manera esquemática los pasos a seguir con el INM v7.0. para obtener las líneas isófonas de un aeropuerto. Este procedimiento se va a desarrollar para el aeropuerto objeto de este proyecto, el aeropuerto de Sevilla, pero bastará con cambiar los datos de entrada para poder analizar cualquier otro aeródromo.

2.4.1 Creación del nuevo estudio

En primer lugar crearemos un nuevo estudio, dándole nombre y definiendo su ruta de acceso. Luego se selecciona el sistema métrico con el que trabajaremos y se incluyen los datos básicos del aeropuerto en estudio (coordenada del punto de referencia, elevación,...). De aquí en adelante no será necesario preocuparse de ir guardando los cambios ya que será el propio programa el que lo vaya haciendo de manera automática.

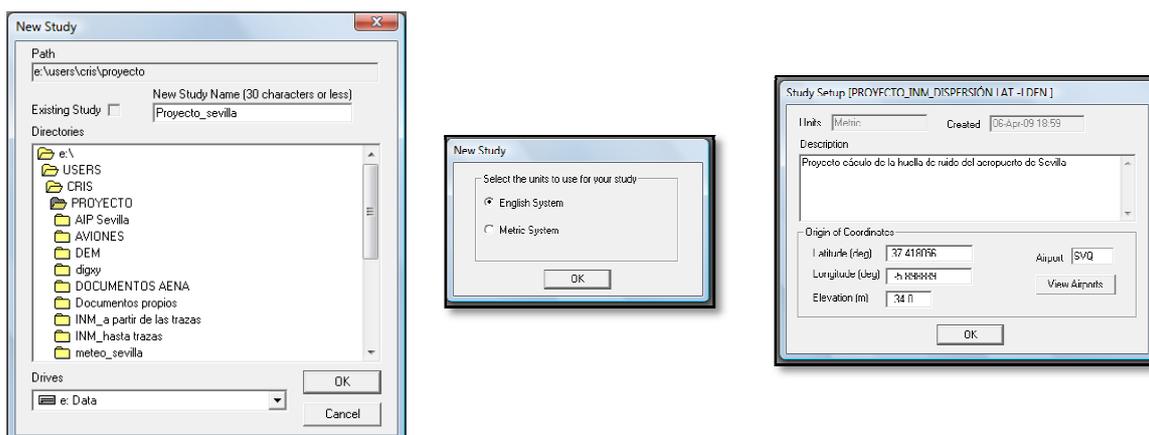


Ilustración 2.5 Interface para la introducción de datos
Fuente: INM v7.0.

2.4.2 Datos del terreno

Para incluir los datos asociados a la elevación del terreno será necesario disponer de los mismos en formato “.3tx”.

Los archivos en formato 3tx definen la elevación del terreno para una superficie de 1º por 1º discretizada en una malla regular de puntos espaciados 3” en cada dirección. La estructura de este tipo de archivos es la siguiente:

Lat. Long
Elevación
Elevación
Elevación
...etc...

Donde:

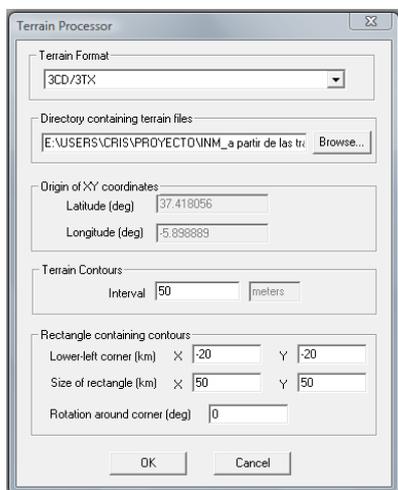
Lat. Latitud de la esquina suroeste en grados enteros
Long Longitud de la esquina suroeste en grados enteros
Elevación Elevación del terreno en metros enteros

La primera línea del archivo define la esquina suroeste del área definida. Latitud norte y longitud este serán valores positivos y latitud sur y longitud oeste serán valores negativos.

Debido a la malla regular considerada, el archivo se compone de exactamente $1201 \times 1201 = 1442401$ que siguen a la primera línea. Cada una de estas líneas, contiene la elevación en metros del terreno sobre el nivel del mar, correspondiente a cada uno de los puntos de la malla.

Para hacer funcionar el procesador de terreno se han de seguir los siguientes pasos:

1. Hacer clic con el ratón en la ruta del menú de opciones siguiente: *File// Import data into Study//Terrain files*. Al hacer esto, aparecerá la ventana “procesador de terreno”.



