

## ANÁLISIS Y PROCEDIMIENTO PARA UN ESTUDIO DE CARGAS POR EJE

Autor: Primitivo Condarco A.  
ITVC – UMSA. 2016

### RESUMEN

Este documento presenta un procedimiento de análisis de la información de cargas por eje para la determinación de los factores de carga (factor equivalente de carga – LEF- y factor camión – TF) de acuerdo al espectro de cargas por eje, factores utilizados en el diseño del paquete estructural de una carretera.

El procedimiento se ilustra con aplicaciones de nuestro medio y permitirá al usuario desarrollar su estudio específico cuando necesite realizar este tipo de actividad. La interpretación, aplicación y desarrollo del tema son de exclusiva responsabilidad del autor.

### 1. INTRODUCCIÓN: CARGAS POR EJE

Las carreteras permiten la circulación de diferentes tipos de vehículos, tamaños y pesos, desde pequeños livianos hasta grandes pesados por lo que el paquete estructural de una carretera (pavimento, base, subbase) debe ser diseñada para soportar durante su vida útil las solicitaciones de los pesos de todos esos vehículos que circulan y circularán por esa vía. Para esto es necesario conocer los tipos de vehículos y los posibles pesos por eje que descargarán sobre la superficie de la carretera.

La actividad para establecer las cargas que se aplican sobre una superficie de rodado es denominado: Estudio de Cargas por Eje.

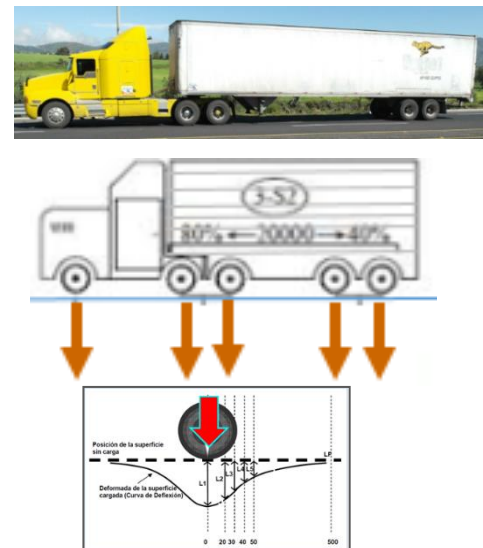
La aplicabilidad del conocimiento de las cargas por eje es que con ello se puede analizar si el paquete estructural de una carretera será suficiente para soportar esos pesos que en caso contrario sería seriamente dañado si el paquete estructural no ha sido diseñado para soportar unas cargas que se encuentran en exceso, lo que reduce drásticamente la vida útil de la vía

### 2. OBJETIVOS

Objetivo General: Presentar y desarrollar el tema de las Cargas por Eje en Bolivia.

Objetivo específico: Establecer un procedimiento de análisis de las cargas por eje para permitir la determinación de los factores equivalentes (LEF y TF) para calcular los Ejes Equivalentes (ESALs) que se utilizan en el diseño de pavimentos de una carretera.

**Fig. 1. Cargas por eje y esquema de deformación del pavimento**



Fuente: Imágenes Internet: Cargas por Eje

### 3. SOBRE LA LEY DE CARGAS POR EJE EN BOLIVIA

El Reglamento de la Ley de Cargas por Eje para Bolivia se encuentra establecida en el Decreto Supremo No. 25629 donde se aprueba el

reglamento de la Ley de Cargas 1769 referente a pesos y dimensiones para vehículos de transporte de carga o pasajeros que circulan en el territorio nacional, en sus treinta y nueve artículos y sus V anexos, que forman parte del texto adjunto al decreto supremo. Los límites según esta Ley son:

**Cuadro 1. Límites de cargas por eje según la ley de cargas de Bolivia**

| DESCRIPCION:     |                                                                          | PESO MAXIMO PERMITIDO (TON) |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| PESO BRUTO TOTAL |                                                                          |                             |
| 1                | Peso bruto total para vehículos (más carga)                              | 45,00                       |
| 2                | Peso bruto total para eje sencillo (direccional o fijo) con dos llantas: | 7,00                        |
| 3                | Peso bruto total, eje sencillo de cuatro llantas:                        | 11,00                       |
| 4                | Peso bruto total para eje doble de 8 llantas:                            | 18,00                       |
| 5                | Peso bruto total para eje doble de 4 llantas:                            | 10,00                       |
| 6                | Peso bruto total para eje doble de 6 llantas:                            | 14,00                       |
| 7                | Peso bruto total para eje triple de 12 llantas:                          | 25,00                       |
| 8                | Peso bruto total para eje triple de 6 llantas:                           | 17,00                       |
| 9                | Peso bruto total para eje triple de 10 llantas:                          | 21,00                       |
| B. DIMENSIONES   |                                                                          | METROS                      |
| 1                | Ancho total máximo                                                       | 2,60                        |
| 2                | Altura total máxima                                                      | 4,10                        |
| 3                | Longitudes totales máximas:                                              |                             |
|                  | 3.1 Bus                                                                  | 13,30                       |
|                  | 3.2 Camión con dos ejes                                                  | 11,50                       |
|                  | 3.3 Camión con tres ejes (rígidos)                                       | 12,20                       |
|                  | 3.4 Tracto camión con semirremolque                                      | 18,00                       |
|                  | 3.5 Camión con remolque u otra combinación                               | 20,50                       |

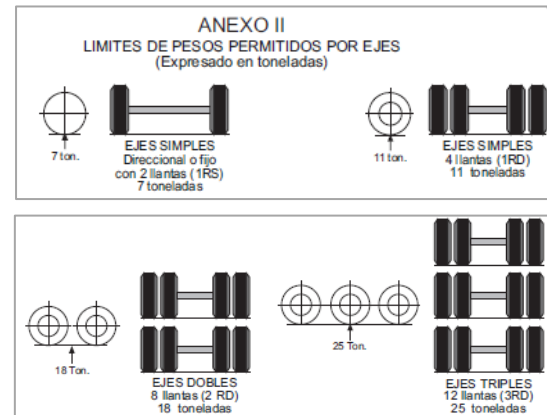
Fuente: Página Web de la ABC. DS No. 25629. Dic. 1999

- La **Ley de Cargas** establece los *Límites máximos de CARGAS POR EJE* para los vehículos que circulan por las carreteras de Bolivia.
- Estos límites supuestamente no deberían ser excedidos por los pesos por eje de los vehículos que circulan por las carreteras.

El detalle de la Ley de Cargas en Bolivia puede obtenerse de la Página Web de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) y el D.S. No. 25629 de Diciembre 1999.

Los ejes dobles también son denominados ejes Tándem y, los ejes triples son conocidos como ejes Tridem. Además de estas configuraciones que son las básicas existen otras combinaciones que pueden apreciarse en la Ley de Cargas.

**Fig. 2. Esquemas de ejes según la ley de cargas en Bolivia**



Fuente: Página Web de la ABC. DS No. 25629. Dic. 1999

## 4. DAÑO CAUSADO A LOS PAVIMENTOS

- El daño al pavimento causado por los vehículos depende de la carga que cada eje descarga sobre ella. Los flujos de tránsito presentan una variedad de tipos de vehículos y configuraciones de ejes, tamaños y pesos.

**Fig. 3. Tipos de vehículos en una carretera**



- De esta diversidad, son los vehículos pesados (Buses y Camiones) los que ejercen mayor sollicitación al paquete estructural. Los vehículos livianos tienen poco impacto sobre la superficie de rodado que representa apenas cerca del 0.15% del total de sollicitaciones sobre la carretera.
- Debido a ello por lo general al diseñar el paquete estructural de una carretera muchos solo consideran el efecto de los vehículos grandes y pesados en sus cálculos.
- El daño también depende del tipo de eje vehicular. No es lo mismo el daño que una misma carga produce al pavimento si se descarga por medio de un eje simple que por medio de un eje tándem o un tridem. El

efecto dañino de esa misma carga será mayor si se descarga al pavimento por medio de los ejes simples que por los ejes tándem y mucho mayor que por los ejes tridem.

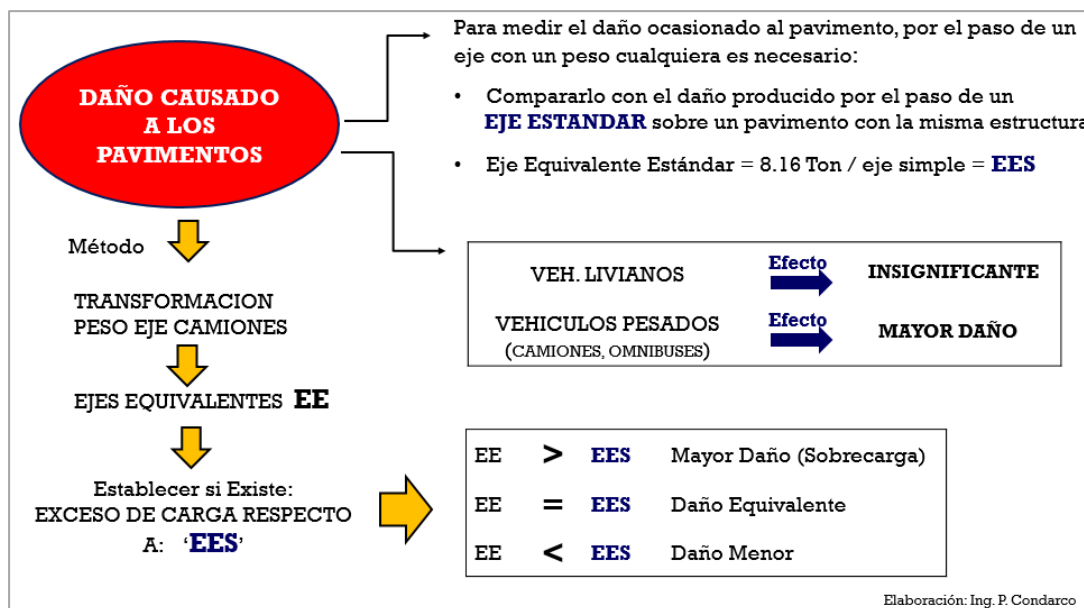
equivalentes o más comúnmente conocidos como **ESALs** (Equivalent Standar Axle Load – Carga Estándar por Eje Equivalente), estos son determinados siguiendo las normas AASHTO.

#### 4.1. Los Ejes Equivalentes ESALs

Para el diseño de pavimentos se deben conocer las solicitaciones sobre la carretera a lo largo de su vida en términos de lo que se denominan ejes

#### 4.2. El Factor de Carga y el Factor camión

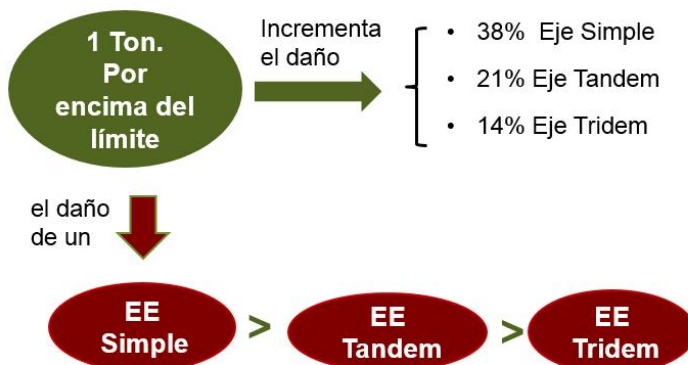
Para determinar los ejes equivalentes ESALs en un tramo vial primero se determinan los factores de carga LEF y TF, para los vehículos en la ruta.