2. Seleccionar el tipo de tipo de formato.

3. Especificar la ruta donde se encuentran los ficheros de terreno.

4. Definir el rectángulo donde queremos que el terreno sea considerado en el análisis.

5. Pulsar ok.

Ilustración 2.6 Ventana del procesador de terreno del programa INM v7.0.

2.4.3 Creación de casos y escenarios

Para no tener que definir una y otra vez las características de un aeródromo, el INM permite definir diferentes casos para un mismo estudio. En cada caso se definirá un número de

operaciones y unas condiciones meteorológicas. Del mismo modo se definirán los escenarios que permitirán definir diferentes opciones de análisis para uno o más de los casos definidos en el estudio.

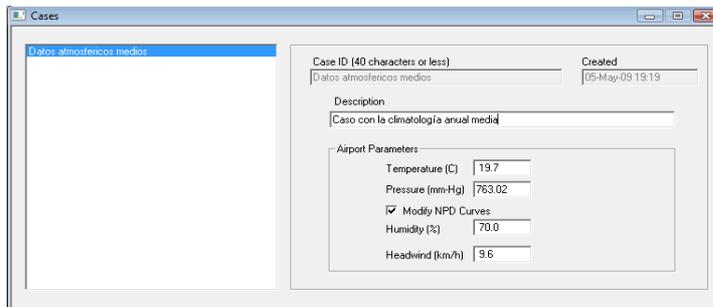
Para la creación de los “casos” y escenarios seguiremos los siguientes pasos:

- **CASO**

1. Hacer clic con el ratón en la ruta del menú de opciones siguiente: *Setup// Cases*. Al hacer esto, aparecerá la ventana “casos”.

2. Introducir un nombre y una pequeña descripción del caso a definir.

3. Incluir los datos climatológicos solicitados por el programa.



4. Para crear un nuevo caso hacer clic en la ruta: *Edit// Add record*

5. Al finalizar, cerrar la ventana.

Ilustración 2.7 Ventana "casos" del programa INM v7.0.

- **ESCENARIO**

1. Hacer clic con el ratón en la ruta del menú de opciones siguiente: *Setup// Scenarios*. Al hacer esto, aparecerá la ventana “escenarios”.

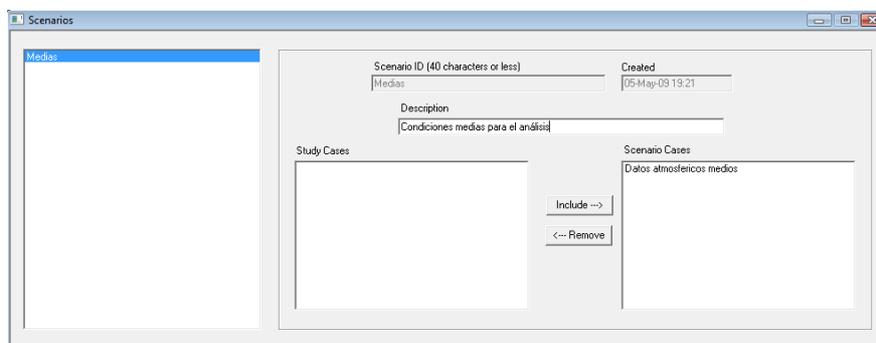


Ilustración 2.8 Ventana "escenarios" del programa INM v7.0.

2. Introducir un nombre y una pequeña descripción del escenario a definir.
3. Seleccionar los casos deseados y pulsar “include”.
4. Para crear un nuevo escenario hacer clic en la ruta: *Edit// Add record*
5. Al finalizar cerrar la ventana.

2.4.4 Selección de la flota

Para seleccionar los modelos de avión que se incluirán en el estudio se utilizan las ventanas “Civil Airplane Setup” y “Civil Airplane Substitution Setup”. Los pasos a seguir son:

1. Hacer clic con el ratón en la ruta del menú de opciones siguiente: *Setup// Civil Airplanes*. Al hacer esto, aparecerá la ventana “Civil Airplanes Setup”.
2. Seleccionar los aviones del listado estándar que incluye el programa y pulsar “include”.
3. Pulsar OK.

Si alguno de los aviones que se quiere incluir en el estudio no se encuentra en esta lista, habrá que repetir el proceso anterior pero accediendo a la ventana de sustituciones (*Setup// Civil Airplane Substitutions*).