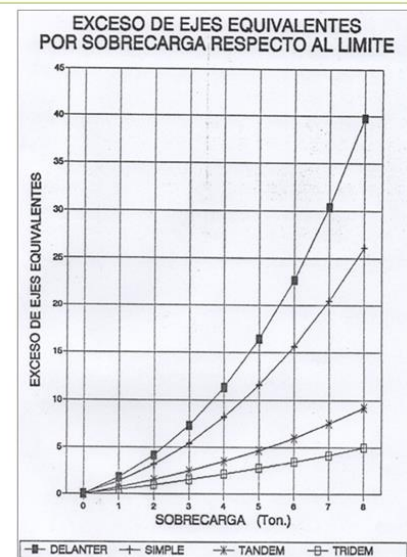
#### LAS SOBRECARGAS EN LOS EJES VEHICULARES

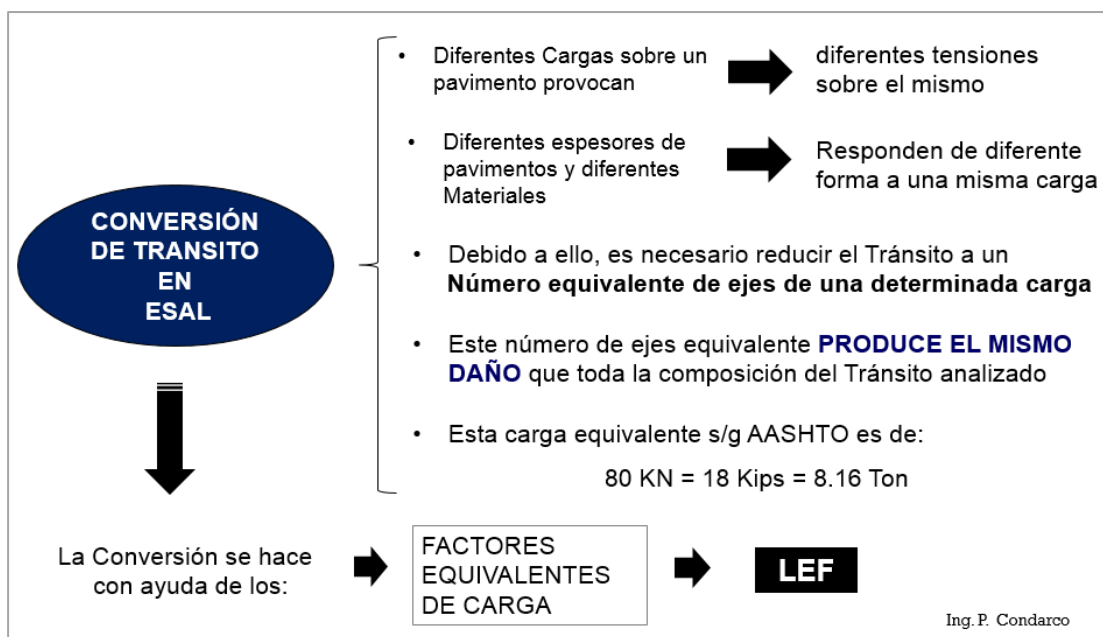
La sobrecarga en cada uno de los tipos de ejes produce un daño distinto según sea: eje simple, eje tándem, eje tridem

Para incrementos iguales de carga, el daño producido por los ejes simples es mayor que en los ejes tándem o tridem



Fuente: Elaboración Ing. P. Condarco





### Factor Equivalente de Carga (LEF):

Siguiendo el concepto de la AASHTO, el LEF es aquel que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad del pavimento causada por el eje estándar de 80 KN y la pérdida de serviciabilidad equivalente producida por una determinada carga 'X' de un mismo tipo de eje. Este factor permite determinar los ESALs por tipo de eje

$$LEF = \frac{\text{No. de ESALs de 80 KN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No de ejes de 'X' KN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

X = Carga por eje para la cual se calcula la equivalencia.

Para determinar los LEF existen cuadros establecidos por la AASHTO (ver ejemplo de cuadro a continuación) donde se tiene cuantificado el LEF para:

- Distintos tipos de ejes
- Distintos tipos de pavimentos.
- Distintas serviciabilidades

**Factor de Camión (TF):** El TF significa el ESAL por camión y es la suma de los LEF de cada eje de ese camión.

### Cuadro 2. Ejemplo de tabla ASHTO para determinar los factores equivalentes de carga (LEF)

Tabla 3.1. Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples,  $p_t=2,0$

| Carga /eje<br>(kips) | (kN)  | SN         |            |            |             |             |             |
|----------------------|-------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|                      |       | 1.0 (25.4) | 2.0 (50.8) | 3.0 (76.2) | 4.0 (101.6) | 5.0 (127.0) | 6.0 (152.4) |
| 2                    | 8.9   | .0002      | .0002      | .0002      | .0002       | .0002       | .0002       |
| 4                    | 17.8  | .002       | .003       | .002       | .002        | .002        | .002        |
| 6                    | 26.7  | .009       | .012       | .011       | .010        | .009        | .009        |
| 8                    | 35.6  | .030       | .035       | .036       | .033        | .031        | .029        |
| 10                   | 44.5  | .075       | .085       | .090       | .085        | .079        | .076        |
| 12                   | 53.4  | .165       | .177       | .189       | .183        | .174        | .168        |
| 14                   | 62.3  | .325       | .338       | .354       | .350        | .338        | .331        |
| 16                   | 71.2  | .589       | .598       | .613       | .612        | .603        | .596        |
| 18                   | 80.0  | 1.00       | 1.00       | 1.00       | 1.00        | 1.00        | 1.00        |
| 20                   | 89.0  | 1.61       | 1.59       | 1.56       | 1.55        | 1.57        | 1.59        |
| 22                   | 97.9  | 2.49       | 2.44       | 2.35       | 2.31        | 2.35        | 2.41        |
| 24                   | 106.8 | 3.71       | 3.62       | 3.43       | 3.33        | 3.40        | 3.51        |
| 26                   | 115.7 | 5.36       | 5.21       | 4.88       | 4.68        | 4.77        | 4.96        |
| 28                   | 124.6 | 7.54       | 7.31       | 6.78       | 6.42        | 6.52        | 6.83        |
| 30                   | 133.5 | 10.4       | 10.0       | 9.2        | 8.6         | 8.7         | 9.2         |
| 32                   | 142.4 | 14.0       | 13.5       | 12.4       | 11.5        | 11.5        | 12.1        |
| 34                   | 151.3 | 18.5       | 17.9       | 16.3       | 15.0        | 14.9        | 15.6        |
| 36                   | 160.0 | 24.2       | 23.3       | 21.2       | 19.3        | 19.0        | 19.9        |
| 38                   | 169.1 | 31.1       | 29.9       | 27.1       | 24.6        | 24.0        | 25.1        |
| 40                   | 178.0 | 39.6       | 38.0       | 34.3       | 30.9        | 30.0        | 31.2        |
| 42                   | 186.9 | 49.7       | 47.7       | 43.0       | 38.6        | 37.2        | 38.5        |
| 44                   | 195.8 | 61.8       | 59.3       | 53.4       | 47.6        | 45.7        | 47.1        |
| 46                   | 204.7 | 76.1       | 73.0       | 65.6       | 58.3        | 55.7        | 57.0        |
| 48                   | 213.6 | 92.9       | 89.1       | 80.0       | 70.9        | 67.3        | 68.6        |
| 50                   | 222.5 | 113        | 108        | 97         | 86          | 81          | 82          |

Fuente: Documento de Normas AASHTO

### 5. PROCEDIMIENTO A SEGUIR EN UN ESTUDIO DE CARGAS POR EJE

Para la determinación de los LEFs, TF y ESALs en una sección de carretera los pasos son:

- Trabajo de Campo: Recolección de datos de pesos por eje por medio de pesaje de los ejes vehiculares en la vía analizada.



- Trabajo de Campo: Aforos vehiculares clasificados en la misma estación de pesaje a objeto de establecer el TPDA (Tráfico Promedio Diario Anual). Si no se hacen aforos paralelos al pesaje, se deben buscar datos actualizados del TPDA de estudios de tráfico concernientes a la vía en estudio.
- Procesar y determinar el TPDA para la sección vial en estudio y proyectar para un período de tiempo (10 años, 20 años).
- Determinar la proporción de vehículos cargados y vacíos en la ruta del estudio
- En carreteras de doble sentido: determinar la distribución direccional (DD) del TPDA.
- En carreteras multicarril (más de un carril por sentido) establecer la distribución del TPDA por carril y determinar el carril más cargado.
- Procesar la información de los pesajes y establecer el espectro de cargas vehiculares por tipo de vehículo y configuración de ejes.
- Estimar los Factores Equivalentes de Carga por Eje (LEF) por tipo de eje según ese espectro.
- Determinar los Factores Camión (TF) por tipo de vehículo o grupo vehicular.
- Con los TF convertir el TPDA del período de estudio a ejes equivalentes ó ESALs.

**Clase de Vehículo.** Los tipos de vehículos en Bolivia responden a la clasificación vehicular de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

**Cuadro 3. Clasificación Vehicular**

| CODIGO | CLASE DE VEHICULO                          |
|--------|--------------------------------------------|
| 1      | Automóviles, Vagonetas, Jeep               |
| 2      | Camionetas                                 |
| 3      | Minibuses                                  |
| 4      | Microbuses dos ejes (22 pasaj)             |
| 5      | B2 Bus Mediano dos ejes (hasta 35 pas)     |
| 6      | B3 Bus Grande, dos o más ejes (45 + pasaj) |
| 7      | CM2 Camión Mediano, dos ejes               |
| 8      | C2 Camión Grande, dos ejes                 |
| 9      | C3 Camión Grande, tres ejes                |
| 10     | T-S Camión con Semirremolque               |
| 11     | C-R Camión con Remolque                    |
| 12     | Otros vehículos (Maq. Construcción, etc.)  |

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras – ABC

**Configuración de Ejes.** Los tipos de ejes pueden ser ordenados de acuerdo a la figura que sigue donde se muestra un esquema de tipos de configuración de ejes para los vehículos.

La determinación del TPDA, proyección, distribución direccional, proporción en el carril más cargado por sentido, etc. son aspectos habituales desarrollados en los Estudios de Tráfico y en este documento no se indican los procedimientos seguidos para ellos. Este documento enfatiza los aspectos de los pesos por eje y el procedimiento para los ejes equivalentes.

**Fig.4 Configuración de ejes para la codificación de buses y camiones**

| CODIG | TIPO                  | CONFIGURACION DE EJES | EJES |
|-------|-----------------------|-----------------------|------|
| 1     | CAMIONES DOS EJES     |                       | 11   |
| 2     |                       |                       | 12   |
| 3     | CAMIONES CON ADEPLADO |                       | 111  |
| 4     |                       |                       | 112  |
| 5     |                       |                       | 113  |
| 6     |                       |                       | 121  |
| 7     |                       |                       | 122  |
| 8     |                       |                       | 123  |
| 9     |                       |                       | 1111 |
| 10    |                       |                       | 1212 |
| 11    |                       |                       | 1211 |
| 12    |                       |                       | 1112 |

Elaboración propia

## 6. PROCESAMIENTO DE PESOS POR EJE: CUADRO DE FRECUENCIAS – FACTORES LEF Y TF

### 6.1 Procesamiento de los Pesajes. Base de Datos

Realizados los pesajes de ejes en campo, se debe preparar una base de datos donde se identifique claramente: el tipo de vehículo y su codificación dentro de la clasificación vehicular y la configuración de ejes. Adicionalmente se puede registrar para otros análisis el sentido de

viaje, la capacidad del vehículo, tipo de carga transportada, etc.

Una vista de una Base de Datos preparada tiene el formato que se muestra en el cuadro que sigue, donde la codificación de vehículo y configuración de ejes corresponde a lo que se mostró en los cuadros anteriores.

En esta muestra que corresponde a vehículos rígidos (no-articulados) las últimas columnas presentan los pesos por eje en kilogramos (eje delantero y eje trasero)

**Cuadro 4. Ejemplo de base de datos de campo de pesos por eje**

| Tipo de vehículo        | Sentido | CLAS E VEN | CONF IG EJES | Capacidad de Carga (Kg.) | Tipo de carga transportada | Peso KG - EJE DELANTERO | Peso KG 1er EJE TRASERO | TOTAL Kg |
|-------------------------|---------|------------|--------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | AGREGADOS                  | 5,280                   | 12,580.00               | 17,860   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 15,000.0                 | AGUA                       | 5,320                   | 10,620.00               | 15,940   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | AGUA                       | 5,780                   | 12,700.00               | 18,480   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 15,000.0                 | AGUA                       | 6,500                   | 12,520.00               | 19,020   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 12,000.0                 | AGUA                       | 7,160                   | 15,120.00               | 22,280   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 15,000.0                 | ARENA                      | 2,380                   | 1,740.00                | 4,120    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 12,000.0                 | ARENA                      | 5,620                   | 6,340.00                | 11,960   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | ARENA                      | 7,500                   | 13,360.00               | 20,860   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 7,500.0                  | CEMENTO                    | 4,020                   | 8,500.00                | 12,520   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 15,000.0                 | CEMENTO                    | 7,640                   | 6,460.00                | 14,100   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 3,000.0                  | FIERRO                     | 5,000                   | 9,300.00                | 14,300   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | GASEOSAS                   | 5,400                   | 9,220.00                | 14,620   |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 15,000.0                 | GRAVILLA                   | 6,560                   | 14,140.00               | 20,700   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | LADRILLO                   | 6,560                   | 13,880.00               | 20,440   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 17,000.0                 | LAVANDERIAS                | 4,260                   | 7,660.00                | 11,920   |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 10,000.0                 | LIMÓN Y NARANJA            | 5,360                   | 3,260.00                | 8,620    |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 10,000.0                 | MAIZ                       | 4,900                   | 9,960.00                | 14,860   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 11,000.0                 | MANDARINA                  | 4,540                   | 5,880.00                | 10,420   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 15,000.0                 | MAQUINARIA PESADA          | 2,180                   | 3,880.00                | 6,060    |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 14,000.0                 | PAPA                       | 6,200                   | 9,180.00                | 15,380   |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 10,000.0                 | PAPA                       | 5,480                   | 13,100.00               | 18,580   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | SEMILLA                    | 4,880                   | 9,800.00                | 14,680   |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | TIQUES PLASTICO            | 4,360                   | 4,940.00                | 9,300    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | VACIO                      | 4,300                   | 2,800.00                | 7,100    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | VACIO                      | 3,080                   | 4,920.00                | 8,000    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 12,000.0                 | VACIO                      | 3,640                   | 4,380.00                | 8,020    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 10,000.0                 | VACIO                      | 5,320                   | 3,340.00                | 8,660    |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 10,000.0                 | VACIO                      | 4,580                   | 4,120.00                | 8,700    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 6,000.0                  | VACIO                      | 4,760                   | 5,000.00                | 9,760    |
| Camión Grande dos ejes: | 1       | 8          | 1            | 12,000.0                 | VACIO                      | 4,740                   | 6,840.00                | 11,580   |
| Camión Grande dos ejes: | 2       | 8          | 1            | 12,000.0                 | VACIO                      | 4,800                   | 7,360.00                | 12,160   |

Fuente: Pesaje de Cargas por Eje 2016: 'Retén Ckochis. Empresa Essing SRL

Para mostrar en este documento el procedimiento de determinación de los ejes equivalentes, se toman en cuenta los datos de los camiones-rígidos grandes con eje trasero simple y con eje trasero tándem.

- La muestra para el ejemplo alcanza a un total de 154 vehículos, el 20% corresponde a camiones rígidos de ejes simples y el 80% a camiones rígidos con eje trasero tándem..

**Fig. 5. Tipos de camiones considerados para el análisis**

CAMIÓN GRANDE: EJES 11



CAMIÓN GRANDE: EJES 12



Fuente: 'Retén Ckochis. 2016. Empresa Essing SRL

## 6.2 El Espectro de Pesos por Eje. Los Factores LEF y TF

Los factores equivalentes de carga (LEF), el factor-camión (TF) y los ejes equivalentes (ESALs) deben representar a la variedad de pesos sobre la vía. Por ello deben ser determinados en base a los pesajes en campo. Si se tiene la información disponible, se debe considerar el espectro de las diversas cargas (por eje y vehículo) que circulan por la carretera en vez de un peso promedio.

- Si se toman en cuenta valores promedio se subestima el efecto de los pesos por eje que están por encima de los valores promedio.
- Como el daño producido por los pesos es exponencial, el efecto del promedio no refleja una proporción directa del daño que ejercen los que están por encima del promedio. No refleja una situación real.
- Solo podrían considerarse los pesos por eje promedio si no se cuenta con información de campo y que además reflejen situaciones de variación de pesos por eje en un rango muy estrecho y cercano al promedio.

En este documento se muestra el espectro de los diferentes pesos por eje para el camión con eje trasero simple. También se muestra el efecto si se consideran pesos promedio.

- La base de datos debe ser procesada construyendo **cuadros de frecuencias** por tipo de vehículo y configuración de ejes.
- Los cuadros de frecuencia se construyen tomando en cuenta rangos de pesos de 1000

Kg (1 ton). Este rango es el más apropiado para estos análisis. Un rango menor solo aumenta el procesamiento y no aporta mayor exactitud al resultado y, un rango mayor no permite una mejor visualización de la distribución de cargas por ejes.

- El cuadro que sigue es una plantilla para este tipo de procesamiento. Las dos primeras columnas indican el rango de pesos para las frecuencias. La tercera columna presenta la media del rango.
- Las siguientes columnas presentan los campos para registrar la frecuencia de ejes (No. de ejes) que caen en el rango de las dos primeras columnas. Los camiones rígidos ocupan las dos primeras columnas (eje delantero y, eje trasero ya sea eje simple o tandem), las otras columnas se consideran para los otros ejes traseros de vehículos articulados. Dependiendo de la conformación de ejes de los vehículos se pueden añadir más columnas que representen a más ejes traseros articulados.

**Cuadro 5: Plantilla para establecer las frecuencias por eje y tipo de vehículo**

| TIPO DE CAMION:          |       |       | CONFIGURACION DE EJES:                |                 |                 |                 |
|--------------------------|-------|-------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RANGO PESOS              |       |       | FRECUENCIA (No. EJES POR TIPO DE VEH) |                 |                 |                 |
| KG                       | KG    | KG    | EJE DELANTERO                         | 1er EJE TRASERO | 2do EJE TRASERO | 3er EJE TRASERO |
| 0                        | 999   | 500   |                                       |                 |                 |                 |
| 1000                     | 1999  | 1500  |                                       |                 |                 |                 |
| 2000                     | 2999  | 2500  |                                       |                 |                 |                 |
| 3000                     | 3999  | 3500  |                                       |                 |                 |                 |
| 4000                     | 4999  | 4500  |                                       |                 |                 |                 |
| ..                       | ..    | ..    |                                       |                 |                 |                 |
| ..                       | ..    | ..    |                                       |                 |                 |                 |
| 30000                    | 30999 | 30500 |                                       |                 |                 |                 |
| 31000                    | 31999 | 31500 |                                       |                 |                 |                 |
| 32000                    | 32999 | 32500 |                                       |                 |                 |                 |
| 33000                    | 33999 | 33500 |                                       |                 |                 |                 |
| 34000                    | 34999 | 34500 |                                       |                 |                 |                 |
| Elaboracion: P. Condarco |       |       |                                       |                 |                 |                 |

El cuadro que sigue muestra la distribución de pesos para el camión rígido tipo 11 (eje delantero simple de 2 llantas y eje trasero simple de 4 llantas).

- Para vehículos articulados el procedimiento es similar tomando en cuenta la configuración de ejes respectiva.

En el cuadro de frecuencias además de las columnas iniciales se tienen otras 6 columnas:

- Las columnas 6 y 7 muestran la proporción porcentual de las frecuencias de ejes en cada rango.
- Las columnas 8 y 9 presentan los valores de las cargas por eje respectivas (LEF) para la media del rango (s/g tablas AASHTO). Para estos valores se adoptaron Un Número estructural SN igual a 2.0 y una serviciabilidad de 2.5
- Las dos últimas columnas (10 y 11) presentan los ejes equivalentes para cada rango de peso por tipo de eje (ESAL eje\_delantero y ESAL eje\_trasero) que es el producto del factor LEF por la proporción o frecuencia de peso. La suma en cada eje representa el ESAL ponderado para ese eje.
- La suma de los ESAL de las columnas 10 y 11 permite determinar los ejes equivalentes de cada tipo de camión, y que representan a la distribución de las frecuencias de peso (espectro de cargas por eje).

$$ESAL_{Eje Delant} = \sum_i [(\% Ejes)_{Rango i} * (LEF_d)_i]$$

$$ESAL_{Eje Trasero} = \sum_i [(\% Ejes)_{Rango i} * (LEF_t)_i]$$

- Finalmente la suma de los ejes equivalentes de cada columna (eje) determina el Factor-Camión (TF) que se muestra en la última fila del cuadro.

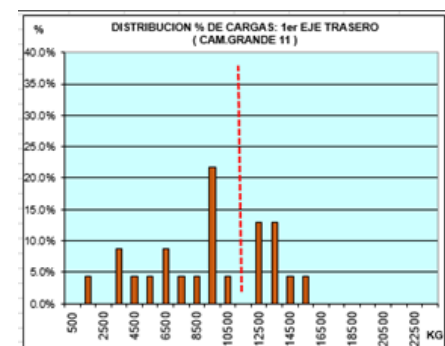
$$TF = (ESAL \text{ eje delantero} + ESAL \text{ eje trasero})$$

$$TF = \sum_i [(\% Ejes_d)_{Rango i} * (LEF_d)_{Rango i}] + \sum_i [(\% Ejes_t)_{Rango i} * (LEF_t)_{Rango i}]$$

- En este ejemplo para el caso del camión de ejes simples se tiene un TF = 4.3261 y,
- Con un procedimiento similar se obtiene para el camión de eje trasero tandem: TF = 3.4743

**Cuadro 6. Cuadro de frecuencias, espectro de cargas por eje y determinación del factor camión (TF).  
Camión grande 11**

| TIPO DE VEHICULO =               |       | 11       | C2 CAMION GRANDE 2 EJES |                 | SN            |                 | 2.0                 | pt                  |              | 2.5                  |  |
|----------------------------------|-------|----------|-------------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------|----------------------|--|
| 1                                | 2     | 3        | 4                       | 5               | 6             | 7               | 8                   | 9                   | 10           | 11                   |  |
| RANGO PESOS                      | MEDIA | No. EJES | PROPORCION PORCENTUAL % |                 |               |                 |                     |                     |              |                      |  |
| KG                               | KG    | KG       | EJE DELANTERO           | 1er EJE TRASERO | EJE DELANTERO | 1er EJE TRASERO | LEF Eje Del         | LEF 1er Eje Trasero | ESAL Eje Del | ESAL 1er Eje Trasero |  |
| 0                                | 999   | 500      | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 0.0002              | 0.0002              | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 1000                             | 1999  | 1500     | 0                       | 1               | 0.0%          | 4.3%            | 0.0028              | 0.0028              | 0.0000       | 0.0001               |  |
| 2000                             | 2999  | 2500     | 2                       | 0               | 8.7%          | 0.0%            | 0.0138              | 0.0138              | 0.0012       | 0.0000               |  |
| 3000                             | 3999  | 3500     | 0                       | 2               | 0.0%          | 8.7%            | 0.0428              | 0.0428              | 0.0000       | 0.0037               |  |
| 4000                             | 4999  | 4500     | 6                       | 1               | 26.1%         | 4.3%            | 0.1000              | 0.1000              | 0.0261       | 0.0043               |  |
| 5000                             | 5999  | 5500     | 8                       | 1               | 34.8%         | 4.3%            | 0.2086              | 0.2086              | 0.0725       | 0.0091               |  |
| 6000                             | 6999  | 6500     | 4                       | 2               | 17.4%         | 8.7%            | 0.4011              | 0.4011              | 0.0698       | 0.0349               |  |
| 7000                             | 7999  | 7500     | 3                       | 1               | 13.0%         | 4.3%            | 0.7182              | 0.7182              | 0.0937       | 0.0312               |  |
| 8000                             | 8999  | 8500     | 0                       | 1               | 0.0%          | 4.3%            | 1.2137              | 1.2137              | 0.0000       | 0.0528               |  |
| 9000                             | 9999  | 9500     | 0                       | 5               | 0.0%          | 21.7%           | 1.9571              | 1.9571              | 0.0000       | 0.4255               |  |
| 10000                            | 10999 | 10500    | 0                       | 1               | 0.0%          | 4.3%            | 3.0255              | 3.0255              | 0.0000       | 0.1315               |  |
| 11000                            | 11999 | 11500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 4.5159              | 4.5159              | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 12000                            | 12999 | 12500    | 0                       | 3               | 0.0%          | 13.0%           | 6.5560              | 6.5560              | 0.0000       | 0.8551               |  |
| 13000                            | 13999 | 13500    | 0                       | 3               | 0.0%          | 13.0%           | 9.2227              | 9.2227              | 0.0000       | 1.2030               |  |
| 14000                            | 14999 | 14500    | 0                       | 1               | 0.0%          | 4.3%            | 12.7767             | 12.7767             | 0.0000       | 0.5555               |  |
| 15000                            | 15999 | 15500    | 0                       | 1               | 0.0%          | 4.3%            | 17.3893             | 17.3893             | 0.0000       | 0.7561               |  |
| 16000                            | 16999 | 16500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 23.2534             | 23.2534             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 17000                            | 17999 | 17500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 30.5948             | 30.5948             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 18000                            | 18999 | 18500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 39.5850             | 39.5850             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 19000                            | 19999 | 19500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 50.5366             | 50.5366             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 20000                            | 20999 | 20500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 63.7812             | 63.7812             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 21000                            | 21999 | 21500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 79.5806             | 79.5806             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 22000                            | 22999 | 22500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            | 98.6868             | 98.6868             | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 23000                            | 23999 | 23500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 24000                            | 24999 | 24500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 25000                            | 25999 | 25500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 26000                            | 26999 | 26500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 27000                            | 27999 | 27500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 28000                            | 28999 | 28500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 29000                            | 29999 | 29500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 30000                            | 30999 | 30500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 31000                            | 31999 | 31500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 32000                            | 32999 | 32500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 33000                            | 33999 | 33500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| 34000                            | 34999 | 34500    | 0                       | 0               | 0.0%          | 0.0%            |                     |                     | 0.0000       | 0.0000               |  |
| SUMA =                           |       |          | 23                      | 23              | 100.0%        | 100.0%          | ESAL <sub>s</sub> = |                     | 0.2633       | 4.0628               |  |
| EJES DENTRO DEL LIMITE (%) =     |       |          |                         |                 | 87.0%         | 65.2%           | OR CAMION (TF) =    |                     | 4.3261       |                      |  |
| EJES QUE EXCEDEN EL LIMITE (%) = |       |          |                         |                 | 13.0%         | 34.8%           |                     |                     |              |                      |  |



Fuente: Elaboración P. Condarco en base a datos de campo de Pesajes por Eje. Estación CKOCHIS. 2016

- El Factor Camión (TF) en el cuadro anterior es para **vehículos cargados**, no incluye vacíos, aspecto que debe establecerse con un procedimiento similar.
- Los histogramas de frecuencias de pesos por eje adjuntos al cuadro muestran el espectro de cargas en cada eje. Así, para el camión con eje trasero simple (tipo 11) el eje-delantero muestra una mayor concentración de los pesos entre los 4500 Kg hasta los 6500 Kg, mientras en el eje-trasero-simple existe mayor dispersión de pesos tanto por debajo de la Ley (11 ton para este eje) como por

encima de este, los que exceden este límite llegan hasta 15.5 ton (15500 Kg.).