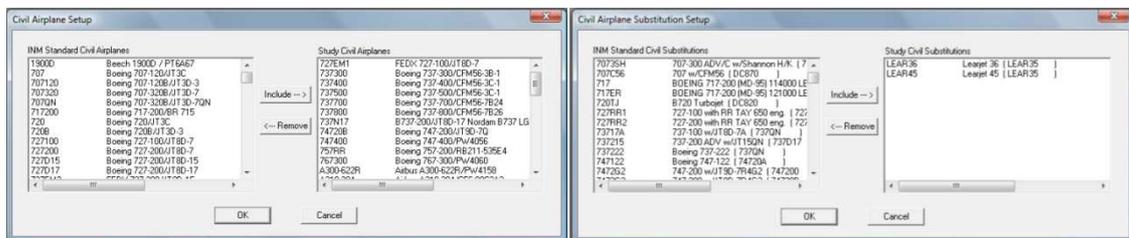


Ilustración 2.9 Ventanas "Civil Airplane Setup" y "Civil Airplane Substitution Setup" del programa INM v 7.0.

2.4.5 Pistas, umbrales y trayectorias

Con las herramientas del menú “Tracks” se incluirán todos aquellos datos asociados a las pistas y a las rutas de aterrizaje y despegue.

En primer lugar es necesario definir la pista y los umbrales de la misma. Esto se consigue introduciendo dicho datos en las ventanas “Runway and Helipad Identifiers” y “Runway Ends and Helipads”. Para desplegar estas ventanas haremos clic en las siguientes rutas:

-Tracks // Runway and Helipad Identifiers

- Tracks // Runway Ends and Helipad

Los datos más relevantes a introducir son:

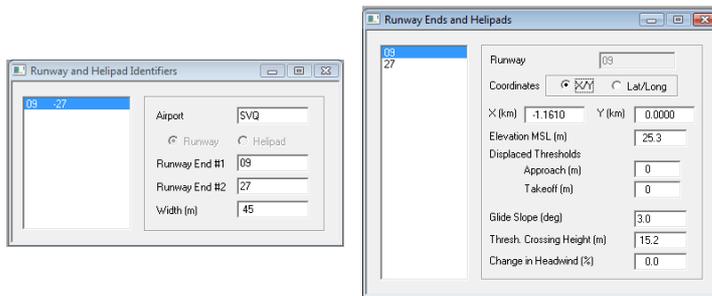


Ilustración 2.10 Ventanas "Runway and Helipad Identifiers" y "Runway Ends and Helipads" del programa INM v7.0.

- Identificación de los umbrales y sus coordenadas respecto el punto de referencia del aeródromo.

- Ancho de la pista.

- Ángulo de la senda de planeo.

- Distancia de desplazamiento del umbral.

Una vez definidas las pistas del aeropuerto, será necesario introducir en el modelo las trayectorias que seguirán las aeronaves en la realización de los diferentes tipos de operaciones. Existen varias formas de definir estas trayectorias en el programa. En el caso de este proyecto se ha optado por la más intuitiva, la definición de las P-tracks, en las que el usuario va definiendo punto a punto la trayectoria a seguir. Para hacerlo, se utiliza la interface "Input graphics" que además de crear y editar dichas trayectorias, permite visualizar los datos definidos en los apartados anteriores. También en esta ventana se incluirán las subtrayectorias asociadas al ajuste de atenuación lateral en el modelo.

Los pasos a seguir son:

1. Hacer clic con el ratón en la ruta del menú de opciones siguiente: *Tracks// Input Graphics*. Al hacer esto, aparecerá la ventana "Input graphics".

2. Ir visualizando los diferentes elementos definidos hasta el momento haciendo clic en los botones superiores de la ventana. (Botones marcados en rojo en la ilustración 2.11.)

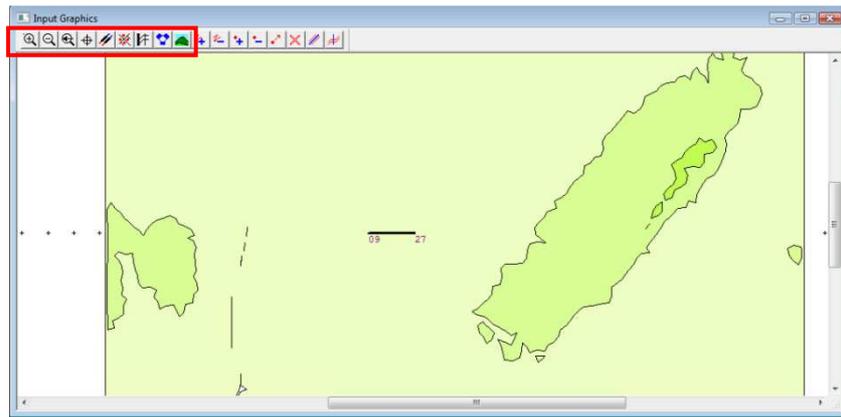


Ilustración 2.11 Ventana "Input Graphics" del programa INM v7.0.: Botones de visualización

3. Para definir las trayectorias, una vez presionado el botón "new track" se irá haciendo clic con el botón derecho del ratón para ir introduciendo, en orden, las coordenadas de los puntos conocidos de la trayectoria y doble clic con el botón izquierdo del ratón cuando se haya definido el último punto de ésta.

Para las definir las subtrayectorias bastará con pulsar el botón "sub-track" y luego ir haciendo clic en las diferentes trayectorias especificando en la ventana emergente el número de subtrayectorias y el porcentaje de tráfico asociado a cada una de ellas.

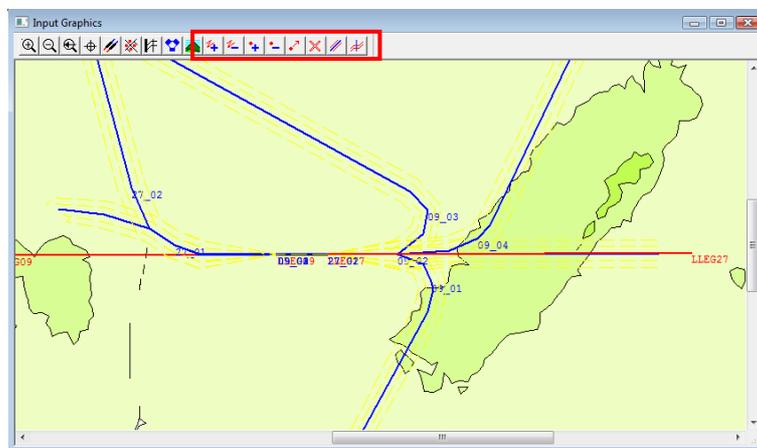


Ilustración 2.12 Ventana "Input Graphics" del programa INM v7.0.: Botones de edición de trayectorias

4. Cerrar la ventana.

2.4.6 Datos de tráfico

Para completar el modelo es necesario incluir el número de vuelos diarios de cada aeronave asociados a cada trayectoria definida y a cada franja horaria. Dado la gran cantidad

de aeronaves definidas, esta operación puede resultar bastante tediosa por lo que se recomienda establecer un orden estricto a la hora de introducir los datos para evitar errores.

Los pasos a seguir son:

1. Hacer clic con el ratón en la ruta del menú de opciones siguiente: *Operations//Civil Flights*. Al hacer esto, aparecerá la ventana "Case Select" en la que hay que especificar el caso al que irán asociados los datos que se van a introducir y pulsar OK. Tras esto aparecerá la venta "Civil Flight Operations".

2. En esta ventana habrá que ir introduciendo los datos para cada tipo de avión y para cada trayectoria.

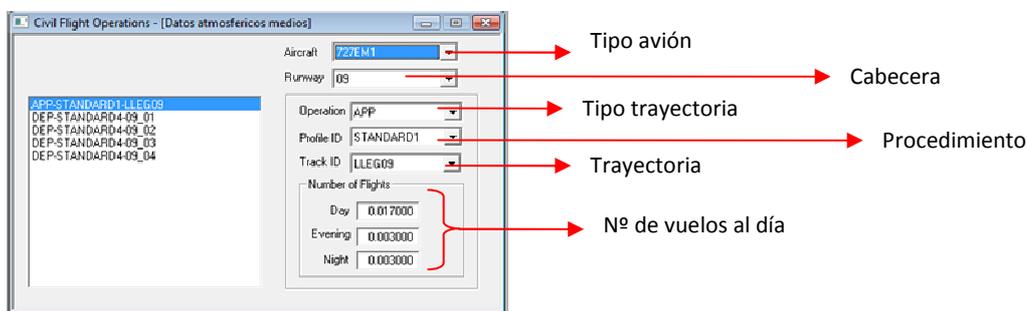


Ilustración 2.13 Ventana "Civil Flight Operations" del programa INM v7.0.