Para los factores LEF (columnas 8 y 9) se asumieron los parámetros del número estructural (SN) y serviciabilidad final (pt) de acuerdo a recomendaciones internacionales:

- Sobre el número estructural SN se pueden considerar valores de 1, 2, 3, 4, 5, ó 6. Se sugiere un valor de SN = 2 para el diseño de carreteras de bajo volumen y, un valor de SN = 5 ó 6 para carreteras de alto tráfico (autopistas, etc.)



- Para la serviciabilidad final 'pt' se tienen valores de 2.0, 2.5, ó 3.0. Se sugiere una serviciabilidad  $pt = 2.0$  para carreteras de bajo volumen, y  $pt = 2.5$  ó  $3.0$  para carreteras de alto tráfico (autopistas, etc)

Considerando que los volúmenes vehiculares en Bolivia no son precisamente altos, en el ejemplo se consideraron un Número estructural SN igual a 2.0 y una serviciabilidad de  $pt = 2.5$ .

En caso de adoptar otro SN y otro 'pt' se deben establecer nuevamente los LEF pues estos pueden diferir. Por ejemplo si se consideran un  $SN=2.5$  y una  $pt=2.5$  se tendrían los resultados que siguen para dos casos:

- Camión de ejes simples  $TF = 4.0256$
- Camión eje-trasero tándem  $TF = 3.3178$

**Cuadro 7. Factor Camión-TF considerando diferente numero estructural (SN)**

| TIPO EJE | DESCRIPCION           | SN  | pt  | ESAL Eje Del | ESAL 1er Eje Trasero | FACT CAMION (TF) | VARI AC. TF |
|----------|-----------------------|-----|-----|--------------|----------------------|------------------|-------------|
| 11       | C2 CAMION GRDE 2 EJES | 2.0 | 2.5 | 0.2633       | 4.0628               | 4.3261           |             |
|          |                       | 2.5 | 2.5 | 0.2751       | 3.7505               | 4.0256           | -6.9%       |
| 12       | C2 CAMION GRDE 3 EJES | 2.0 | 2.5 | 0.6365       | 2.8378               | 3.4743           |             |
|          |                       | 2.5 | 2.5 | 0.6313       | 2.6865               | 3.3178           | -4.5%       |

Fuente: Elaboración P. Condarco

Si se incrementa el número estructural se aprecia una reducción de los TF. Esta variación no es constante, depende también de la dispersión o frecuencia de ejes en la ruta. Su impacto real dependerá del volumen vehicular a tomar en cuenta, es decir si el volumen es alto también lo será la diferencia de los ESALs.

### 6.3 Pesos por Eje sobrecargados

Analizando el caso del camión rígido tipo 11 (eje trasero simple) si se consideran los límites de la Ley de Cargas:

- ✓ En el eje delantero (eje simple 2 llantas) el 87% de los pesos están dentro del límite (7t) y un 13% están por encima de este.
- ✓ En el eje trasero (eje simple cuatro llantas) un 65.2% está dentro de la Ley (11t) y un 34.8% excede el límite.

- ✓ Un análisis similar se puede efectuar para otros tipos de camiones.

### 6.4 Ejes Equivalentes considerando Pesos Promedio por Eje

Para mostrar lo comentado sobre el uso de pesos promedio por eje, se ha efectuado un análisis de la misma información pero utilizando pesos promedio ponderado.

- Los pesos promedio ponderado por eje fueron obtenidos en función a la frecuencia de pesos de acuerdo a las tablas precedentes.
- Posteriormente, se determinaron los factores equivalentes LEF para esos pesos promedio y el factor TF para cada tipo de camión.

Los resultados se presentan en los cuadros que siguen donde se muestra la distribución promedio de pesos por eje y los histogramas respectivos para un camión rígido con eje trasero simple (4 llantas) y otro camión rígido con eje trasero tándem (8 llantas). Esta información puede servir cuando se quiere realizar una distribución promedio general del peso total (tara + carga) sobre los ejes por tipo de camión. Así:

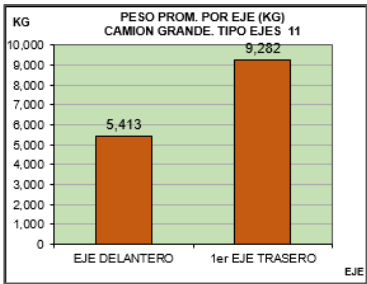
- Para el camión con ejes simples el 37% del peso descarga en el eje delantero y el 63% en el eje trasero.
- En el camión con eje trasero tándem (tipo 12), del peso total un 29% descarga sobre el eje delantero y 71% en el trasero (tándem). Esta distribución es lógica pues el eje tándem a diferencia del eje trasero simple tiene que soportar un mayor peso.

**Cuadro 8. Factor Camión-TF considerando pesos promedio ponderados**  
**Tipo vehículo: camión grande 11**

| CONFIG. EJES | TOTAL (Kg)     | PESO PROM. EJE DELANTE RO Kg | PESO PROM. 1er EJE TRASERO Kg | FACTOR CAMION (TF) |
|--------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 1          | 14,695<br>100% | 5,413<br>37%                 | 9,282<br>63%                  |                    |
| F.EQ CARGA   | LEF =          | 0.1951                       | 1.7644                        | <b>1.9595</b>      |

Fuente: Elaboración P. Condarco

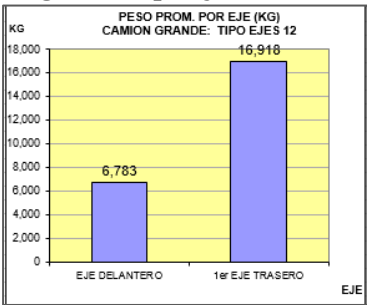
Fig. 6. Histograma de pesos promedio por eje camión grande tipo ejes: 11



Cuadro 9. Factor Camión – TF considerando pesos promedio ponderados  
Tipo vehículo: camión grande 12

| CONFIG. EJES | TOTAL (Kg)     | PESO PROM. EJE DELANTE RO Kg | PESO PROM. 1er EJE TRASERO Kg | FACTOR CAMIÓN (TF) |
|--------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 2          | 23,702<br>100% | 6,783<br>29%                 | 16,918<br>71%                 |                    |
| F.EQ_CARGA   | LEF =          | 0.4804                       | 1.6110                        | 2.0914             |

Fig. 7. Histograma de pesos promedio por eje camión grande tipo ejes: 12



Comparando los TF determinados considerando el espectro de pesos contra los TF determinados considerando los pesos promedio se tiene el siguiente resumen donde se observa que el TF según los pesos promedio es menor en cualquiera de los dos casos. Ello se debe a que los pesos promedio subestiman el efecto dañino de los pesos mayores al promedio.

La diferencia fácilmente puede ser más del 100%, esta situación ocurre cuando se tienen pesos distribuidos en un rango amplio. No es fácil indicar un porcentaje exacto pues ello depende del lugar, del tipo de vehículo, del rango de variación de los pesos por eje, etc.

Cuadro 10. Comparación de Factores Camión (TF) s/g Espectro de Cargas vs s/g Pesos Promedio

| TIPO DE CAMIÓN | TIPO DE EJES | S/G ESPECTRO DE CARGAS TF | S/G PESOS PROMEDIO TF |
|----------------|--------------|---------------------------|-----------------------|
| Camión Grande  | 11           | 4.3261                    | 1.9595                |
| Camión Grande  | 12           | 3.4743                    | 2.0914                |

Al final de este documento se muestra la distribución de pesos promedio ponderados obtenidos de una muestra mayor.

7. LOS EJES EQUIVALENTES (ESALs) EN UNA VÍA

7.1 La configuración de ejes y los factores de equivalencia

Determinados los ejes equivalentes por eje y tipo de vehículo (LEF y TF), tanto para cargados como para vehículos vacíos, se puede preparar un cuadro resumen de configuración de ejes para la flota vehicular que circula por la ruta junto con sus respectivos ejes equivalentes. La figura que sigue muestra una configuración de ejes por tipo de vehículo donde se añaden los vehículos livianos para los cuales también puede analizarse los ejes equivalentes si se dispone de la información. Ya se mencionó que su impacto en los ejes equivalentes totales de un periodo (ESALs) es insignificante como se verá posteriormente.

Fig. 8. Codificación de ejes por tipo de vehículo

| CONFIGURACION DE EJES POR TIPO DE VEHICULO (DETERMINADO EN EL ESTUDIO DE TRAFICO) |                 |           |            |         |          |         |          |          |           |           |           |           |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|------------|---------|----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Tipo veh s/g Aforos:                                                              |                 | 1         | 2          | 3       | 4        | 5       | 6        | 7        | 8         | 9         | 10.1      | 11        | 12    |
| ITEM                                                                              | EJES            | VAG, JEEP | CAMIONETAS | MINIBUS | MICROBUS | BUS MED | BUS GRDE | CAM. MED | C. GRDE 2 | C. GRDE 3 | C. SEMI R | C. REMOLQ | OTROS |
| CONFIG. EJES                                                                      | EJE DELANTERO   | 1         | 1          | 1       | 1        | 1       | 1        | 1        | 1         | 1         | 1         | 1         | 1     |
|                                                                                   | 1er EJE TRASERO | 1         | 1          | 1       | 1        | 1       | 1        | 1        | 1         | 2         | 2         | 2         | 1     |
|                                                                                   | 2do EJE TRASERO |           |            |         |          |         |          |          |           |           | 3         | 1         |       |
|                                                                                   | 3er EJE TRASERO |           |            |         |          |         |          |          |           |           |           | 2         |       |

Posteriormente se puede establecer en un cuadro resumen los LEF y el TF determinados para el espectro vehicular de cada grupo como sigue.

**Cuadro 11. Factores camión según el espectro de pesos por tipo de eje**

| Tipo veh s/g Aforos: |                 | 8        | 9        |
|----------------------|-----------------|----------|----------|
| ITEM                 | EJES            | C.GRDE 2 | C.GRDE 3 |
| CONFIG. EJES         | EJE DELANTERO   | 1        | 1        |
|                      | 1er EJE TRASERO | 1        | 2        |
|                      | 2do EJE TRASERO | --       | --       |
|                      | 3er EJE TRASERO | --       | --       |
| FACTOR               | EJE DELANTERO   | 0.2633   | 0.6365   |
| EQUIV CARGA          | 1er EJE TRASERO | 4.0628   | 2.8378   |
| LEF                  | 2do EJE TRASERO | --       | --       |
| <b>CARGADOS</b>      | 3er EJE TRASERO | --       | --       |
| FACTOR CAMION (TF) = |                 | 4.3261   | 3.4743   |
| FACTOR               | EJE DELANTERO   | 0.0992   | 0.1453   |
| EQUIV CARGA          | 1er EJE TRASERO | 0.2106   | 0.0450   |
| LEF                  | 2do EJE TRASERO | --       | --       |
| <b>VACIOS</b>        | 3er EJE TRASERO | --       | --       |
| FACTOR CAMION (TF) = |                 | 0.3098   | 0.1903   |

- La primera sección del cuadro (CONFIG. EJES) presenta la configuración de ejes.
- La segunda y tercera sección registran los factores de equivalencia (LEF) para ‘vehículos cargados y, ‘vehículos vacíos’, ambos determinados según el espectro vehicular de pesos respectivo. También se tiene el Factor Camión (TF) para cargados y vacíos..

## 7.2 Vehículos Cargados y Vehículos Vacíos

La información generada en el estudio de tráfico proporciona la proporción de los vehículos ‘cargados’ (ya sea en su capacidad, por debajo o por encima de su capacidad) y la de los vehículos que circulan ‘vacíos’, como ejemplo se puede establecer que:

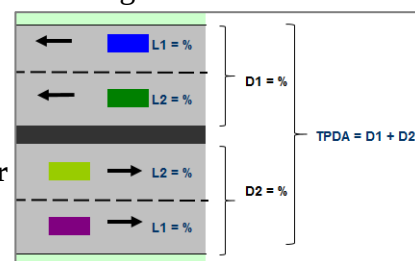
- En promedio para la vía en estudio, un 65% de los camiones rígidos circulan cargados y un 35% circulan vacíos.
- En el caso de los camiones articulados el 71% circula cargado y el 29% vacío. Etc.