3. Una vez finalizado el proceso cerrar la ventana.

Si se quiere un listado de las operaciones definidas bastará con hacer clic en la ruta *Operations//View Calculated Flights* y especificar las características del informe deseado.

2.4.7 Propiedades del análisis y análisis

Llegados a este punto el modelo está totalmente definido y por tanto el análisis puede comenzar. Antes de esto, es necesario especificar las características del análisis y los parámetros que se desean calcular. Para ello se han de seguir los siguientes pasos:

1. Introducir las características de la malla del estudio en *Run// Grid Setup* y especificar los parámetros deseados para el análisis en *Run// Run Options*. En ambas rutas se desplegará una ventana tras seleccionar el escenario de aplicación de los previamente ya definidos.

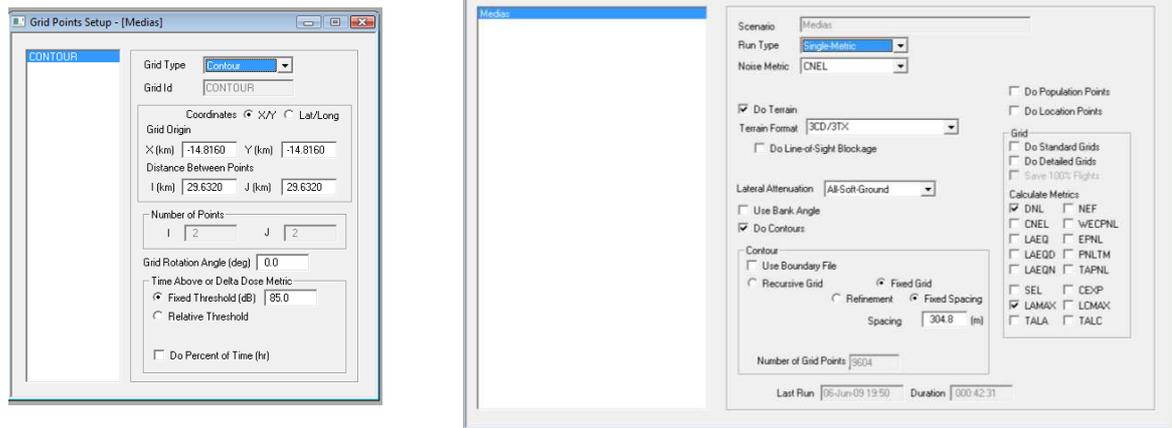


Ilustración 2.14 Ventanas "Grid Points Setup" y "Run Options" del programa INM v7.0.

2. Cerrar las ventanas anteriores y hacer clic en la ruta Run// Run start. Al hacer esto aparecerá la ventana "Run start". Una vez abierta la ventana, seleccionar el escenario deseado y pulsar ok, con lo que dará comienzo el análisis.

Sobre el análisis, comentar que su duración variará con la cantidad de datos introducidos y las opciones de análisis marcadas, y por supuesto dependerá también de forma directa de las características del ordenador con el que se esté ejecutando el programa.

En el caso del presente proyecto, la duración del análisis ha sido de 45 minutos para cada escenario definido, con un ordenador de las siguientes características:

- Procesador Intel® Core™ 2 a 2 Ghz.
- Memoria RAM de 2 Gb.

NOTA: Las opciones del análisis están recogidas en el ANEXO III Informes de simulación del INM (pág. 143).

2.4.8 Visualización y exportación de resultados

Una vez realizado el análisis la ventana con la barra de progreso desaparecerá y será entonces cuando dispongamos de los resultados. Para poder ver los gráficos obtenidos en primer lugar será necesario crear un fichero de salida. Para ello se ha de seguir la ruta *Output// Output Setup* y crear en la ventana emergente los ficheros que sean necesarios en función del análisis que se haya llevado a cabo.

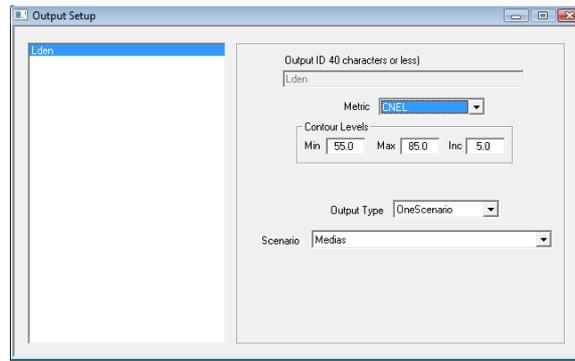


Ilustración 2.15 Ventana "Output Setup" del programa INM v7.0.

Los ficheros de salida creados podrán visualizarse a través de la ventana "Output Select" en la que seleccionaremos los ficheros deseados. Para acceder a esta ventana, se ha de seguir la ruta siguiente: *Output// Output Graphics*.

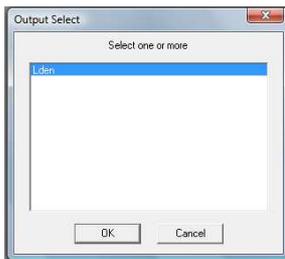


Ilustración 2.16 Ventana "Output Select" del programa INM v7.0.

Una vez seleccionados los ficheros el programa abrirá de forma automática la ventana "Output Graphics" en la que se pueden seleccionar los detalles deseados para la visualización de los resultados.

Cuando se tiene la imagen lista, el siguiente y último paso será exportar los resultados, creando archivos en formatos compatibles con otros programas. Para exportar los resultados seguiremos la ruta *File// Export as...* y seleccionaremos las opciones deseadas en las diferentes ventanas emergentes.

Ruta para exportar los
resultados

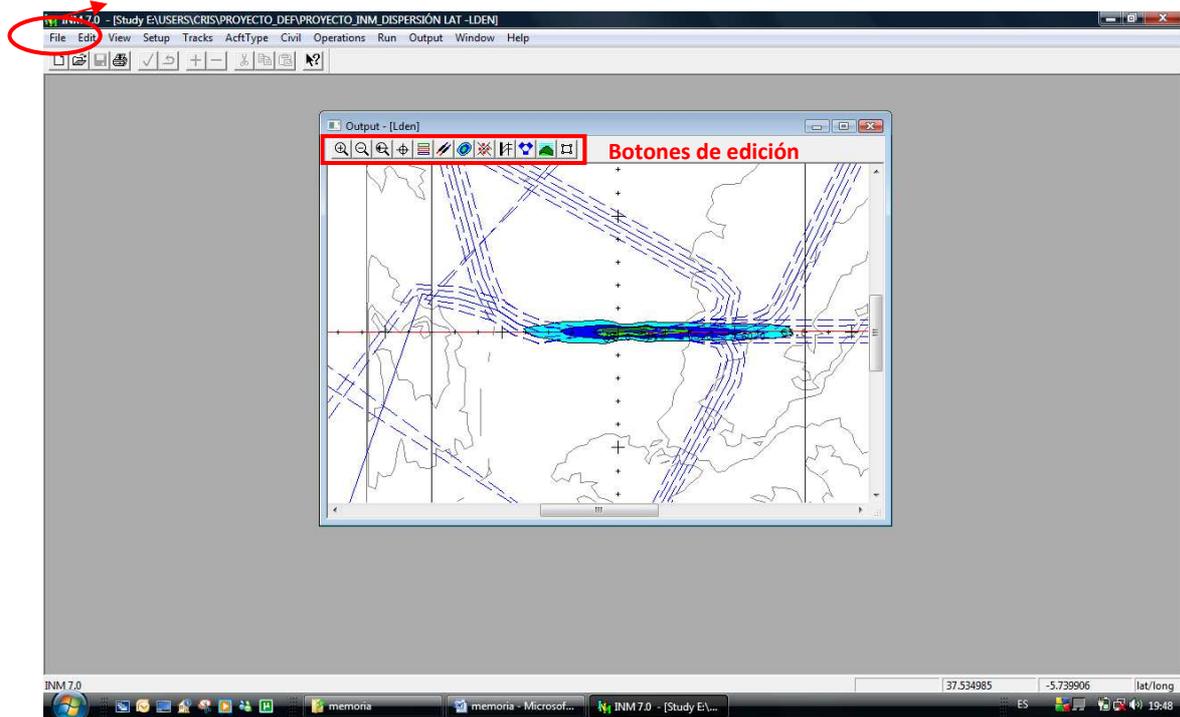


Ilustración 2.17 Ventana "Output" del programa INM v7.0.

En el caso de este estudio las imágenes serán exportadas en formato .dxf compatible con Autocad, programa en el que se han realizado los planos finales.