Estos valores deben ser tomados en cuenta en el cálculo de los ejes equivalentes.

## 7.3 Distribución del TPDA por Sentido y Carril

Se debe establecer la dirección más cargada para el diseño del pavimento. Por ejemplo del estudio de tráfico se puede establecer una distribución direccional de 52% del TPDA para el sentido más cargado. Si la carretera tiene más de un carril por sentido, también se debe establecer el carril más cargado (carril de diseño). Si la carretera es simple (dos sentidos, un carril por sentido) el carril de diseño corresponderá al carril del sentido más cargado.

**Fig. 9**  
**Distribución direccional y proporción por carril**



## 7.4 Cálculo de los Ejes Equivalentes (ESALs)

### 7.4.1 TPDA, El Período de Análisis y, el Total Vehículos del período

El cálculo de los ESAL para la ruta en estudio debe considerar el TPDA determinado y proyectado en el Estudio de Tráfico en función del cual se establece el total de vehículos para un período determinado (10 años, 20 años, etc.).

$$\text{TOT. VEH}_i \text{ PERIODO} = 365 \times \sum_N (\text{TPDA}_i)_N$$

i = tipo de vehículo

N = Año ‘N’ del período considerado

En el cuadro a continuación la última fila presenta el volumen acumulado de los 20 años por tipo de vehículo.

### 7.4.2 El procedimiento del Cálculo de los Ejes Equivalentes (ESAL)

Conocidos los factores de carga equivalentes por eje, el factor camión, el TPDA, el Total de Vehículos para el período de análisis por tipo de vehículo, los factores camión cargados y vacíos, proporción de vehículos cargados y la distribución direccional, se procede a determinar los ejes equivalentes (ESALs) totales para el tramo o ruta en estudio. Un ejemplo para dos vehículos se muestra a continuación:

Cuadro 12. TPDA proyectado - determinación del total de vehículos para el periodo

|                     |                  |                                             |           |           |         |         |          |           |          |          |          |          |       |            |  |  |  |
|---------------------|------------------|---------------------------------------------|-----------|-----------|---------|---------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-------|------------|--|--|--|
| Proyecto:           |                  | TRAFICO TOTAL (NORMAL + GENERADO) (Veh/dia) |           |           |         |         |          |           |          |          |          |          |       |            |  |  |  |
| PROYECCION DEL TPDA |                  |                                             |           |           |         |         |          |           |          |          |          |          |       |            |  |  |  |
| Tramo:              |                  |                                             |           |           |         |         |          |           |          |          |          |          |       |            |  |  |  |
|                     | Tipo veh Aforos: | 1                                           | 2         | 3         | 4       | 5       | 6        | 7         | 8        | 9        | 10.1     | 11       | 12    |            |  |  |  |
|                     | AÑO              | VAG,JEOP                                    | CAMIONETA | MINIBUS   | MICROBU | BUS MED | BUS GRDE | CAM.MED   | C.GRDE 2 | C.GRDE 3 | C.SEMI R | C.REMOLC | OTROS | TOTAL      |  |  |  |
| 1                   | 2020             | 252                                         | 63        | 316       | 1       | 64      | 33       | 139       | 46       | 26       | 2        | 1        | 0     | 944        |  |  |  |
| 2                   | 2021             | 268                                         | 67        | 336       | 1       | 67      | 35       | 149       | 49       | 28       | 3        | 1        | 0     | 1005       |  |  |  |
| 3                   | 2022             | 285                                         | 72        | 357       | 1       | 72      | 38       | 159       | 53       | 30       | 3        | 1        | 0     | 1069       |  |  |  |
| 4                   | 2023             | 303                                         | 76        | 379       | 1       | 76      | 40       | 171       | 56       | 32       | 3        | 1        | 0     | 1138       |  |  |  |
| 5                   | 2024             | 322                                         | 81        | 403       | 1       | 81      | 42       | 183       | 60       | 34       | 3        | 1        | 0     | 1212       |  |  |  |
| 6                   | 2025             | 342                                         | 86        | 429       | 1       | 86      | 45       | 195       | 64       | 36       | 3        | 1        | 0     | 1290       |  |  |  |
| 7                   | 2026             | 364                                         | 91        | 456       | 1       | 91      | 48       | 209       | 69       | 39       | 4        | 2        | 0     | 1373       |  |  |  |
| 8                   | 2027             | 387                                         | 97        | 485       | 1       | 97      | 51       | 224       | 74       | 41       | 4        | 2        | 0     | 1462       |  |  |  |
| 9                   | 2028             | 411                                         | 103       | 515       | 1       | 103     | 54       | 239       | 79       | 44       | 4        | 2        | 0     | 1556       |  |  |  |
| 10                  | 2029             | 437                                         | 110       | 547       | 1       | 109     | 57       | 256       | 84       | 48       | 4        | 2        | 0     | 1657       |  |  |  |
| 11                  | 2030             | 451                                         | 113       | 566       | 1       | 113     | 59       | 271       | 89       | 50       | 5        | 2        | 0     | 1721       |  |  |  |
| 12                  | 2031             | 466                                         | 117       | 584       | 1       | 116     | 61       | 287       | 94       | 53       | 5        | 2        | 0     | 1788       |  |  |  |
| 13                  | 2032             | 482                                         | 121       | 603       | 2       | 120     | 63       | 303       | 100      | 56       | 5        | 2        | 0     | 1858       |  |  |  |
| 14                  | 2033             | 498                                         | 125       | 623       | 2       | 123     | 65       | 321       | 106      | 60       | 6        | 2        | 0     | 1930       |  |  |  |
| 15                  | 2034             | 514                                         | 129       | 644       | 2       | 127     | 67       | 339       | 112      | 63       | 6        | 2        | 0     | 2006       |  |  |  |
| 16                  | 2035             | 531                                         | 133       | 665       | 2       | 131     | 69       | 359       | 118      | 67       | 6        | 3        | 0     | 2085       |  |  |  |
| 17                  | 2036             | 549                                         | 138       | 687       | 2       | 135     | 71       | 380       | 125      | 70       | 7        | 3        | 1     | 2167       |  |  |  |
| 18                  | 2037             | 567                                         | 142       | 710       | 2       | 139     | 73       | 402       | 133      | 75       | 7        | 3        | 1     | 2253       |  |  |  |
| 19                  | 2038             | 585                                         | 147       | 733       | 2       | 144     | 75       | 425       | 140      | 79       | 7        | 3        | 1     | 2342       |  |  |  |
| 20                  | 2039             | 605                                         | 152       | 757       | 2       | 148     | 78       | 450       | 148      | 83       | 8        | 3        | 1     | 2435       |  |  |  |
| OT VEH PERIODO=     |                  | 3,145,922                                   | 790,365   | 3,940,852 | 10,068  | 781,397 | 410,480  | 1,993,802 | 657,206  | 369,842  | 34,332   | 14,313   | 2,680 | 12,151,260 |  |  |  |

Fuente: Proyecto Unduavi – Chulumani. 2016. TPDA proyectado La Florida – Pte Villa (supuesto optimista)

- La primera parte (a) presenta los tipos de vehículos, la configuración de ejes, los factores de equivalencia (LEF) por tipo de vehículo y tipo de ejes. El Factor Camión (TF) tanto de vehículos cargados como de vacíos que en cada caso es determinado por la suma de los respectivos LEF.
- La segunda parte (b) muestra el número de vehículos para todo el periodo de análisis (obtenido del cuadro del TPDA precedente) la proporción de cargados y vacíos, y los volúmenes (veh) de cargados y vacíos en función a esta proporción.
- Los ESAL se determinan multiplicando el TF por tipo de vehículo por el TPDA cargados y vacíos ( $TPDA_{cargado} * TF_{cargado}$  y  $TPDA_{vacío} * TF_{vacío}$ ) para al final determinar el ESAL total que es la suma de los ejes equivalentes cargados más los ejes equivalentes de vacíos.
- Estos ESAL son posteriormente afectados por la distribución direccional (DD) para determinar el ESAL para el carril de diseño.

También se muestra el Factor Camión ponderado en cada tramo.

Cuadro 13. LEF cargados y vacíos para el ejemplo

(a) DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES ' LEF ' Y EL FACTOR CAMION ' TF '

| Tipo veh s/g Aforos:                   |                 | 8        | 9        |
|----------------------------------------|-----------------|----------|----------|
| ITEM                                   | EJES            | C.GRDE 2 | C.GRDE 3 |
| CONFIG. EJES                           | EJE DELANTERO   | 1        | 1        |
|                                        | 1er EJE TRASERO | 1        | 2        |
|                                        | 2do EJE TRASERO | --       | --       |
|                                        | 3er EJE TRASERO | --       | --       |
| FACTOR EQUIV CARGA LEF <b>CARGADOS</b> | EJE DELANTERO   | 0.3628   | 0.7647   |
|                                        | 1er EJE TRASERO | 5.9796   | 0.8586   |
|                                        | 2do EJE TRASERO |          |          |
|                                        | 3er EJE TRASERO |          |          |
| FACTOR CAMION (TF) =                   |                 | 6.34248  | 1.6232   |
| FACTOR EQUIV CARGA LEF <b>VACIOS</b>   | EJE DELANTERO   | 0.1616   | 0.1953   |
|                                        | 1er EJE TRASERO | 0.2766   | 0.0587   |
|                                        | 2do EJE TRASERO | --       | --       |
|                                        | 3er EJE TRASERO | --       | --       |
| FACTOR CAMION (TF) =                   |                 | 0.43817  | 0.2540   |



(b) CALCULO DE LOS ESAL POR TIPO DE VEH. PARA EL TRAMO EN ANALISIS

|                                |           |         |
|--------------------------------|-----------|---------|
| TOT VEH PERIODO (veh) =        | 657,206   | 369,842 |
| VEH CARGADOS % =               | 65.0%     | 65.0%   |
| VEH. VACIOS % =                | 35.0%     | 35.0%   |
| VEH. CARGADOS (veh) =          | 427,184   | 240,397 |
| VEH. VACIOS (veh) =            | 230,022   | 129,445 |
| Veh. Cargados ESAL's =         | 2,709,404 | 390,224 |
| Veh. Vacios ESAL's =           | 100,789   | 32,880  |
| Suma ESALs =                   | 2,810,194 | 423,104 |
| FACTOR CAMION PONDERADO (TF) = | 4.2760    | 1.1440  |

|                                 |           |         |
|---------------------------------|-----------|---------|
| PORCIENTO TRAF DIRECCIONAL =    | 52%       | 52%     |
| PORCIENTO TRAF CARRIL DISEÑO =  | 100%      | 100%    |
| NUMERO ESALs CARRIL DE DISEÑO = | 1,461,301 | 220,014 |

Elaboración P. Condarco

Por ejemplo: para el camión (C.GRDE 2) el ESAL para un período de 20 años seria:

ESAL Veh. Cargado =

$$TF_{\text{camión}} * \text{Tot.Veh.Periodo} * \% \text{Veh.Cargado}$$

ESAL (20 años) Veh. Cargado =

$$(6.34248) * (657,206) * (65\%) = 2,709,405$$

ESAL (20 años) Veh. Vacío =

$$(0.43817) * (657,206) * (35\%) = 100,789$$

Total ESAL (vacío + cargado) = 2,810,194

ESAL(Carril Diseño)= 2,810,194\*0.52\*1= 1,461,301

Se procede de forma similar para cada grupo vehicular.

### 7.4.3 Factor Camión Ponderado (TF) por tipo de vehículo y escenario

En la sección (b) del cuadro anterior se presenta el 'Factor Camión Ponderado', que no es más que el Factor Camión TF (Truck Factor) determinado para cada vehículo tomando en cuenta la proporción de cargados y vacíos:

$$TF \text{ Ponderado} = (TF_{\text{cargado}} * \% \text{Cargados} + TF_{\text{vacíos}} * \% \text{Vacíos}),$$

La ventaja de este factor radica en que permite efectuar una aplicación directa al TPDA por año o a la suma de los vehículos de un período (por tipo de vehículo). Multiplicando directamente este factor ponderado por el TPDA de ese grupo vehicular (cargados + vacíos) se obtiene el

mismo total de ejes equivalentes pues ya incluye la proporción de cargados y vacíos.

## 8. EJEMPLO DE CÁLCULO DE ESALs

Como ejemplo del procedimiento mostrado, se presenta a continuación el cálculo de ejes equivalentes para un tramo vial. Esta aplicación traducida en cuadros comprende los siguientes incisos:

- ❖ El inciso (A) presenta la flota vehicular considerada y el TPDA respectivo proyectado para un período de 20 años. Al final del cuadro se tiene la suma total del período analizado (por tipo de vehículo).
- ❖ El inciso (B) muestra los tipos de configuración de ejes para la flota vehicular, los factores LEF y TF para vehículos cargados como vehículos vacíos.
- ❖ El inciso (C) muestra la determinación de los ESAL de la manera ya descrita. Se indica la proporción de los vehículos cargados y vacíos y los ejes equivalentes. Al final se establece el Factor Camión Ponderado (TFp).
- ❖ El inciso (D) presenta el cálculo de los ejes equivalentes para el carril de diseño. Se tiene distribución direccional y, la proporción para el carril de diseño. En este ejemplo para el carril de diseño se considera igual a 100%, que indica que se está considerando una carretera de dos sentidos con un carril por sentido.
- ❖ En el inciso (E) se tiene el cálculo de los ESALs anuales para el carril de diseño. De este cuadro se pueden obtener directamente el total de ejes anuales para cualquier período que desee conocerse, es decir 5 años, 10 años, 15 años, etc. La última columna muestra el total de ESALs para períodos de 10 años.

Para el período de 20 años en la penúltima fila se muestra un total de ESALs = **3,108,870** para el carril de diseño que debe coincidir con el total calculado en el cuadro del inciso (D).

Cuadro 14. Cuadros de la aplicación

| A) PROYECCION DEL TPDA |             | TRAFICO TOTAL (NORMAL + GENERADO) (Yeh/dia) |           |           |         |          |          |          |          |              |                |        | D.DIRECC  |     |
|------------------------|-------------|---------------------------------------------|-----------|-----------|---------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------------|--------|-----------|-----|
| Tramo:                 |             |                                             |           |           |         |          |          |          |          |              |                |        | SENT1 =   | 51% |
| TIPO VEH =             | 1           | 2                                           | 3         | 4         | 5       | 6        | 7        | 8        | 9        | 10           | 11             | 12     | SENT 2 =  | 49% |
| AÑO                    | AUTOM, JEEP | CAMIONET AS                                 | MINIBUS   | MICROB US | BUS MED | BUS GRDE | CAM. MED | C.GRDE 2 | C.GRDE 3 | C.SEMI R 123 | C.REMOL Q 1112 | OTROS  | TOTAL     |     |
| 2016                   | 124         | 108                                         | 124       | 10        | 35      | 43       | 47       | 26       | 14       | 2            | 2              | 1      | 537       |     |
| 2017                   | 132         | 115                                         | 132       | 10        | 38      | 46       | 51       | 28       | 15       | 2            | 2              | 1      | 574       |     |
| 2018                   | 141         | 123                                         | 141       | 11        | 40      | 50       | 55       | 30       | 16       | 2            | 2              | 1      | 615       |     |
| 2019                   | 151         | 132                                         | 151       | 12        | 43      | 53       | 59       | 33       | 17       | 3            | 3              | 1      | 658       |     |
| 2020                   | 162         | 141                                         | 162       | 13        | 46      | 57       | 63       | 35       | 19       | 3            | 3              | 1      | 704       |     |
| 2021                   | 173         | 150                                         | 173       | 13        | 49      | 61       | 68       | 38       | 20       | 3            | 3              | 1      | 753       |     |
| 2022                   | 185         | 161                                         | 185       | 14        | 53      | 65       | 73       | 41       | 22       | 3            | 3              | 2      | 806       |     |
| 2023                   | 198         | 172                                         | 198       | 15        | 56      | 69       | 79       | 44       | 23       | 3            | 3              | 2      | 863       |     |
| 2024                   | 211         | 184                                         | 211       | 16        | 60      | 74       | 85       | 47       | 25       | 4            | 4              | 2      | 924       |     |
| 2025                   | 226         | 197                                         | 226       | 18        | 65      | 79       | 91       | 51       | 27       | 4            | 4              | 2      | 989       |     |
| 2026                   | 242         | 210                                         | 242       | 19        | 69      | 85       | 98       | 55       | 29       | 4            | 4              | 2      | 1058      |     |
| 2027                   | 258         | 225                                         | 258       | 20        | 74      | 91       | 106      | 59       | 31       | 5            | 5              | 2      | 1132      |     |
| 2028                   | 276         | 240                                         | 276       | 22        | 79      | 97       | 114      | 63       | 34       | 5            | 5              | 2      | 1212      |     |
| 2029                   | 295         | 257                                         | 295       | 23        | 84      | 104      | 122      | 68       | 36       | 5            | 5              | 2      | 1297      |     |
| 2030                   | 316         | 275                                         | 316       | 25        | 90      | 111      | 131      | 73       | 39       | 6            | 6              | 2      | 1388      |     |
| 2031                   | 338         | 294                                         | 338       | 26        | 96      | 118      | 141      | 78       | 42       | 6            | 6              | 2      | 1486      |     |
| 2032                   | 361         | 314                                         | 361       | 28        | 103     | 127      | 152      | 84       | 45       | 7            | 7              | 2      | 1590      |     |
| 2033                   | 386         | 336                                         | 386       | 30        | 110     | 135      | 163      | 91       | 48       | 7            | 7              | 2      | 1702      |     |
| 2034                   | 413         | 359                                         | 413       | 32        | 118     | 145      | 176      | 98       | 52       | 8            | 8              | 2      | 1822      |     |
| 2035                   | 441         | 384                                         | 441       | 34        | 126     | 155      | 189      | 105      | 56       | 8            | 8              | 2      | 1950      |     |
| TOT PERIODO =          | 1,835,358   | 1,597,000                                   | 1,835,358 | 143,015   | 524,388 | 643,567  | 753,343  | 418,524  | 223,213  | 32,933       | 32,933         | 12,507 | 8,052,138 |     |

| B) DETERMINACION DE LOS FACTORES ' LEF ' Y EL FACTOR CAMION ' TF ' |                 |             |             |         |           |            |             |           |             |            |            |                |        |   |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|---------|-----------|------------|-------------|-----------|-------------|------------|------------|----------------|--------|---|
| Tipo veh:                                                          |                 | 1           | 2           | 3       | 4         | 5          | 6           | 7         | 8           | 9          | 10.1       | 11             | 12     |   |
| ITEM                                                               | EJES            | AUTOM, JEEP | CAMIONET AS | MINIBUS | MICROB US | BUS MED B2 | BUS GRDE B3 | C.MED CM2 | C.GRDE_2 C2 | C.GRDE3 C3 | C.SEMI 123 | C.REMOL Q 1112 | OTROS  |   |
| CONFIG. EJES                                                       | EJE DELANTERO   | 1           | 1           | 1       | 1         | 1          | 1           | 1         | 1           | 1          | 1          | 1              | 1      | 1 |
|                                                                    | 1er EJE TRASERO | 1           | 1           | 1       | 1         | 1          | 1           | 1         | 1           | 1          | 2          | 2              | 1      | 2 |
|                                                                    | 2do EJE TRASERO |             |             |         |           |            |             |           |             |            |            | 3              | 1      |   |
|                                                                    | 3er EJE TRASERO |             |             |         |           |            |             |           |             |            |            |                | 2      |   |
| FACTOR EQUIV CARGA LEF                                             | EJE DELANTERO   | 0.0004      | 0.0006      | 0.0009  | 0.0117    | 0.0872     | 0.4091      | 0.0403    | 0.1766      | 0.5812     | 0.4255     | 0.3578         | 0.5812 |   |
|                                                                    | 1er EJE TRASERO | 0.0004      | 0.0006      | 0.0022  | 0.0184    | 1.1246     | 3.3010      | 0.8451    | 5.3498      | 3.7706     | 0.9274     | 10.0381        | 3.7706 |   |
|                                                                    | 2do EJE TRASERO |             |             |         |           |            |             |           |             |            | 2.1170     | 10.0381        |        |   |
|                                                                    | 3er EJE TRASERO |             |             |         |           |            |             |           |             |            |            | 4.8301         |        |   |
| FACTOR CAMION ( T F ) =                                            |                 | 0.0009      | 0.0012      | 0.0032  | 0.0302    | 1.2118     | 3.7101      | 0.8854    | 5.5264      | 4.3518     | 3.4699     | 25.2639        | 4.3518 |   |
| FACTOR EQUIV CARGA LEF                                             | EJE DELANTERO   | 0.0001      | 0.0020      | 0.0010  | 0.0053    | 0.0125     | 0.0395      | 0.0177    | 0.1000      | 0.1404     | 0.2270     | 0.2729         | 0.1000 |   |
|                                                                    | 1er EJE TRASERO | 0.0001      | 0.0022      | 0.0020  | 0.0092    | 0.0579     | 1.1659      | 0.1031    | 0.3283      | 0.1356     | 0.0048     | 0.0721         | 0.3283 |   |
|                                                                    | 2do EJE TRASERO |             |             |         |           |            |             |           |             |            | 0.0033     | 0.0356         |        |   |
|                                                                    | 3er EJE TRASERO |             |             |         |           |            |             |           |             |            |            | 0.0390         |        |   |
| FACTOR CAMION ( T F ) =                                            |                 | 0.0002      | 0.0042      | 0.0030  | 0.0144    | 0.0704     | 1.2054      | 0.1208    | 0.4284      | 0.2759     | 0.2351     | 0.4195         | 0.4284 |   |

| C) CALCULO DE ESALs PARA EL TRAMO |  | AUTOM, JEEP | CAMIONET AS | MINIBUS   | MICROB US | BUS MED B2 | BUS GRDE B3 | C.MED CM2 | C.GRDE_2 C2 | C.GRDE3 C3 | C.SEMI 123 | C.REMOL Q 1112 | OTROS  |  |
|-----------------------------------|--|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|-------------|------------|------------|----------------|--------|--|
| VEH CARGADOS % =                  |  | 100.0%      | 100.0%      | 100.0%    | 100.0%    | 100.0%     | 100.0%      | 61.0%     | 61.0%       | 61.0%      | 50.0%      | 50.0%          | 61.0%  |  |
| VEH. VACIOS % =                   |  | 0.0%        | 0.0%        | 0.0%      | 0.0%      | 0.0%       | 0.0%        | 39.0%     | 39.0%       | 39.0%      | 50.0%      | 50.0%          | 39.0%  |  |
| TOT VEH PERIODO =                 |  | 1,835,358   | 1,597,000   | 1,835,358 | 143,015   | 524,388    | 643,567     | 753,343   | 418,524     | 223,213    | 32,933     | 32,933         | 12,507 |  |
| VEH. CARGADOS (veh) =             |  | 1,835,358   | 1,597,000   | 1,835,358 | 143,015   | 524,388    | 643,567     | 453,539   | 255,300     | 136,160    | 16,467     | 16,467         | 7,629  |  |
| VEH. VACIOS (veh) =               |  | 0           | 0           | 0         | 0         | 0          | 0           | 293,804   | 163,224     | 87,053     | 16,467     | 16,467         | 4,878  |  |
| Veh. Cargados ESAL's =            |  | 1,636       | 1,988       | 5,786     | 4,317     | 635,451    | 2,387,688   | 406,877   | 1,410,896   | 592,541    | 57,136     | 416,009        | 33,201 |  |
| Veh. Vacios ESAL's =              |  | 0           | 0           | 0         | 0         | 0          | 0           | 35,487    | 69,919      | 24,021     | 3,872      | 6,908          | 2,089  |  |
| Suma ESALs =                      |  | 1,636       | 1,988       | 5,786     | 4,317     | 635,451    | 2,387,688   | 442,363   | 1,480,815   | 616,563    | 61,008     | 422,917        | 35,290 |  |
| TOTAL ESALs =                     |  | 6,095,823   |             |           |           |            |             |           |             |            |            |                |        |  |
| FAC CAM PONDER. (TFp) =           |  | 0.0009      | 0.0012      | 0.0032    | 0.0302    | 1.2118     | 3.7101      | 0.5872    | 3.5382      | 2.7622     | 1.8525     | 12.8417        | 2.8217 |  |

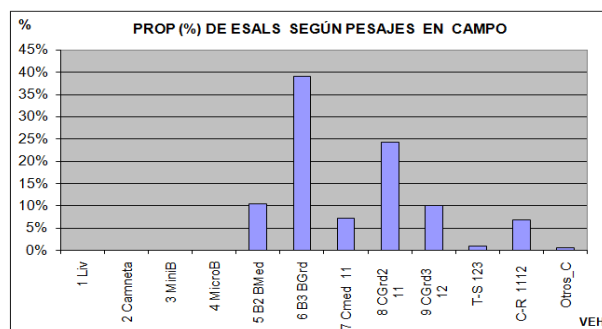
| D) CALCULO DE ESALs PARA EL CARRIL DE DISEÑO |  | AUTOM, JEEP | CAMIONET AS | MINIBUS | MICROB US | BUS MED B2 | BUS GRDE B3 | C.MED CM2 | C.GRDE_2 C2 | C.GRDE3 C3 | C.SEMI 123 | C.REMOL Q 1112 | OTROS  |  |
|----------------------------------------------|--|-------------|-------------|---------|-----------|------------|-------------|-----------|-------------|------------|------------|----------------|--------|--|
| PORCIENTO TRAF DIRECCIONAL =                 |  | 51%         | 51%         | 51%     | 51%       | 51%        | 51%         | 51%       | 51%         | 51%        | 51%        | 51%            | 51%    |  |
| PORCIENTO TRAF CARRIL DISEÑO =               |  | 100%        | 100%        | 100%    | 100%      | 100%       | 100%        | 100%      | 100%        | 100%       | 100%       | 100%           | 100%   |  |
| NUMERO ESALs CARRIL DE DISEÑO =              |  | 835         | 1,014       | 2,951   | 2,202     | 324,080    | 1,217,721   | 225,605   | 755,216     | 314,447    | 31,114     | 215,688        | 17,998 |  |
| TOTAL ESALs CARRIL DE DISEÑO =               |  | 3,108,870   |             |         |           |            |             |           |             |            |            |                |        |  |

| E ) ESALs POR AÑO PARA EL CARRIL DE DISEÑO |             |          |         |          |         |           |         |          |          |              |                |        |           |                               |
|--------------------------------------------|-------------|----------|---------|----------|---------|-----------|---------|----------|----------|--------------|----------------|--------|-----------|-------------------------------|
| Tipo veh:                                  | 1           | 2        | 3       | 4        | 5       | 6         | 7       | 8        | 9        | 10           | 11             | 12     |           |                               |
| AÑO                                        | AUTOM. JEEP | CAMIONES | MINIBUS | MICROBUS | BUS MED | BUS GRDE  | CAM.MED | C.GRDE 2 | C.GRDE 3 | C.SEMI R 123 | C.REMOL Q 1112 | OTROS  | TOTAL     | ESALs CARRIL DISEÑO C/10 AÑOS |
| 2016                                       | 21          | 25       | 73      | 54       | 7,975   | 29,964    | 5,181   | 17,344   | 7,221    | 715          | 4,953          | 670    | 74,195    |                               |
| 2017                                       | 22          | 27       | 78      | 58       | 8,526   | 32,038    | 5,572   | 18,653   | 7,767    | 769          | 5,327          | 690    | 79,526    |                               |
| 2018                                       | 23          | 29       | 83      | 62       | 9,116   | 34,255    | 5,993   | 20,062   | 8,353    | 827          | 5,730          | 711    | 85,243    |                               |
| 2019                                       | 25          | 30       | 89      | 66       | 9,747   | 36,625    | 6,445   | 21,576   | 8,984    | 889          | 6,162          | 732    | 91,372    |                               |
| 2020                                       | 27          | 33       | 95      | 71       | 10,422  | 39,160    | 6,932   | 23,205   | 9,662    | 956          | 6,627          | 754    | 97,943    |                               |
| 2021                                       | 29          | 35       | 101     | 76       | 11,143  | 41,870    | 7,456   | 24,957   | 10,391   | 1,028        | 7,128          | 776    | 104,990   |                               |
| 2022                                       | 31          | 37       | 108     | 81       | 11,914  | 44,767    | 8,018   | 26,842   | 11,176   | 1,106        | 7,666          | 800    | 112,546   |                               |
| 2023                                       | 33          | 40       | 116     | 87       | 12,739  | 47,865    | 8,624   | 28,868   | 12,020   | 1,189        | 8,245          | 824    | 120,648   |                               |
| 2024                                       | 35          | 43       | 124     | 93       | 13,620  | 51,177    | 9,275   | 31,048   | 12,927   | 1,279        | 8,867          | 848    | 129,336   |                               |
| 2025                                       | 38          | 46       | 133     | 99       | 14,563  | 54,718    | 9,975   | 33,392   | 13,903   | 1,376        | 9,537          | 874    | 138,652   | 1,034,451                     |
| 2026                                       | 40          | 49       | 142     | 106      | 15,570  | 58,505    | 10,728  | 35,913   | 14,953   | 1,480        | 10,257         | 900    | 148,642   |                               |
| 2027                                       | 43          | 52       | 152     | 113      | 16,648  | 62,553    | 11,538  | 38,624   | 16,082   | 1,591        | 11,031         | 927    | 159,355   |                               |
| 2028                                       | 46          | 56       | 162     | 121      | 17,800  | 66,882    | 12,409  | 41,541   | 17,296   | 1,711        | 11,864         | 955    | 170,843   |                               |
| 2029                                       | 49          | 60       | 173     | 129      | 19,032  | 71,510    | 13,346  | 44,677   | 18,602   | 1,841        | 12,760         | 984    | 183,162   |                               |
| 2030                                       | 52          | 64       | 185     | 138      | 20,349  | 76,459    | 14,354  | 48,050   | 20,006   | 1,980        | 13,723         | 1,013  | 196,373   |                               |
| 2031                                       | 56          | 68       | 198     | 148      | 21,757  | 81,750    | 15,438  | 51,678   | 21,517   | 2,129        | 14,759         | 1,044  | 210,540   |                               |
| 2032                                       | 60          | 73       | 212     | 158      | 23,262  | 87,407    | 16,603  | 55,579   | 23,141   | 2,290        | 15,873         | 1,075  | 225,734   |                               |
| 2033                                       | 64          | 78       | 226     | 169      | 24,872  | 93,456    | 17,857  | 59,776   | 24,889   | 2,463        | 17,072         | 1,107  | 242,027   |                               |
| 2034                                       | 68          | 83       | 242     | 181      | 26,593  | 99,923    | 19,205  | 64,289   | 26,768   | 2,649        | 18,361         | 1,140  | 259,501   |                               |
| 2035                                       | 73          | 89       | 259     | 193      | 28,433  | 106,837   | 20,655  | 69,142   | 28,789   | 2,849        | 19,747         | 1,175  | 278,241   | 2,074,418                     |
| TOTAL C. DISEÑO=                           | 835         | 1,014    | 2,951   | 2,202    | 324,080 | 1,217,721 | 225,605 | 755,216  | 314,447  | 31,114       | 215,688        | 17,998 | 3,108,870 |                               |
| Compos Total(%)                            | 0.03%       | 0.03%    | 0.09%   | 0.07%    | 10.42%  | 39.17%    | 7.26%   | 24.29%   | 10.11%   | 1.00%        | 6.94%          | 0.58%  | 100.0%    |                               |

Fuente: Elaboración propia

El histograma que sigue muestra la proporción de los ejes equivalentes totales (20 años) por tipo de vehículo para este ejemplo. Como se comentó se aprecia que la mayor proporción corresponde a los vehículos grandes, los vehículos livianos tienen un impacto prácticamente nulo (en esta aplicación que utiliza datos reales llega a 0.15% del total de ESALs) pese a que dentro del TPDa los vehículos livianos representan más del 65% del total. Por este motivo en la mayoría de los análisis solo se toma en cuenta el impacto de los vehículos grandes y pesados.

**Fig. 10 Proporción de los ESALs en la aplicación presentada**



## 9. OTROS ASPECTOS RELACIONADOS

### 9.1 Las Cargas por Eje por encima de los límites de la Ley de Cargas

La Ley de Cargas de Bolivia establece los límites máximos de cargas por eje permitidos para circulación de los vehículos en las carreteras dentro del territorio boliviano. También establece los límites de:

- Altos o altura permitida. del suelo hasta la parte superior libre del vehículo, o parte superior de la carga que sobresale por encima del vehículo
- Anchos y longitudes totales máximos permitidos para la diversidad de vehículos que circulan por las carreteras de Bolivia.

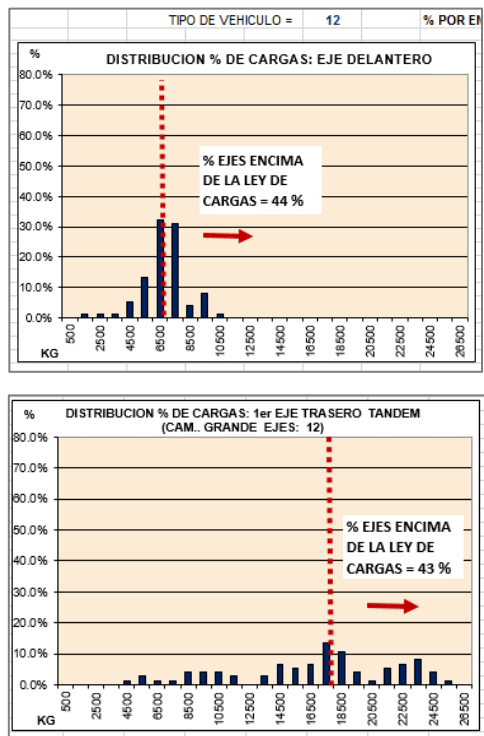
El Censo de Cargas por eje de los vehículos que pasan por una estación de pesaje permite establecer si los pesos están o no dentro de los límites establecidos.

La proporción y distribución de los ejes que exceden los límites se pueden determinar de los cuadros de frecuencias como los presentados en el cuadro 6 y pueden ser observados en los histogramas de frecuencias respectivos.

En los histogramas que siguen que corresponde a un espectro vehicular para un camión rígido con eje trasero tándem se aprecian los ejes que exceden los límites de carga por eje presentados a la derecha de la línea segmentada trazada en 7 toneladas para el eje delantero y 18 ton para el eje tándem trasero. Para el eje delantero se aprecia un 44% de ejes por encima del límite y para el eje tándem trasero un 43%. Esta situación corresponde a la carretera Sucre – Yamparaez a Julio del 2016.

Similares histogramas y cuadros de frecuencias pueden ser preparados para cada tipo de vehículo y configuración de ejes.

**Fig. 11. Histogramas del espectro de cargas por eje. Camión grande 12**



Elaboración P. Condarco

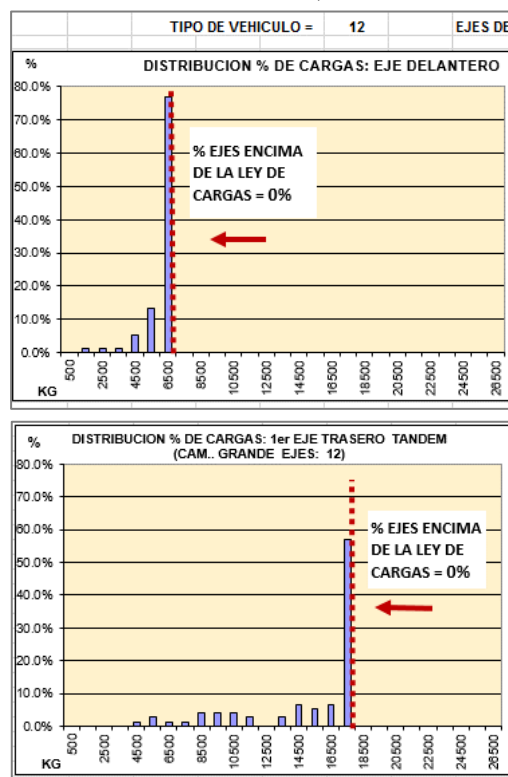
Si se reacondicionan los pesos por eje a la Ley de Cargas de Bolivia, es decir ningún vehículo de la muestra tiene pesos por eje por encima de la Ley, la figura sería como se muestra en el histograma a continuación.

- Para este ejemplo solo se modificó la distribución trasladando los ejes excedidos hasta el límite de cargas

- No se ha realizado una redistribución de la carga excedente que puede resultar en un incremento de los vehículos que dependerá de la carga excedentaria resultante a ser redistribuida.

Se pueden analizar de forma similar otras situaciones para otros tipos de vehículos

**Fig. 12. Histograma de frecuencias de pesos por eje**  
**Camión grande. Tipo ejes: 12**  
**(con ejes reacondicionados a la Ley de cargas de Bolivia)**



Elaboración P. Condarco

## 9.2 Los ejes equivalentes considerando que no existen cargas por eje por encima de la ley de cargas

La aplicación presentada en la sección 8 donde se determina el total de ESALs=3,108,870 corresponde a una situación donde se tienen cargas por encima de los límites, que si bien es real no es adecuado para el diseño, pues no es lógico diseñar los pavimentos para pesos por encima de esta ley.

El cuadro e histograma a continuación muestra el caso en que en la aplicación precedente de la



sección 8 (para el mismo TPDA) no se tengan ejes excedidos, lo cual da lugar a determinar nuevos ESALs (**ESALs = 1,544,322**) para un período de 20 años para el carril de diseño. Esto fue realizado asumiendo que todos aquellos vehículos excedidos en peso no lo están y su peso máximo es igual al límite de cada tipo de eje.

Comparando estos resultados con los del cuadro 14 se aprecia que los ESALs de acuerdo a los pesos encontrados en los trabajos de campo (cuadro 14) prácticamente doblan a los ESALs redistribuidos de acuerdo a la ley de cargas, lo cual muestra el impacto y efecto destructivo de vehículos que circulan con pesos por eje excedidos de los límites.

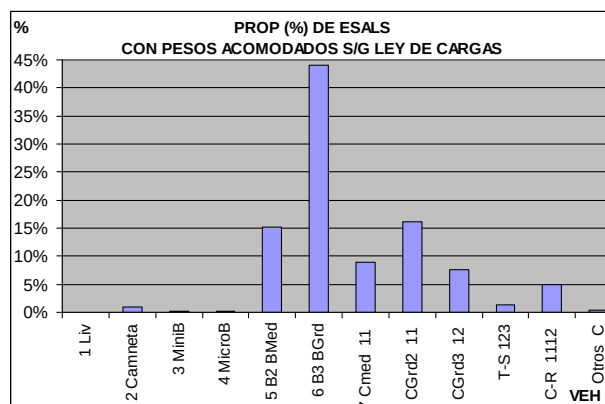
**Cuadro 15. ESALs 20 años reacomodando los ejes excedidos del ejemplo de la aplicación**

| AÑO               | AUTOM JEEP | CAMIO NETAS | MINI BUS | MICRO BUS | BUS MED | BUS GRDE | CAM. MED | C. GRDE 2 | C. GRDE 3 | C. SEMIRR 123 | C. REMOL. Q 1112 | OTROS | TOTAL ESALs      |
|-------------------|------------|-------------|----------|-----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|---------------|------------------|-------|------------------|
| TOT ESAL C_DISEÑO | 835        | 13,232      | 2,951    | 1,503     | 235,847 | 681,540  | 137,152  | 250,512   | 117,989   | 20,483        | 75,288           | 6,990 | <b>1,544,322</b> |

**Fig. 13**

**Proporción de los ESALs considerando que no existen ejes por encima del límite de la ley de cargas**

Elaboración P. Condarco



### 9.3 Pesos Promedio para los diferentes tipos de vehículo

Se indicó que en el cálculo de ejes equivalentes es preferible utilizar el espectro de cargas vehicular (si se tiene disponible). Sin embargo en algunos casos no se dispone de esta información, o simplemente se requiere conocer en términos promedio la distribución de los pesos en los ejes de cada tipo de vehículo.

La actividad de Censos de Carga permite determinar los pesos promedio ponderados de acuerdo a la frecuencia de distribución de pesos.

El cuadro que sigue muestra pesos promedio en base a la información disponible de 4 estaciones

correspondientes a 4 carreteras de Bolivia. La información es de los años 2015 y 2016. Las estaciones y las carreteras correspondientes son:

**Cuadro 16. Estaciones para la muestra de los pesos promedio. Años 2015 - 2016**

| DEPARTAMENTO | CARRET             | ESTACION  |
|--------------|--------------------|-----------|
| CHUQUISACA   | Sucre-Yamparaez    | Ckochis   |
| LA PAZ       | La Paz-Yungas      | Unduavi   |
| TARIJA       | Padcaya - Bermejp  | La Mamora |
| LA PAZ       | La Paz - Achacachi | Achacachi |

Cuadro 17. Pesos promedio por eje y tipo de vehículo

|                 | TIPO VEHICULO                                      | CONFIG. EJES | UNIDAD  | PESOS POR EJE (Kg) |                 |                 |                 | TOTAL            | TAMAÑO MUESTRA (Veh) |
|-----------------|----------------------------------------------------|--------------|---------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|
|                 |                                                    |              |         | EJE DELANTERO      | 1º EJE TRASERO  | 2do EJE TRASERO | 3er EJE TRASERO |                  |                      |
| 1               | AUTOMOVIL, VAGONETA                                | 11           | Kg<br>% | 1,365<br>50.6%     | 1,333<br>49.4%  |                 |                 | 2,698<br>100.0%  | 186                  |
| 2               | CAMIONETA                                          | 11           | Kg<br>% | 1,818<br>50.0%     | 1,818<br>50.0%  |                 |                 | 3,635<br>100.0%  | 22                   |
| 3               | MINIBUS                                            | 11           | Kg<br>% | 1,625<br>50.0%     | 1,625<br>50.0%  |                 |                 | 3,249<br>100.0%  | 96                   |
| 4               | MICROBUS                                           | 11           | Kg<br>% | 2,420<br>43.5%     | 3,140<br>56.5%  |                 |                 | 5,559<br>100.0%  | 25                   |
| 5               | BUS MEDIANO                                        | 11           | Kg<br>% | 4,027<br>39.0%     | 6,303<br>61.0%  |                 |                 | 10,330<br>100.0% | 417                  |
| 6               | BUS GRANDE 2 EJES                                  | 11           | Kg<br>% | 5,128<br>40.2%     | 7,643<br>59.8%  |                 |                 | 12,772<br>100.0% | 396                  |
| 7               | BUS GRANDE 3 EJES                                  | 12           | Kg<br>% | 7,125<br>39.5%     | 10,895<br>60.5% |                 |                 | 18,020<br>100.0% | 48                   |
| 8               | CAMION MEDIANO                                     | 11           | Kg<br>% | 3,668<br>36.0%     | 6,529<br>64.0%  |                 |                 | 10,197<br>100.0% | 738                  |
| 9               | C2 CAM. GRANDE 2 EJES                              | 11           | Kg<br>% | 5,101<br>34.9%     | 9,527<br>65.1%  |                 |                 | 14,628<br>100.0% | 256                  |
| 10              | C3 CAM GRDE 3 EJES (TRASERO TANDEM)                | 12           | Kg<br>% | 6,947<br>31.6%     | 15,028<br>68.4% |                 |                 | 21,975<br>100.0% | 384                  |
| 11              | C.SEMIREMOLQ. EJE2_TANDEM, EJE3_TANDEM             | 122          | Kg<br>% | 6,125<br>17.0%     | 15,000<br>41.7% | 14,875<br>41.3% |                 | 35,999<br>100.0% | 8                    |
| 12              | C.SEMIREMOLQ. EJE2_TANDEM, EJE3_TRIDEM             | 123          | Kg<br>% | 6,576<br>13.5%     | 16,461<br>33.9% | 25,500<br>52.5% |                 | 48,537<br>100.0% | 26                   |
| 13              | C.SEMIREMOLQ. EJE2_SIMPLE, EJE3_TRIDEM             | 113          | Kg<br>% | 6,142<br>12.9%     | 11,619<br>24.4% | 29,928<br>62.8% |                 | 47,689<br>100.0% | 42                   |
| 14              | T-S CAMION C.SEMIREMOL (ULTIMO EJE TRASERO TANDEM) | 112          | Kg<br>% | 6,166<br>17.9%     | 10,333<br>30.0% | 18,000<br>52.2% |                 | 34,499<br>100.0% | 6                    |
| 15              | C-R CAMION C_REMOLQUE                              | 1211         | Kg<br>% | 6,420<br>15.5%     | 16,700<br>40.4% | 9,260<br>22.4%  | 8,940<br>21.6%  | 41,318<br>100.0% | 25                   |
| 16              | C-R CAMION C_REMOLQUE                              | 1112         | Kg<br>% | 5,975<br>12.1%     | 10,150<br>20.5% | 11,500<br>23.2% | 21,900<br>44.2% | 49,523<br>100.0% | 40                   |
| TOTAL MUESTRA = |                                                    |              |         |                    |                 |                 |                 |                  | 2,715                |

Fuente: Datos de pesajes estaciones Kkochis, Mamoré, Unduavi, Achacachi.(2015-2016)  
Procesamiento y Elaboración P. Condarco

Los pesos son promedios ponderados en base a la muestra total en cada tipo de vehículo.

Los pesos promedio consideran a vehículos cargados, no incluyen a vehículos vacíos.

Llama la atención que aun considerando pesos promedio en algunos casos los pesos exceden el límite para ese tipo de eje. Esto ocurre con los números 13 y 16 que son vehículos articulados.

Si bien la cobertura de esta muestra no abarca todo el país, al menos cubre tres departamentos que corresponden a cuatro regiones diferentes: Altiplano, Yungas y Valles (para el

departamento de La Paz se tienen dos carreteras distintas, una en el altiplano y otra hacia los Yungas de La Paz).

9.4 Complementación sobre los Ejes fuera de los Límites máximos de la Ley de Cargas

Respecto a los ejes excedidos para la muestra de las 4 estaciones referidas en la sección anterior se encontró que en promedio:

- Los buses grandes de dos ejes tienen un 33% de los ejes sobrecargados

- Los Buses grandes de 3 ejes (eje trasero tándem) tienen sobrecargado el eje delantero (que es eje simple de 4 llantas) hasta un 50%
- Los camiones grandes tienen un 47% de los ejes traseros sobrecargados
- Los camiones semirremolques tienen ejes sobrecargados tanto delanteros como traseros. Los ejes traseros varían en un rango que va desde un 21% hasta un 71% (este último para el camión tipo 113 donde la sobrecarga está sobre el eje tridem)
- Los camiones con remolque tienen ejes sobrecargados dentro de un rango que va desde un 16% hasta un 81%)

Si bien el impacto destructivo mayor en el pavimento es el ejercido por los ejes traseros simples (4 llantas), se debe observar del análisis de la muestra que hay una tendencia de los usuarios (conductores, empresas de carga, etc.) en sobrecargar en los ejes dobles y triples (tándem y tridem).

- ❖ Esto podría deberse al hecho de que tener un vehículo con ejes dobles o tridem da a los usuarios una mayor confianza de que el vehículo no colapsará ante una carga mayor sobre estos ejes.
- ❖ Los usuarios independientemente de no cuidar su vehículo no son conscientes del daño que provocan en la infraestructura viaria por donde recorren.
- ❖ Lo más irónico es que, son precisamente estos mismos usuarios los que permanentemente reclaman por las condiciones y el deterioro en que se encuentran las carreteras en Bolivia cuando ellos son parte del origen de ese deterioro prematuro.
- ❖ Definitivamente se debe controlar que la circulación de vehículos grandes y pesados por las carreteras bolivianas sea con cargas dentro de los límites aprobados en la Ley de Cargas de Bolivia.

## **10. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Durante el desarrollo de este documento se han presentado los conceptos necesarios para abordar el tema así como el procedimiento para análisis de este tipo de actividad.

Se ha desarrollado el procedimiento con ejemplos de cálculo y con la presentación de cuadros y gráficas.

La determinación de los ejes equivalentes (ESALs) es presentado con una aplicación lo que después permite apreciar la proporción del aporte de impacto de los tipos de vehículos que circulan por una vía

Los pesajes de cargas por eje permiten establecer los ejes sobrecargados lo que permite tomar nota para enfatizar sobre los controles de pesos en las carreteras de Bolivia.

También se han establecido pesos promedio de cargas por eje que solo son referenciales para tomar en cuenta la distribución de los pesos en los respectivos ejes de un vehículo.

### **10.1 Conclusiones**

Se establece que se debe diseñar los pavimentos usando la distribución de frecuencias de pesos (espectro de cargas) tomando en cuenta que ellos no excedan los límites de carga. Los pesos promedio solo podrían ser tomados en cuenta cuando no se tiene información y cuando los camiones que circulan son de características similares y se sabe que sus cargas por eje no difieren mucho uno del otro.

Se concluye que muchos vehículos (camiones) están circulando por las carreteras de Bolivia con ejes sobrecargados, siendo necesario efectuar el control de cargas, situación considerada de urgencia pues el deterioro de las carreteras es grande y constante.

El deterioro debido a ejes sobrecargados es provocado por usuarios inconscientes de su responsabilidad que solo buscan su beneficio personal o institucional (empresas de carga).

Este deterioro se traduce en costos para el país que es pagado por todos los contribuyentes y no es compensado por los responsables.

Esta tolerancia por parte de los responsables del control, tal vez se deba al desconocimiento de la proporción del daño que producen los excesos y a como analizar la información antes de planificar un sistema de control efectivo.

### **10.2 Recomendaciones**

El procedimiento presentado en este documento toma en cuenta información disponible. Sin embargo de ello, la muestra utilizada solo alcanza a 4 estaciones de pesaje en tres departamentos y por ello es recomendable ampliar este análisis a más estaciones que cubran todo el país y establecer tendencias representativas regionales y nacionales.

El control de los pesos por eje es responsabilidad de todos. Las instituciones encargadas y responsables de este tema deben realizar las acciones pertinentes como ser, la difusión de la ley y concientización de las partes involucradas (conductores, empresas, etc.) sobre las consecuencias de la sobrecarga en los ejes así como proceder a la aplicación de la Ley de Cargas y sancionar a los infractores.

Se recomienda al usuario lector tomar las consideraciones a lo largo de este documento como referenciales para sacar sus propias conclusiones.

### **Bibliografía**

1. *Ley de Cargas en Bolivia*. Decreto Supremo No. 25629. Diciembre 1999.
2. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO, 2004, Fifth Edition.
3. Condarco, Primitivo. *Apuntes de Ingeniería de Tránsito. Cargas por Eje* 2015. Curso de Postgrado en Transportes ITVC-UMSA.
4. *Base de Datos de Pesajes de vehículos para proyectos Carreteros*, Estaciones: La Mamora (Tarija), Achacachi (La Paz), Ckochis (Chuquisaca), Unduavi (La Paz carret. A Los Yungas). ABC – Administradora Boliviana de Carreteras de Bolivia.
5. *Software DIPAV*. Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón (IBCH).